

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



**FACULTAD DE INGENIERÍA
COLEGIO DE INGENIERÍA
GEOFÍSICA**



**“ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE FINOS EN SUELOS AGRÍCOLAS A PARTIR
DE MEDICIONES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA REALIZADAS EN CAMPO Y
LABORATORIO, EN VILLA DE ARRIAGA, SAN LUIS POTOSÍ.”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN GEOFÍSICA

PRESENTA

Héctor Miguel Jiménez Paz

DIRECTOR INTERNO

M.C. Julio Cesar González Hernández

DIRECTOR EXTERNO

Dr. Omar Delgado Rodríguez

PUEBLA, PUE. FEBRERO 2021



Oficio SA/0125/2021

C. HÉCTOR MIGUEL JIMÉNEZ PAZ
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
GEOFÍSICA
Presente.

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

"ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE FINOS EN SUELOS AGRÍCOLAS A PARTIR DE MEDICIONES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA REALIZADAS EN CAMPO Y LABORATORIO, EN VILLA DE ARRIAGA, SAN LUIS POTOSÍ."

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor de tema al Mtro. Julio César González Hernández.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor."
H. Puebla de Z. a 15 de enero de 2021

M. I. Angel Cedillo Guerrero
Director



M'ACGZ /barv
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero
Zamora Director de la Facultad de
Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla P r e s e n t e.

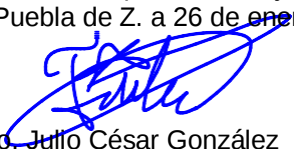
El que suscribe: Mtro. Julio César González Hernández, director del tema de tesis:

“ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE FINOS EN SUELOS AGRÍCOLAS A PARTIR DE
MEDICIONES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA REALIZADAS EN CAMPO Y LABORATORIO, EN
VILLA DE ARRIAGA, SAN LUIS POTOSÍ.”.

Presentada por el C. Héctor Miguel Jiménez Paz, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención
al oficio No. SAC/0125/2021 con fecha de emisión 15 de enero de 2021, me permito informar a Usted que
después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía
de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 26 de enero de 2021



Mtro. Julio César González
Hernández Director de la Tesis

M'JCGH/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

DEDICATORIA

A esa persona que me dio la vida, su amor y su apoyo en todo momento a pesar de las circunstancias.

Ma Margarita Teresa Paz Velázquez

Por la paciencia infinita y el amor incondicional, gracias a ustedes que desde el cielo me han acompañado en cada paso que doy.

Gregorio Abraham Paz Valencia. (†)

ℰ

María de la Luz Velázquez López. (†)

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar hasta este sitio, porque a pesar de los obstáculos que he pasado, me ha dado fortaleza, salud, inteligencia, sabiduría para enfrentarlos de la mejor manera y salir adelante en cada situación.

A mi madre por darme la vida, porque ha sido como padre y madre al mismo tiempo, que a pesar de la situación en la cual ella se encuentre, me ha brindado todo el apoyo posible, amor, cariño, para no darme por vencido; por corregirme y darme fortaleza en los momentos más débiles y guiarme de la mejor manera para enfrentar la vida diaria.

A mí mismo, por el esfuerzo que pongo para cumplir mis metas, por el simple hecho de nunca darme por vencido, creer en mí y lo que puedo lograr, por no dejar a un lado mis sueños y ser los motores en todo momento para llegar a cumplir cada uno de ellos.

Al Dr. Omar Delgado Rodríguez, que fungió como mi director de tesis externo, al cual estaré eternamente agradecido por darme la confianza y aceptarme en primera instancia como practicante, poco después como mi director de tesis, que sin conocerme, me compartió su experiencia, me brindó los conocimientos necesarios, por tenerme paciencia y darme la oportunidad de trabajar con él, por creer y ver en mí, las habilidades necesarias, conocimientos, aptitudes y actitudes para involucrarme en cada uno de sus proyectos, en este principalmente, que es el más importante de mi vida hasta el momento.

A mi honorable jurado evaluador:

M.C. Julio César González Hernández director interno de tesis, el cual me brindó todo el apoyo posible que requerí, por compartirme sus conocimientos, y guiarme hasta este punto.

M.C. José Serrano Ortiz, quien me brindó muchos conocimientos de la geofísica durante toda la carrera.

Ing. Manuel Uribe Arriaga, por ir paso a paso conmigo durante mi estancia universitaria.

También quiero hacer mención a mis tíos, primos y abuelos, en especial a mi primo Marco, que me ha brindado apoyo en todo momento, por nunca dudar de mi capacidad y no dejar de creer en mí, a mi tía Carmen y su familia que siempre me brindó soporte en el cuidado de mi ser más querido “mi madre”, a mis abuelos por custodiarme desde pequeño, enseñarme valores, corregirme en los momentos adecuados. Aquí mismo quiero hacer memoria a mi familia de SLP, por abrirme las puertas de su hogar en momentos clave de este logro.

Por otro lado, no quiero dejar pasar el nombre de una persona muy especial, que la admiro y quiero muchísimo, con la cual he convivido por más 8 años, Antonia, que he contado con ella en todo momento, me ha brindado cariño, amor, etc. Ella que siempre ha estado en la salud y en la enfermedad, en los buenos y malos momentos pero siempre presente.

A mis amigos que me acompañaron en todo mi camino como estudiante, Caro, Bety, Josué, Edgar, Arantxa y César, personas que les guardo un enorme cariño, con las cuales viví momentos inolvidables, pasé risas, tristezas, viajes, desveladas, diversión, un sin fin de momentos gratos.

Agradezco a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en especial al colegio de Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería y qué decir de mis maestros, que me guiaron como estudiante y formaron parte esencial en mi formación académica para lograr esta meta.

Por último quiero hacer mención al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica “IPICYT”, por abrirme las puertas para culminar este logro, además del personal académico y administrativo que me trataron de manera excelente en todo momento y qué decir de los estudiantes de maestría, en especial Jonathan y los estudiantes del verano de la ciencia de la universidad de Sonora, que fueron parte importante de todo esto, que se convirtieron en mis amigos, y me brindaron todo el apoyo, sin duda alguna, les guardo un enorme aprecio.

CONTENIDO

CARTA DE ASIGNACIÓN DE ASESOR DE TESIS.....	I
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS	I
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
CAPITULO 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 General.....	5
1.3.2 Específicos	5
CAPITULO 2.....	6
2 MARCO GEOLÓGICO	6
2.1 Marco geográfico	6
2.2 Geología del área de estudio.....	7
2.2.1 Mesa del centro	7
2.3 Edafología.....	7
2.3.1 Mesa del Centro	7
2.3.2 Subprovincia, Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato	7
2.3.3 Subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.....	8
CAPITULO 3.....	11

3	MARCO TEÓRICO	11
3.1	Prospección Geoeléctrica	11
3.2	Resistividad eléctrica.....	12
3.3	Ecuaciones fundamentales	15
3.3.1	Factor geométrico.....	20
3.4	Resistividad aparente	21
3.5	Fundamentos de Tomografía de Resistividad Eléctrica	22
3.5.1	Arreglo Wenner.....	24
3.5.2	Arreglo Wenner - Schlumberger	25
3.5.3	Dipolo-Dipolo	25
3.6	Teoría básica de inversión	26
3.7	Calicatas eléctricas	27
3.7.1	Calicata Wenner	27
3.7.2	Calicata Schlumberger	28
3.8	Estimación de porcentaje de finos	29
3.9	Análisis textural de Bouyoucos	31
3.10	Textura de suelo.....	32
4	METODOLOGÍA.....	34
4.1	Toma de muestras en campo para mediciones eléctricas realizadas en laboratorio	34
4.1.1	Material utilizado.....	35
4.2	Mediciones de resistividad de suelo (SRM) en laboratorio	35
4.2.1	Preparación de soluciones.....	35
4.2.2	Preparación de la muestra y resistivímetros	36
4.2.3	Realización de mediciones eléctricas	37
4.2.4	Material y equipo	37

4.3	Procesamiento de mediciones eléctricas de laboratorio, estimación de porcentaje de finos algoritmo Ryjov.	42
4.4	Determinación de la salinidad de suelo	43
4.4.1	Reactivos	43
4.4.2	Material y equipo.....	44
4.4.3	Preparación de la pasta de suelo saturado.....	44
4.4.4	Procedimiento para obtener el extracto	44
4.4.5	Pretratamiento del extracto de saturación	45
4.5	Técnica de Bouyoucos	45
4.5.1	Material y equipo a utilizar	46
4.5.2	Reactivos	46
4.5.3	Cálculos.....	46
4.5.4	Pre-tratamiento de las muestras de suelo	47
4.5.5	Determinación de textura de muestras de suelo.....	48
4.5.6	Diagrama de textura del suelo	49
4.6	Tomografía de Resistividad Eléctrica en campo	50
4.7	Procesamiento Tomografía de Resistividad Eléctrica y sección de finos	51
4.8	Calicatas Eléctricas.....	52
4.8.1	Material y equipo utilizado para mediciones eléctricas	53
4.9	Procesamiento calicatas eléctricas	53
4.10	Humedad de suelos en campo.....	54
4.10.1	Material y equipo	54
4.11	Procesamiento; Determinación de contenido de finos para campo.....	54
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
5.1	Resultado, mediciones eléctricas de laboratorio, estimación de porcentaje de finos	58
5.2	Resultados de salinidad de muestras de suelo	59

5.3	Resultados de la técnica de Bouyoucos	60
5.4	Resultados mediciones eléctricas de laboratorio, (algoritmo de Ryjov y técnica de Bouyoucos).....	60
5.5	Diagrama textural	62
5.6	Resultado de tomografía de resistividad eléctrica y sección de finos ..	63
5.7	Resultados calicatas eléctricas: mapa de resistividad	64
5.8	Mapa de humedad del suelo.....	65
5.9	Creación de mapa de finos software Surfer 12, e Interpretación de Resultados.....	66
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
6.1	Conclusiones.....	68
6.2	Recomendaciones.....	69
	REFERENCIAS.....	70
	ANEXOS	75
	<i>Modelo teórico de Ryjov para el cálculo del contenido de finos</i>	<i>78</i>
	<i>Anexo 2: Tablas de adquisición de datos de Tomografía de Resistividad Eléctrica para los puntos de atribución X= 0, 0.6, 1.2, 36.6, 37.2 y 37.8 m.</i>	<i>84</i>
	<i>Anexo 3. Modelos teóricos PetroWin ajustados a la técnica de Bouyoucos.....</i>	<i>86</i>
	<i>Anexo 4. Tablas de adquisición de datos, resistividad aparente determinada con Calicatas Eléctricas Wenner (K= 3.14159) y humedad para los perfiles 1 al 4.</i>	<i>89</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación del área de estudio.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Geología de Villa de Arriaga (de Arriaga, 2005).</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3. Edafología Villa de Arriaga (de Arriaga, 2005).</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Clasificación de los métodos geoelectricos (Auge, 2008).</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5. Ley de OHM resistencia de un conductor (Auge, 2008).</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6. Rango de resistividad de algunos minerales (Arias, 2011).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7. Dispositivo tetraelectrónico (Todd, 1959).</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8. Pseudosección del Dispositivo Wenner-Schlumberger, a=separación entre electrodos, n=número de nivel, C1 C2= electrodos de corriente y P1 P2=electrodos de potencial (Loke, 2000).</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9. Arreglo Wenner para Tomografía Eléctrica (Engie & Fabio, 2017).</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10. Arreglo Wenner-Schlumberger para Tomografía Eléctrica (Engie & Fabio, 2017).</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11. Arreglo Dipolo-Dipolo para Tomografía Eléctrica (Engie & Fabio, 2017).</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12. Arreglo Wenner calicata eléctrica (Engie & Fabio, 2017).</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13. Arreglo Schlumberger calicata eléctrica (Engie & Fabio, 2017).</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14. Modelo que representa la relación de la porosidad de suelo para diferentes contenidos de arcilla. (Shevnin, 2007).</i>	<i>30</i>
<i>Figura 15. Modelo representativo de las curvas teóricas de resistividad contra salinidad de agua contenida en los poros para diferente contenido de arcilla (Shevnin, 2007).</i>	<i>31</i>
<i>Figura 16. Diagrama textural. (USDA, 1999).</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17. Vista aérea de la ubicación del área de estudio, ejido E. Zapata, Villa de Arriaga SLP (Google Earth Pro).</i>	<i>34</i>
<i>Figura 18. Ubicación y toma de muestras de suelo.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19. Muestra de suelo homogenizada y resistivímetro con muestra de suelo.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 20. Resistivímetro de suelo Soil-Box.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 21. Resistivímetros con muestra, saturados de solución NaCl.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22. Medidor de puesta tierra o “terrimeter Saturn Geo LEM”, (elaboración propia).</i>	<i>39</i>

<i>Figura 23. Toma de temperatura</i>	<i>Figura 24. Mediciones eléctricas</i>	40
<i>Figura 25. Formato base EXP. (a) Valores de salinidad, (b) valores de resistividad, para procesamiento PetroWin.</i>		43
<i>Figura 26. Procedimiento para la obtención de salinidad, mediante el extracto de saturación (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).</i>		45
<i>Figura 27. Pre-tratamiento muestras de suelo.</i>		47
<i>Figura 28. Determinación de texturas de muestras de suelo.</i>		49
<i>Figura 29. Ejemplo determinación del tipo de textura.</i>		49
<i>Figura 30. Ubicación y adquisición de datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE).</i>		50
<i>Figura 31. Esquema de adquisición de datos TRE, arreglo Wenner-Schlumberger.</i>		50
<i>Figura 32. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Secciones de valores de resistividad aparente medida en campo, de valores calculados de resistividad aparente y de la sección o modelo 2D obtenidos en el programa, Res2Dinv.</i>		51
<i>Figura 33. Ubicación de Red y adquisición de datos de calicatas eléctricas (CE).</i> ...		52
<i>Figura 34. Registro de humedad de suelo en campo.</i>		54
<i>Figura 35. Secuencia de procesamiento para la sección de finos, resistividad y mapa de finos.</i>		55
<i>Figura 36. Sección de arcilla programa PetroWin.</i>		56
<i>Figura 37. Sección de resistividad programa PetroWin.</i>		56
<i>Figura 38. Modelo teórico PetroWin muestra “Zapata base” ajustado a la técnica de Bouyoucos.</i>		58
<i>Figura 39. Gráfica de correlación lineal % finos Ryjov vs Bouyoucos.</i>		61
<i>Figura 40. Triangulo textural de muestras de suelo ejido Emiliano Zapata.</i>		62
<i>Figura 41. Correlación entre fotografía del sitio vs sección 2D de Tomografía Eléctrica, software Surfer 12.</i>		64
<i>Figura 42. Sección de porcentaje de finos software Surfer 12.</i>		64
<i>Figura 43. Mapa de resistividad de calicatas eléctricas.</i>		65
<i>Figura 44. Mapa de humedad.</i>		66
<i>Figura 45. Mapa de porcentaje de contenido de finos Surfer.</i>		67

<i>Figura 46. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata A 2.1, ajustado a la técnica de Bouyoucos.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 47. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata 1, ajustado a la técnica de Bouyoucos.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 48. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata 2 ajustado a la técnica de Bouyoucos.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 49. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata 3 ajustado a la técnica de Bouyoucos.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 50. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata 4 ajustado a la técnica de Bouyoucos.....</i>	<i>88</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Factores geométricos de los diferentes tipos de dispositivos electródicos (Edwards, 1977).</i>	21
<i>Tabla 2. Clasificación de suelos según la USDA.</i>	33
<i>Tabla 3. Concentraciones de NaCl.</i>	36
<i>Tabla 4. Mediciones eléctricas de suelos en laboratorio.</i>	40
<i>Tabla 5. Corrección por temperatura.</i>	47
<i>Tabla 6. Porcentaje de finos obtenidos de la sección arcilla y resistividad del programa PetroWin.</i>	57
<i>Tabla 7. Resultados muestra de salinidad.</i>	59
<i>Tabla 8. Estimación de contenido de finos por la técnica de Bouyoucos.</i>	60
<i>Tabla 9. Tabla comparativa, resultados técnica de Ryjov y Bouyoucos.</i>	61
<i>Tabla 10. Grupo de Suelos de Referencia (GSR) de la WRB con códigos sugeridos (FAO & UNESCO, 1998).</i>	76
<i>Tabla 11. Valores medidos en laboratorio de resistividad y de salinidad.</i>	82
<i>Tabla 12. Datos X= 0 m (TRE).</i>	84
<i>Tabla 13. Datos X= 0.6 m (TRE).</i>	84
<i>Tabla 14. Datos X= 1.2 m (TRE).</i>	84
<i>Tabla 15. Datos X= 36.6 m (TRE).</i>	85
<i>Tabla 16. Datos X= 37.2 m (TRE).</i>	85
<i>Tabla 17. Datos X= 37.8 m (TRE).</i>	85
<i>Tabla 18. Perfil 1 CE y humedad.</i>	89
<i>Tabla 19. Perfil 2 CE y humedad.</i>	89
<i>Tabla 20. Perfil 3 CE y humedad.</i>	90
<i>Tabla 21. Perfil 4 CE y humedad.</i>	90

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad determinar el contenido de finos en suelos agrícolas, utilizando métodos geoeléctricos y el algoritmo de Ryjov. El método directo y tradicional para determinar contenido de arcilla y limo en un suelo, consiste en realizar muestreo de suelos para su posterior análisis textural en laboratorio aplicando el método de Bouyoucos. Esto habla del interés actual para explorar a detalle distintos parámetros petrofísicos aplicados a la estimación de contenido de finos, así como el uso de la geofísica como método indirecto. Por lo tanto, es necesario desarrollar metodologías y técnicas de rápido avance y bajo costo de aplicación que aporten mapas texturales de los suelos agrícolas, aportando información útil para la mejora de cultivos.

Para lograr el objetivo del trabajo, se aplicaron diversas técnicas de campo y de análisis de laboratorio con la finalidad de conocer de manera precisa y puntual el porcentaje de finos, y establecer posteriormente su relación espacial en toda el área de estudio. Las técnicas de laboratorio utilizadas fueron, como técnica indirecta, mediciones eléctricas y procesamiento de la información utilizando el programa PetroWin (algoritmo de Ryjov) y, como técnica directa, el análisis textural de Bouyoucos; ambas aplicadas a muestras de suelo colectadas en una parcela agrícola perteneciente al ejido Emiliano Zapata, municipio de Villa de Arriaga, SLP. Los resultados alcanzados en laboratorio (directo e indirecto) fueron comparados con los resultados de la aplicación de los métodos geoeléctricos Tomografía de Resistividad Eléctrica y Calicatas Eléctricas utilizando el programa PetroWin, que incluye un modelo teórico de suelos cuyas formulaciones es conocida como algoritmo de Ryjov, el cual incluye componentes del suelo y el cálculo electroquímico de la resistividad del agua de poro, derivando en el cálculo de la resistividad del suelo.

El programa PetroWin realiza una inversión iterativa como proceso de minimización del error de ajuste entre los valores de resistividad eléctrica calculados utilizando el modelo teórico y los datos experimentales obtenidos en laboratorio o en campo. La minimización del error del ajuste permite modificar diferentes parámetros petrofísicos

del modelo teórico del suelo tales como; CIC de la arcilla, radio de los capilares de la arcilla, porosidad de la arcilla y de la arena. Al final de este proceso se determinaron los valores de contenido de finos del suelo que le corresponde al error mínimo de ajuste.

Mediante análisis comparativo realizado sobre los resultados obtenidos en la aplicación de las técnicas mencionadas con respecto a los métodos geofísicos aplicados en campo, se concluye que Bouyoucos resulta ser una técnica complementaria a la técnica de Ryjov, y mediante la aplicación de los métodos geofísicos es posible determinar de forma rápida, un primer aproximado de reconocimiento espacial de contenido de finos dentro del área de estudio.

Palabras clave: Contenido de finos, Técnica y algoritmo de Ryjov, Técnica de Bouyoucos, Tomografía de resistividad eléctrica, Calicatas eléctricas.

CAPITULO 1

1 INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los parámetros físicos, junto con las químicas, biológicas, mineralógicas en suelos agrícolas son, junto al régimen de riego determinantes para el desarrollo y mejora en la productividad de los suelos agrícolas, los parámetros físicos principalmente, permiten conocer en gran medida la capacidad de campo, lámina de riego requerida, contenido de materia orgánica, entre otros. La práctica de cultivo siempre ha indicado que hay diferencias entre parcelas cercanas, lo que se refleja en su productividad. Habitualmente la siembra y cosecha de diversos productos agrícolas implica el uso de grandes extensiones de tierra, por ello es necesario entender cómo influye la actividad humana y como puede llegar a modificar dichos suelos.

Según Robert (2002), algunos países (ej. USA, Alemania, Francia, entre otros), realizan investigaciones para conocer los distintos parámetros de suelo y sus variaciones temporales en lo que se conoce como agricultura de precisión (AP). Los resultados obtenidos de (AP), sirven para explotar suelos agrícolas de manera eficiente, sin impacto ambiental obteniendo mejores resultados, optimizando el uso de fertilizantes y agua de riego.

Desde hace muchos años, uno de los problemas más frecuentes ha sido la utilización de los métodos directos e invasivos como primera y única opción, para conocer la calidad de los suelos, lo cual implica muchas horas de trabajo en campo dependiendo del método utilizado, el elevado costo económico, así como los resultados extremadamente puntuales, ya que proporcionan una imagen imprecisa de las variaciones de los parámetros a evaluar del suelo. Por ello, en la actualidad, se han desarrollado nuevas tecnologías para la obtención precisa de parámetros petrofísicos, utilizando técnicas indirectas con resultados más integrales como lo son; los métodos geofísicos, específicamente los métodos eléctricos y electromagnéticos (Sudduth et al., 2000), mostrando ser eficientes en la distinción de tipos genéticos de

suelos (Pascual et al. 1995) y cambios en el grado de salinización (Williams & Baker, 1982) o la humedad (McKenzie, 1989).

A lo largo del tiempo se han desarrollado numerosos modelos petrofísicos para la industria petrolera (Archie, 1942; Clavier et al., 1984; Waxman & Smits, 1968) y para formaciones poco o no consolidadas (Rhoades et al. 1976).

Sobre la base de estos antecedentes, en el Instituto Mexicano del Petróleo se desarrolló una nueva tecnología para calcular parámetros petrofísicos de formaciones poco o no consolidadas, de acuerdo a modelos teóricos con la ayuda del software PetroWin, que utiliza el algoritmo de Ryjov (Ryjov & Shevnin, 2002). Este algoritmo establece que, mediante mediciones eléctricas realizadas en campo y laboratorio, es posible la determinación del contenido de arcilla y otros parámetros relevantes como porosidad y capacidad de intercambio catiónico (CIC), (Shevnin et al. 2007), siendo aplicado a la determinación de la frontera geoelectrica entre formaciones geológicas limpias y contaminadas por hidrocarburos, útil en estudios de impacto ambiental al subsuelo y agua subterránea.

En un primer intento de aplicar el algoritmo de Ryjov a estudios de suelos, se realizaron mediciones eléctricas en campo y en muestras colectadas de un pequeño terreno de aproximadamente 800 m², próximo a la ciudad de Oaxaca (Delgado Rodríguez, 2012). Se estimaron los parámetros, contenido de arcilla, porosidad y CIC, dando como resultado que, las estimaciones del contenido de arcilla en laboratorio eran más precisas que las determinadas en campo mediante la aplicación del método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), esto, mediante la comparación de dichos resultados con los alcanzados mediante la técnica tradicional de Bouyoucos, además de resaltar la productividad del método TRE para estos fines.

Por otro lado, la calidad de los suelos en el estado de San Luis Potosí es muy variada, siendo la actividad agrícola el uso fundamental del suelo en el estado. Grandes extensiones, son utilizadas para siembra y cosecha de temporal, fundamentalmente maíz, frijol, cebada y variedad de hortalizas. Específicamente, en el municipio de Villa de Arriaga se pierde hasta un 50% de las cosechas debido a la

falta de lluvias o por fuertes tormentas que inundan los terrenos, mientras que de octubre a enero las heladas acaban con todo (Palés, 2015).

El propósito del presente trabajo es aplicar el algoritmo de Ryjov para la estimación del contenido de finos en suelos en una parcela agrícola de 9 Ha, ubicada en el municipio de Villa de Arriaga, SLP, a partir de mediciones eléctricas efectuadas en laboratorio y en campo. Para las mediciones en campo se empleará el método de calicatas eléctricas (CE), como método menos preciso pero más productivo que el TRE. Los resultados alcanzados de las mediciones eléctricas serán comparados con texturas determinadas con la aplicación de la técnica de Bouyoucos.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el municipio de Villa de Arriaga los agricultores de la zona de estudio manifiestan que desde hace algunos años los rendimientos en la producción han decrecido, debido a la falta de una estrategia adecuada en los sistemas de fertilización y riego. El análisis textural de los suelos de cultivos es fundamental en el proceso de estudios de los mismos con el fin de determinar, a partir del conocimiento de propiedades adicionales, como salinidad, humedad y porosidad, parámetros estrechamente relacionados con la calidad de un suelo agrícola tales como la permeabilidad y la lámina de riego.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Las técnicas de muestreo de suelo, ya sea aleatoria o estadística, implica un gran esfuerzo y un alto costo, siendo además un método invasivo. Un número alto de muestras de suelo deben ser colectadas y analizadas en laboratorio siendo que el resultado final es un mapa textural de suelos afectado significativamente por la interpolación. Los resultados obtenidos en las muestras de laboratorio, si bien pueden ser precisas, son puntuales, por lo que su aplicación en grandes extensiones de suelo es insuficiente.

Las técnicas geofísicas, en particular las geoeléctricas, ofrecen la opción de obtener, con alta productividad, un alto número de mediciones a bajo costo, traducándose en mapas con muy poca interpolación, lo que permite conocer las variaciones de las propiedades eléctricas del suelo. La aplicación de métodos geoeléctricos de rápido avance para la determinación de la resistividad eléctrica del suelo, en conjunto con mediciones de salinidad y humedad, construirán una base de datos adecuada para la obtención del contenido de finos (arcilla + limo) del suelo en mapas de alta resolución, lo que sería una herramienta indispensable para el estudio de suelos agrícolas a bajo costo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General

Determinar el contenido de finos (arcilla + limo) a partir de mediciones de resistividad, humedad y salinidad de suelos agrícolas del ejido Emiliano Zapata, municipio de Villa de Arriaga, SLP, utilizando el algoritmo de Ryjov (programa PetroWin), con el fin de aportar mapas de alta resolución de contenido de finos a bajo costo, como metodología viable para ser aplicada en grandes extensiones de suelo agrícola.

1.3.2 Específicos

- Determinar el contenido de finos en muestras de suelos colectadas en la parcela de estudio mediante mediciones eléctricas realizadas en laboratorio, utilizando el algoritmo de Ryjov.
- Determinar la factibilidad de utilizar el algoritmo de Ryjov para la determinación del contenido de finos mediante un análisis de correlación de los valores obtenidos con aquellos determinados en las mismas muestras de suelo aplicando el método tradicional de Bouyoucos.
- Obtener un perfil de Tomografía de Resistividad Eléctrica como método geoelectrico de alta resolución. Recálculo de sección geoelectrica en sección de contenido de finos utilizando mediciones de humedad, salinidad y el programa PetroWin.
- Obtener el mapa de contenido de finos, procesamiento conjunto de datos de resistividad aparente, humedad y salinidad utilizando el programa PetroWin, a partir de un levantamiento de calicatas eléctricas, como técnica de rápido avance, en una parcela agrícola de 9 Ha.

CAPITULO 2

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 Marco geográfico

La comunidad de Emiliano Zapata, en el municipio de Villa de Arriaga, San Luis Potosí (Figura 1), se encuentra localizada en la parte suroeste de la capital del estado, en la zona centro. La cabecera municipal tiene las siguientes coordenadas: 101° 23" de longitud oeste y 21° 55" de latitud norte, con una altura de 2,160 metros sobre el nivel del mar. La superficie total del municipio, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI, 2012), es de 878.5 km², lo que representa un 1.4% del territorio estatal; Limita por el norte con el municipio de Mexquitic de Carmona, al noreste con San Luis Potosí, al este, Villa de Reyes, al sur, con el estado de Guanajuato, al suroeste, el estado de Jalisco y al oeste, el estado de Zacatecas. Su distancia aproximada a la capital del estado de SLP es de 60 km.

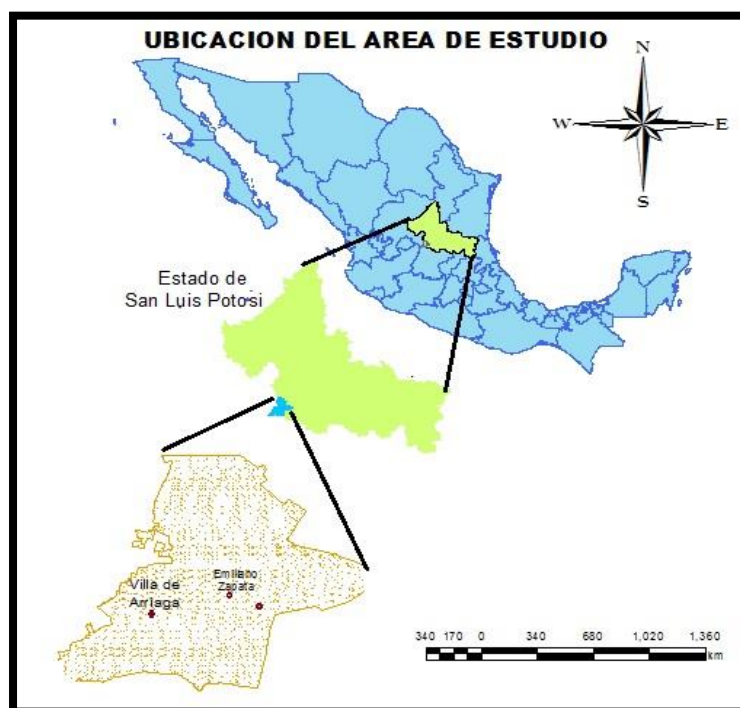


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

2.2 Geología del área de estudio

2.2.1 Mesa del centro

Los rasgos estructurales de esta región dan evidencia de tres episodios tectónicos claramente diferenciados (Figura 2), el primero, relacionado con el metamorfismo regional de las rocas sedimentarias del Triásico, tiene como testigo de ello las rocas metamórficas (esquistos) aflorantes al suroeste de la localidad, El Barril. El segundo, datado a finales del Cretácico y principios del Terciario, se manifestó con esfuerzos de compresión de la Orogenia Larámide, la cual ocasionó pliegues más abiertos en el occidente del estado y más estrechos hacia el oriente, destacan el Anticlinorio de Catorce y el Anticlinorio de Charcas, con orientación general norte-sur. El tercero, ocurrió en el Plioceno y obedece a esfuerzos de tensión que dieron origen a sistemas de fracturas y fallas normales con orientación norte-sur y noroeste. (Instituto Nacional de Estadística, Censo Agropecuario, 2007).

La geología presente en el sitio de estudio es del periodo Cuaternario (66.8%) y Neógeno (32.4%), constituido por rocas ígneas extrusivas: riolita-toba ácida (24.5%), riolita (8.0%) y basalto (1.2%), los suelos presentes en su mayoría aluvial (65.5%), (de Arriaga, 2005).

2.3 Edafología

2.3.1 Mesa del Centro

2.3.2 Subprovincia, Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato

Esta Subprovincia abarca los municipios de Villa de Reyes y parte de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí, Santa María del Río, Soledad de Graciano Sánchez, Tierra Nueva y Villa de Arriaga (Figura 3). Más de la mitad de esta región está constituida por suelos Feozems, los cuales están distribuidos en todos los sistemas de topoformas, tienen textura media, están limitados por roca y son poco profundos. Estas mismas características presentan los Regosoles y el Litosol que cubren porciones considerables de las sierras. Sobre el lomerío de pie de monte con llanuras, los Feozems háplico y Lúvico son de origen coluvie-aluvial y están asociados con Regosoles y Fluvisoles. El Feozems háplico de las llanuras de piso

rocoso está limitado por tepetate y se asocia con Regosol éutrico; el de la llanura aluvial es más profundo y está asociado con Xerosol háplico. En el extremo sureste hay suelos rojos y arcillosos, denominados Luvisoles órtico y crómico que están limitados por roca y son aptos para la silvicultura, (Instituto Nacional de Estadística, Censo Agropecuario, 2007).

2.3.3 Subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes

Se encuentra situada en el extremo suroeste de la entidad y cubre parte de los municipios de Ahualulco, Mexquitic de Carmona, Villa de Arriaga y en menor porcentaje Salinas. El terreno de esta región está cubierto por suelo típico de zonas áridas, denominado Xerosol háplico; es de colores claros debido al poco contenido de materia orgánica. Se encuentra en llanuras de origen aluvial y coluvial, es profundo y está limitado por tepetate. Este suelo presenta fase lítica en los lomeríos, mesetas y sierras. En esos mismos sistemas de topoformas hay también Feozem háplico, que es suelo oscuro limitado por Duripán, el cual cubre el 4.7% del total de la Subprovincia; y sustenta vegetación de pastizal natural y matorral crasicaule.

Las regiones central, este y noreste se encuentran asentadas sobre el suelo de tipo Feozem háplico, asociado con Xerosol háplico, con textura media y pendientes menores al 8%, este mismo tipo de suelo se extiende hacia el este en su parte media, alcanzando áreas de consideración. Se presentan suelos Durisol (44.6%), Leptosol (18.4%), Phaeozem (16.6%), Cambisol (10.2%), Planosol (6.3%) y Regosol (3.1%), (Instituto Nacional de Estadística, Censo Agropecuario, 2007). En la sección anexos (Tabla 10), se define cada Grupo de Suelo de Referencia (GSR) de la (WRB) Base Referencial Mundial del recurso del suelo, (FAO & UNESCO, 1998).

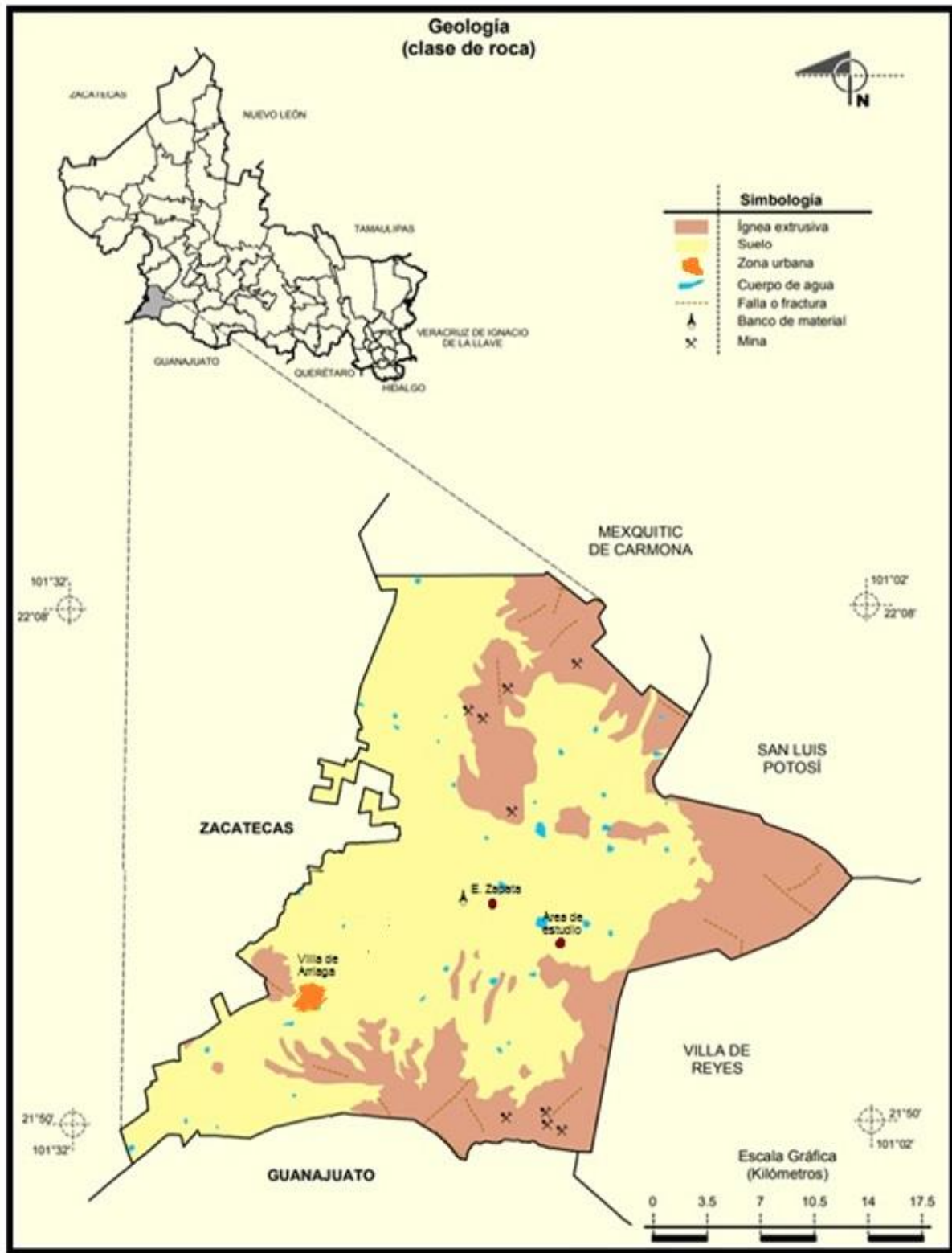


Figura 2. Geología de Villa de Arriaga (de Arriaga, 2005).

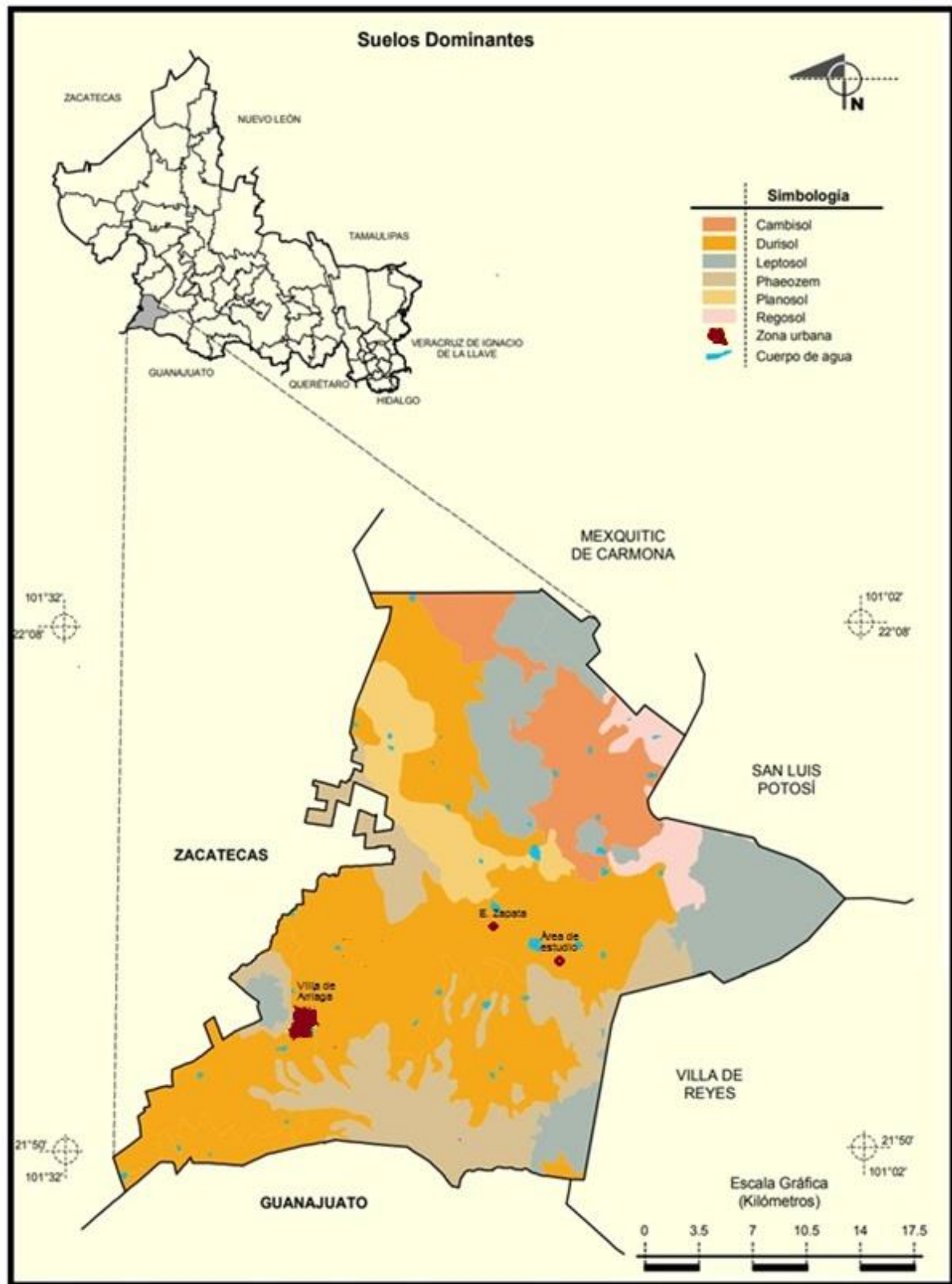


Figura 3. Edafología Villa de Arriaga (de Arriaga, 2005).

CAPITULO 3

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Prospección Geoeléctrica

La exploración geofísica se refiere al uso de los métodos físicos y matemáticos encargados de investigar y definir formaciones geológicas particulares, o cuerpos de interés práctico, aptos para la exploración industrial. Se basan en la estimación de algunas propiedades físicas de los materiales que se encuentran en la corteza terrestre, tales como: conductividad eléctrica, susceptibilidad magnética, densidad, entre otros, a partir de parámetros medibles, destacando entre estos: la fuerza de atracción gravitatoria, la desintegración radiactiva, las corrientes eléctricas espontáneas, la rapidez de las ondas sísmicas así como la resistencia eléctrica de los suelos, etc. Las técnicas geofísicas son útiles cuando existen contrastes bien definidos entre las propiedades de interés que permiten diferenciar y reconocer las formaciones geológicas que se encuentran en profundidad.

Los métodos de prospección eléctrica y/o electromagnética, tienen como fin principal la determinación de la resistividad eléctrica de los materiales o su inverso, la conductividad eléctrica. Una de las técnicas utilizadas más antiguas son las calicatas (o perfilaje) eléctricas (PE) y los sondeos eléctricos verticales (SEV) por su relativa simplicidad de aplicación. Es posible interpretar los datos geofísicos en términos geológicos, geotécnicos o hidrogeológicos y con base en los valores de las mediciones realizadas en campo, mediante de ello, se genera un modelo matemático que define la geometría de las masas de suelo o roca. Los métodos eléctricos o geoeléctricos de superficie estudian el medio geológico a partir de mediciones efectuadas en la superficie del terreno, determinando la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética, de acuerdo con Orellana (1982). A grandes rasgos, el método geoeléctrico se encarga de estudiar la reacción que presentan los materiales del subsuelo al paso de corriente eléctrica, ya sea corriente alterna o corriente continua. La resolución y la profundidad de los métodos varían

dependiendo del método empleado, equipo que se ocupe, así como las condiciones geofísicas-geológicas del área de estudio.

A continuación, figura 4, se muestra la siguiente clasificación de los métodos Geoelectricos:

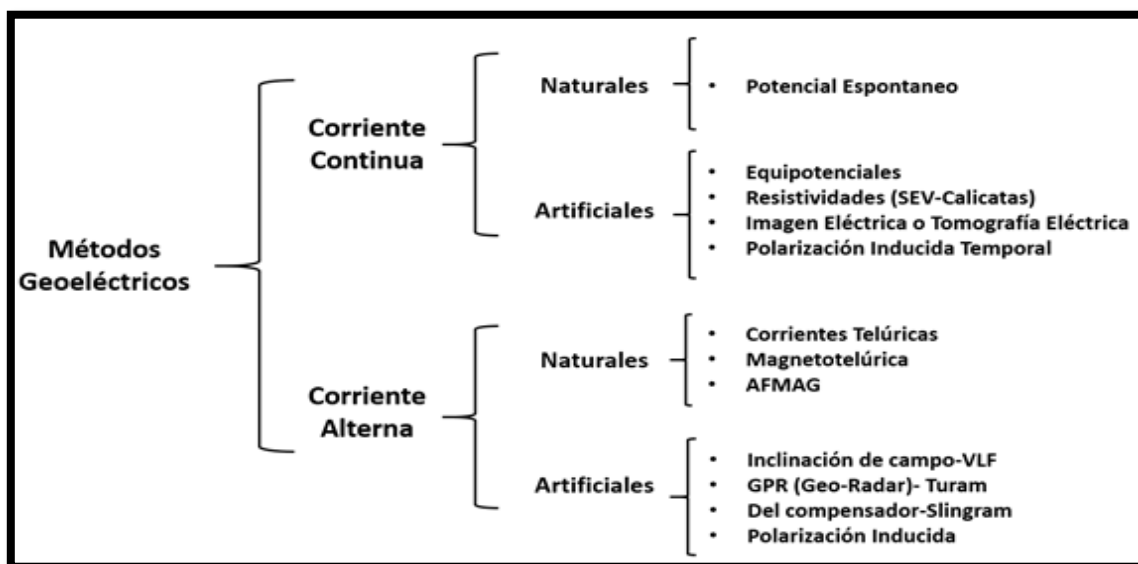


Figura 4. Clasificación de los métodos geoelectricos (Auge, 2008).

3.2 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica de cualquier material se define como la resistencia, en menor o mayor grado al paso de la corriente eléctrica, por unidad de área y de longitud con una intensidad conocida. Se designa con la letra griega rho minúscula (ρ), en unidades de Ohmios por metro (Ohm•m, Auge, 2008).

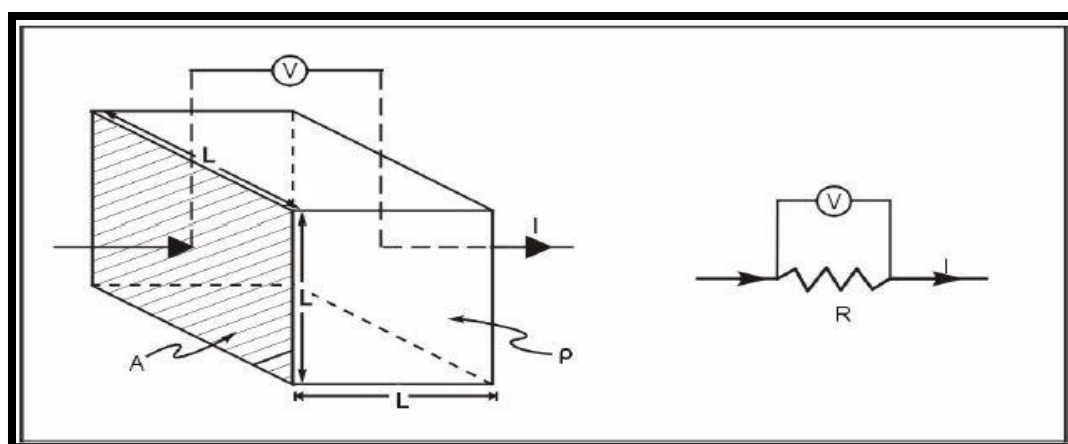


Figura 5. Ley de OHM resistencia de un conductor (Auge, 2008).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.1)$$

Despejando la resistividad

$$\rho = R \frac{L}{A} \quad (3.2)$$

Dónde:

A: Sección transversal de un cilindro solido (m²),

L: Longitud de un cilindro solido (m),

R: Resistencia del material (Ohm),

ρ : Resistividad eléctrica del material contenido en el cilindro sólido [Ohm•m], ($\Omega \cdot m$),

El inverso de la resistividad es la conductividad eléctrica (σ), por lo tanto:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{(R)(A)} \quad (3.3)$$

Su unidad es el Siemens metro (S/m).

Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de la corriente eléctrica. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor, mientras que uno bajo indicara que es un buen conductor. La facilidad del terreno para conducir corriente está determinada fundamentalmente por la composición del material existente, su porosidad, grado de humedad y el contenido de sales del agua en los poros.

La aplicación de los métodos geoelectricos exige un conocimiento básico de las propiedades eléctricas de las rocas, suelos y de los minerales que las constituyen, así como el comportamiento físico de las rocas depende de las propiedades y modo de agregación de sus minerales, de la forma, volumen y relleno (generalmente con agua o aire) de los poros.

Los factores, que determinan la resistividad eléctrica de una roca son los siguientes:

- Porosidad
- Conductividad de los granos minerales

- Composición química del agua, que llena los espacios porosos de la roca, como su salinidad.
- Presión
- saturación
- Temperatura

En el caso de los suelos, es necesario tener en cuenta que la conductividad eléctrica es el resultado de dos componentes; uno, la conductividad electrónica, asociada al movimiento de electrones en los geomateriales por efecto de la excitación de la corriente eléctrica, que es influenciado por la concentración y composición de las sales disueltas, a mayor conductividad eléctrica, mayor es la salinidad presente, por lo tanto, su valor viene determinado por la presencia de iones y su movilidad en una solución. Esto conlleva al fenómeno de la doble capa eléctrica, que considera el contacto entre el sólido y la fase líquida como un condensador plano. Entre el metal (sólido) y el electrólito (la disolución) existe una diferencia de potencial que atrae a los iones de la solución del suelo. Lo cual conduce a la formación de una doble capa eléctrica formada por iones del sólido y los traídos en la solución, (Gómez Burgos & Parra Cubillos, 2015). Y dos, la conductividad electrolítica por efecto de la cantidad y características de los iones presentes en los fluidos intersticiales, que explican la magnitud de los intervalos en los que puede variar la resistividad de un geomaterial en condiciones de campo. El primero de estos componentes explica la baja resistividad de las arcillas si se compara con los limos, arenas y gravas. El segundo explica la variación de la resistividad en función de la humedad, de la porosidad y del contenido de sales de los fluidos intersticiales de los geomateriales.

La cantidad de sales en los suelos depende de la naturaleza de las rocas con las que haya entrado en contacto en su paso por la superficie del terreno o subterránea, afortunadamente todos los minerales tienen poros en porciones variables que suelen ser ocupados total o parcialmente por electrolitos, lo que resulta que las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad variable según el caso. La (Figura 6) muestra los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales. La fisuración y la impregnación en agua salada, etc., pueden extender estos límites (Arias, 2011).

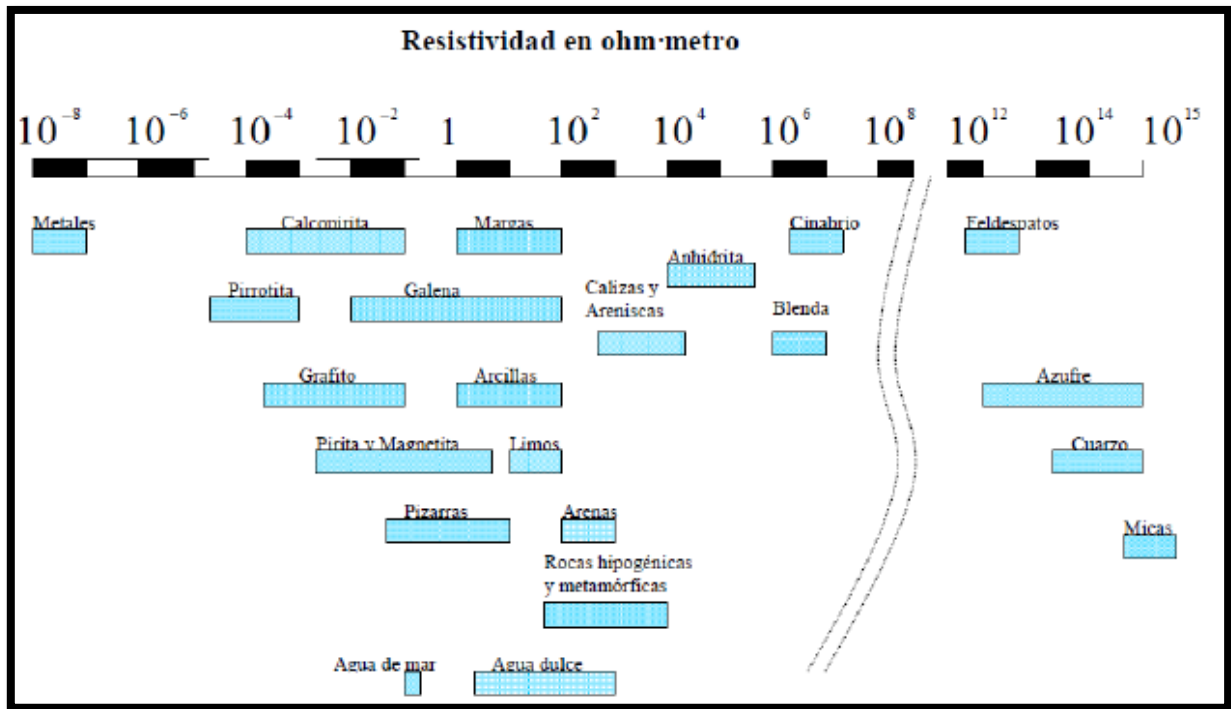


Figura 6. Rango de resistividad de algunos minerales (Arias, 2011).

3.3 Ecuaciones fundamentales

El mecanismo de propagación en la tierra de las ondas electromagnéticas, requieren estar polarizadas verticalmente, debido a que el campo eléctrico en una onda polarizada horizontalmente sería paralelo a la superficie de la tierra y se pondría en corto por la conductividad del suelo, el campo eléctrico variable induce voltajes en la superficie terrestre que hacen circular corrientes muy parecidas a las de una línea de transmisión. Por ello la relación que existe entre el campo magnético y el campo eléctrico, está definido por las ecuaciones de Maxwell, sujetas a variaciones temporales y espaciales. Una manera de entender la propagación de corriente en el subsuelo, es hacer la tierra plana, considerando que la fuente del campo se encuentra lo suficientemente alejada, de manera que el frente de ondas sea plano y solo se propaga en dirección vertical. Dichas ecuaciones se expresan de la siguiente manera (Velasco, 2017):

Ley de Faraday

$$\nabla \times \mathbf{E}(r, t) = - \frac{\partial \mathbf{B}(r, t)}{\partial t} \quad (3.4)$$

Ley de Ampere

$$\nabla \times \mathbf{H}(r, t) = \mathbf{J}(r, t) + \frac{\partial \mathbf{D}(r, t)}{\partial t} \quad (3.5)$$

Ley de Gauss Eléctrica

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(r, t) = q(r, t) \quad (3.6)$$

Ley de Gauss Magnética

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(r, t) = 0 \quad (3.7)$$

Donde:

E: Intensidad de campo eléctrico (V/m)

H: Intensidad de campo magnético (A/m)

D: Vector de desplazamiento eléctrico (C/m²)

B: Vector de inducción magnética (Wb/m² = Tesla)

J: Densidad de corriente (A/m²)

q: Densidad de carga eléctrica (C/m³)

En prospección eléctrica por tratarse de un campo estacionario, se anulan las derivadas temporales, y da como resultado un modelo estático, en el cual los campos y las fuentes no varían en el tiempo y se tiene una distribución de cargas en reposo, (Velasco, 2017).

$$\nabla \times \mathbf{E}(r) = 0 \quad (3.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(r) = \mathbf{J}(r) \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(r) = q(r) \quad (3.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(r) = 0 \quad (3.11)$$

La ecuación (3.8) representa la ley de Faraday y expresa que la relación entre los campos eléctrico y magnético viene dada por la variación del campo magnético con respecto al tiempo y el desplazamiento espacial del campo eléctrico.

La ecuación (3.9), muestra la existencia de un campo magnético asociado al desplazamiento de cargas eléctricas, ya sea por polarización dieléctrica o en forma de corriente eléctrica conocida como la ley de Ampere.

Las siguientes ecuaciones (3.10) expresa la existencia de cargas eléctricas que actúan como fuente de campo eléctrico, mientras que la ecuación (3.11) las líneas de campo magnético son cerradas debido la inexistencia de cargas magnéticas aisladas (Lapazaran, 2004).

La ecuación (3.8) expresa que el campo electrostático es conservativo, y puede describirse por el potencial eléctrico U , es decir:

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (3.12)$$

Mediante las relaciones constitutivas se establece la relación entre los campos y las propiedades del medio, por lo que si el estado del conductor permanece invariable (no cambian las propiedades intrínsecas), existe entonces una relación entre el potencial eléctrico y el flujo de corriente inyectado. Esta relación se denomina Ley de Ohm y muestra que, la densidad de corriente en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo en el mismo punto, y es proporcional a él. El factor de proporcionalidad es la resistividad (ρ) o su inversa la conductividad (σ).

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \mathbf{J} = \frac{1}{\rho} \mathbf{E} \quad (3.13)$$

El fundamento de la prospección eléctrica en corriente continua de fuente artificial consiste en medir el campo eléctrico en el subsuelo generando mediante una corriente eléctrica que se inyecta en el subsuelo, utilizando un generador de corriente. Para ello se ocupan cuatro electrodos enterrados parcialmente en el

terreno, dos de ellos conectados al generador, denominados de corriente (A, B), mientras que los otros dos electrodos denominados (M, N), para medir la diferencia de potencial ΔV mediante un voltímetro entre los electrodos M y N, todo esto con el propósito de calcular el valor de resistividad del subsuelo, (Cantos, 1987).

En la (Figura 7), se me muestra el flujo de corriente que pasará por el electrodo A con una intensidad I_A en el subsuelo y recorrerá el medio, posteriormente saldrá por el electrodo B con una intensidad I_B para volver al generador y cerrar el circuito.

$$I_A + I_B = 0 \quad (3.14)$$

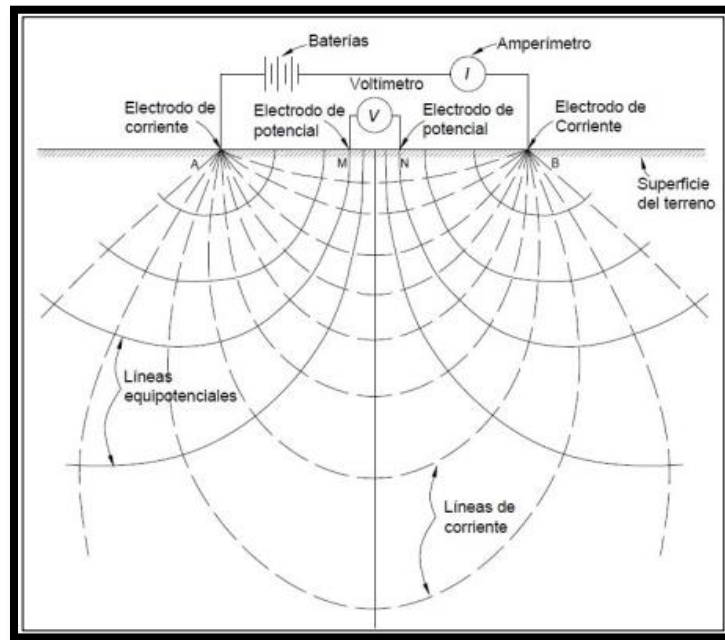


Figura 7. Dispositivo tetraelectrónico (Todd, 1959).

Si se considera una fuente puntual de corriente al electrodo A, una superficie semiesférica en el semiespacio constituye la superficie equipotencial y, por simetría en cualquier punto, la densidad de corriente $\mathbf{J}$ tendrá el mismo valor en dirección radial. Por lo tanto la integral de $\mathbf{J}$ sobre la superficie semiesférica será igual a I por lo que si el radio es r se tendrá la siguiente ecuación:

$$2 \pi r^2 \mathbf{J} = I \quad (3.15)$$

Por lo tanto, se puede escribir la ec. (3.15) cómo:

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.16)$$

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{1\rho}{2\pi r^2} \quad (3.17)$$

El campo $\mathbf{E}$ de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r . la diferencia de potencial de dos puntos cualesquiera entre M, N está dada por la ecuación (3.12)

$$U_N^M = U_M^A - U_N^A = - \int_N^M \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} \quad (3.18)$$

Esta ecuación sirve para las diferentes configuraciones geométricas, dado que el campo es conservativo. Entonces, si r_1 y r_2 son las distancias respectivas de M, N al electrodo, tenemos que:

$$U_N^M = \frac{1\rho}{2\pi} - \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.19)$$

En cambio, si consideramos potenciales absolutos en lugar de diferencia de potencial, habrá de atribuir a un punto el potencial 0.

Por convención se toma como origen de los potenciales un punto situado a distancia infinita de la fuente, donde el potencial absoluto se encuentra en el punto M calculando el límite de la ecuación $r_2 \rightarrow \infty$ es:

$$U_M = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{r_1} \quad (3.20)$$

Como el potencial es una magnitud aditiva, si son varias fuentes, se suman todos los potenciales respectivos, de modo que:

$$U = \frac{\rho}{2\pi} \sum \frac{I_i}{r_i} \quad (3.21)$$

Donde r_i es la distancia de la fuente de índice i al punto considerado, e I_i la intensidad de corriente que entra o sale de él, con su signo correspondiente.

Hasta ahora solo se ha considerado un semiespacio homogéneo e isótropo sin embargo el subsuelo tiene un comportamiento complejo o heterogéneo, por consecuencia no se puede utilizar la ecuación (3.21) sino se buscara una integral que satisfaga la ecuación de Laplace y las condiciones de contorno, definidas por las características de medio, (Orellana, 1982).

$$U_M = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (3.22)$$

De la misma forma se aplica al punto N y se tendrá:

$$U_N = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (3.23)$$

Y entonces la diferencia de potencial entre los puntos M, N será:

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{I \rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (3.24)$$

Al despejar la resistividad ρ , la ecuación queda:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \cdot \frac{\Delta U}{I} = K \frac{\Delta U}{I} \quad (3.25)$$

Donde k es el factor geométrico, constituye un factor de corrección por el arreglo o dispositivo electródico utilizado para las mediciones, de manera que se corrige el efecto de las dimensiones del medio por donde circula la corriente, siendo posible convertir el valor de la resistencia eléctrica del medio finito por donde pasan las líneas de corriente a un valor de resistividad eléctrica característica del medio.

3.3.1 Factor geométrico

El factor geométrico (k), es una relación que representa la distancia de separación entre los electrodos de corriente y potencial con respecto a la distribución espacial de cada punto de atribución. Es decir este factor expresa la proporción que existe entre la propiedad física medida y la relación potencial eléctrico/intensidad de corriente (Milsom, 2003). En el caso más general en la que los cuatro electrodos están dispuestos en una línea recta sobre una superficie plana, se tendrá la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (3.26)$$

Por lo tanto, se cambia la (ρ_a) por (ρ) en virtud de la definición de resistividad aparente, y se sustituyen las distancias, lo que nos da:

$$\rho_a = 2\pi \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \right]^{-1} \frac{\Delta V}{I} \quad (3.27)$$

Para cada dispositivo se tiene diferente factor geométrico (k), resultado de modificar la geometría de sus electrodos, por lo que nos queda:

$$k = 2\pi \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \right]^{-1} \quad (3.28)$$

Tabla 1. Factores geométricos de los diferentes tipos de dispositivos electródicos (Edwards, 1977).

Columna1	Columna2
Nombre de dispositivo electródico	Factor geométrico (k)
Polo-Polo	$2 \pi a$
Polo-Dipolo	$2 \pi n (n+1) a$
Dipolo-Dipolo	$\pi (n) (n+1) (n+2) a$
Schlumberger	$\pi (n) (n+1) a$
Wenner alfa (Wenner)	$2 \pi a$
Wenner beta	$6 \pi a$
Wenner gamma(Enfocado)	$2 \pi a$

Donde:

a = Espacio entre electrodos utilizados en una medida particular.

n = Factor de espaciamiento.

3.4 Resistividad aparente

Si el medio fuera homogéneo e isótropo, la ecuación (3.2), explicada anteriormente, nos daría como resultado la resistividad verdadera del medio. Es decir, si el terreno es uniforme, la resistividad calculada de la ecuación (3.2) debería ser constante e independiente del espaciamiento entre los electrodos (Parasnis, 1997).

Debido a que en el medio existen heterogeneidades, la resistividad varía con respecto a la posición relativa de los electrodos, atribuida a un valor calculado que es condicionado por la geometría y las propiedades físicas del medio.

Para cualquier dispositivo ver (Figura 7), si se conocen las distancias entre los electrodos, se mide con el amperímetro la intensidad de corriente (I) que pasa entre los electrodos (A, B) y también se mide con el voltímetro la diferencia de potencial (ΔV) en los electrodos (M, N), es posible calcular la resistividad aparente (ρ_a) con la siguiente ecuación:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (3.29)$$

Donde:

ρ_a = Resistividad aparente del subsuelo (Ohm•m),

k = Constante del dispositivo geoelectrico (factor geométrico) [m],

ΔV = Voltaje medido (V),

I = Intensidad de corriente medida (A).

La resistividad aparente (ρ_a) no es el promedio de los valores de resistividad obtenidos del subsuelo, ya que no depende de la corriente que se envía, sino que cada valor de resistividad es una medición individual que se asocia al punto de atribución ubicado al centro del dispositivo de electrodos (dependiendo de la geometría del dispositivo) y esta función del espaciamiento de los electrodos y distribución real de la resistividad.

3.5 Fundamentos de Tomografía de Resistividad Eléctrica

El estudio de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), se caracteriza por ser un método de medición multi-electrónico, que se utiliza para modelar en 2D y 3D, a partir de un número elevado de mediciones realizadas en superficie, que permiten obtener resultados fiables en áreas con una geología moderadamente compleja (Griffiths & Barker, 1993).

El método consiste en una línea determinada por la cual se inyecta una corriente eléctrica a través de unos electrodos semienterrados en el terreno: y mediante un

dispositivo receptor se observa la respuesta del subsuelo, obteniendo como resultado datos de resistividad aparente. Este método es mucho muy factible ya que es la combinación de las calicatas eléctricas y los sondeos eléctricos verticales mediante el cual se obtiene una mejora significativa de resolución lateral y vertical; sin duda es uno de los métodos geoelectrónicos más eficaz para estudios someros detallados.

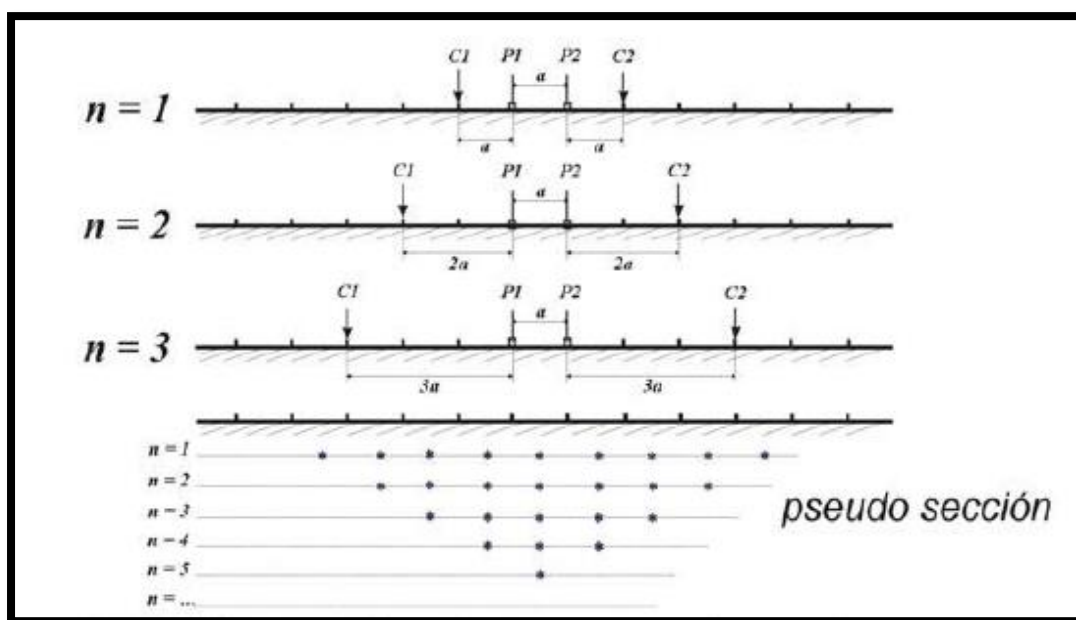


Figura 8. Pseudosección del Dispositivo Wenner-Schlumberger, a =separación entre electrodos, n =número de nivel, $C1$ $C2$ = electrodos de corriente y $P1$ $P2$ =electrodos de potencial (Loke, 2000).

Las mediciones realizadas se repiten variando el espaciamiento entre electrodos. Conforme el espaciamiento aumenta, disminuye el número de mediciones (Griffiths et al., 1990). La cantidad de datos que se obtienen para cada espaciamiento entre electrodos depende del tipo de dispositivo electródico, está relacionado con el factor geométrico, afectado por la separación de electrodos a , y por un factor geométrico n , que determina el nivel de investigación.

La técnica de la Tomografía de Resistividad Eléctrica, emplea los valores de resistividad aparente medidos para obtener imágenes de la resistividad real del subsuelo. A partir de los valores de resistividad aparente se aplica una técnica de inversión para determinar la resistividad verdadera (Loke, 2000).

El objetivo de la inversión es encontrar un modelo de distribución de resistividades verdaderas en el subsuelo, que genere una respuesta similar a los valores de resistividad aparente medidos. Las relaciones matemáticas entre los valores de resistividad aparente medidos y la resistividad verdadera del subsuelo se obtienen a partir de métodos de elementos finitos o diferencias finitas.

3.5.1 Arreglo Wenner

La configuración inicial del arreglo es igual al usado para la obtención de sondeos eléctricos verticales, solo que en este caso se obtendrá una nueva estación o punto de medición del arreglo electródico cada vez que se extienda horizontalmente; la primera de ellas registrará todos los valores de resistividad aparente producto del movimiento lateral al cual le corresponde al “nivel 1”, la segunda estación registrará los valores del “nivel 2”, así sucesivamente. La distancia de los electrodos varía proporcionalmente en cada estación en un factor “na”, esto permitirá que a medida que se incremente “n” la profundidad de la tomografía aumenta.

Constante geométrica:

$$k = 2\pi a$$

Disposición electródica:

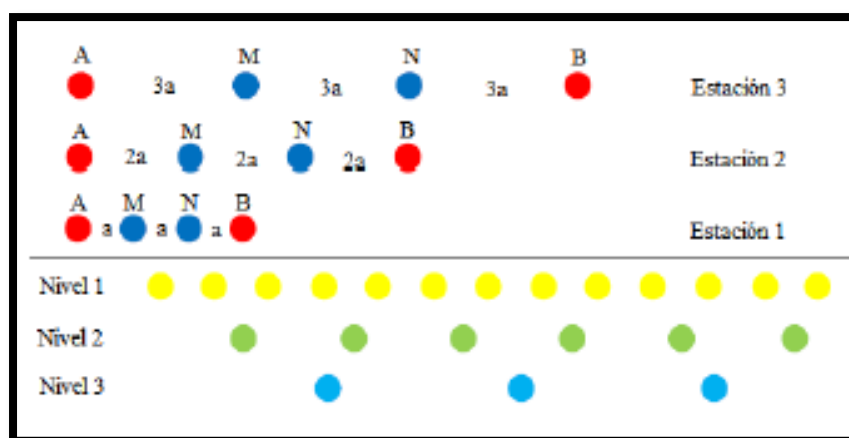


Figura 9. Arreglo Wenner para Tomografía Eléctrica (Engie & Fabio, 2017).

3.5.2 Arreglo Wenner - Schlumberger

Para este arreglo se recreará una posición nueva cada vez que el arreglo se corra horizontalmente; es llamado así por el movimiento lateral que se le aplica al arreglo clásico Schlumberger usado para generar sondeos eléctricos verticales. La primera estación registrará todos los valores producto del movimiento lateral de resistividad aparente correspondiente al “nivel 1” por consiguiente la segunda estación registrará los valores del “nivel 2” y así sucesivamente. La distancia de los electrodos MN será constante para todas las estaciones, mientras que las distancias AM y BN varían en un factor “na” en cada estación; esto permitirá que a medida que se incremente “n” la profundidad de la tomografía aumente.

Constante geométrica:

$$k = \pi n(n + 1)a$$

Disposición electródica:

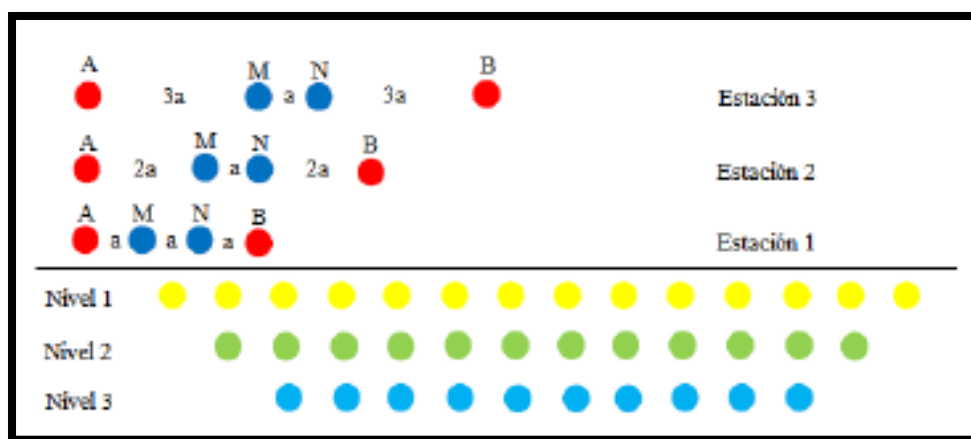


Figura 10. Arreglo Wenner-Schlumberger para Tomografía Eléctrica (Engie & Fabio, 2017).

3.5.3 Dipolo-Dipolo

En este arreglo la distancia entre MN y AB será de “a” en cada una de las estaciones, mientras que la distancia entre BM irá aumentando en cada una de las mismas en un factor de “na”. De manera que la estación “uno” generará la línea diagonal “L1”, la estación “dos” la línea diagonal “L2” y así sucesivamente hasta que AB lleguen al final de la zona de estudio.

Constante geométrica:

$$k = \pi n(n + 1)(n + 2)a$$

Disposición electródica:

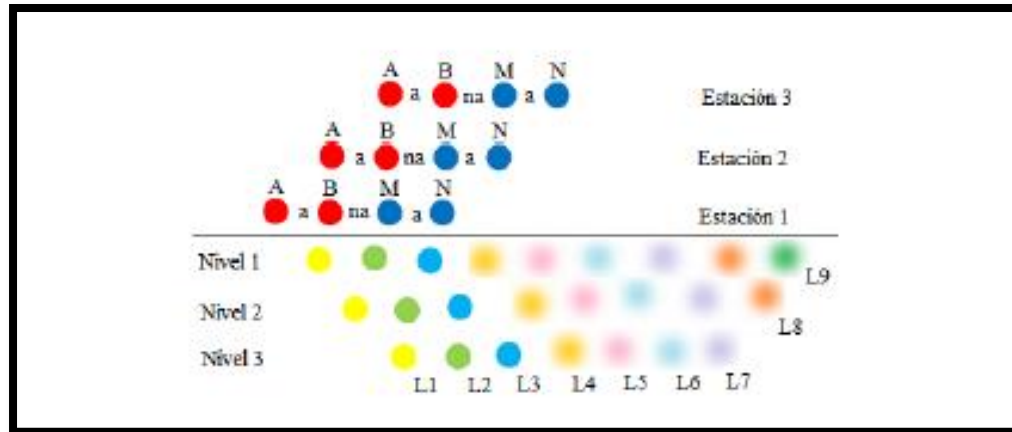


Figura 11. Arreglo Dipolo-Dipolo para Tomografía Eléctrica (Engie & Fabio, 2017).

3.6 Teoría básica de inversión

La teoría de inversión general, está organizada en un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas. Que tiene la finalidad de producir información de las propiedades físicas de un sistema partiendo de datos observados en este sistema.

En la inversión geofísica se trata de encontrar un modelo con una respuesta que sea similar a los valores reales medidos. El modelo es una representación matemática idealizada de una sección de la tierra, el cual tiene un conjunto de parámetros que son cantidades físicas que se pretenden estimar a partir de los datos observados. La respuesta del modelo son los datos sintéticos que se calculan a partir de las relaciones matemáticas, las cuales definen el modelo de un conjunto de parámetros dados. La inversión esencialmente trata de determinar un modelo para el subsuelo cuya respuesta se asemeje a los datos medidos sujetos a ciertas restricciones (Velasco, 2017).

Para este estudio se utilizó el software Res2Dinv, el cual trabaja con la pseudo sección de resistividades como archivo de entrada, luego se genera un modelo en el

cual la sección a invertir se discretiza en una serie de bloques rectangulares cuya distribución y tamaño son generados automáticamente por el programa.

En cada iteración el programa cambia los valores de resistividad de cada bloque utilizando un esquema de inversión de mínimos cuadrados no lineales hasta alcanzar el valor de resistividad apropiado para cada bloque; esto con el fin de hacer coincidir los modelos teóricos observados y calculados como una indicación de fiabilidad del verdadero modelo de resistividad (Perdomo, 2009).

El modelo resultante con un número fijo de capas y espesores, a lo largo del perfil, ofrece una gran ventaja para el posterior procesamiento y favorece la buena visualización de los resultados obtenidos (Loke & Barker, 1996).

El software está diseñado para manejar datos de cualquier matriz de electrodos, o mejor conocidos como arreglos geométricos, (Ej. Wenner, dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger, etc.) (Loke, 2010).

3.7 Calicatas eléctricas

La finalidad de las calicatas eléctricas (CE), es representar la distribución lateral u horizontal de un parámetro físico a lo largo de un perfil, esta característica lo hace adecuado para la detección de contactos verticales por lo que, a diferencia de los SEV, las calicatas eléctricas (CE) se ejecutan manteniendo un distanciamiento constante entre los 4 electrodos. Los arreglos más utilizados para realizar las CE son Wenner y Schlumberger donde se adquiere una sola medición de resistividad aparente (ρ_a) en cada punto de atribución, lo que resulta en una profundidad de estudio más o menos constante Orellana (1982). El método CE destaca por su simplicidad y rápido avance respecto a SEV y TRE.

3.7.1 Calicata Wenner

Este tipo de arreglo, la separación entre los electrodos AM, MN y NB, denominada “a” permanece constante a lo largo de la calicata, ya que el arreglo completo es el que se mueve horizontalmente en cada una de las estaciones o puntos de medición que se desee realizar para adquirir datos de resistividad en sentido horizontal.

Constante geométrica:

$$k = 2\pi a$$

Disposición electródica:

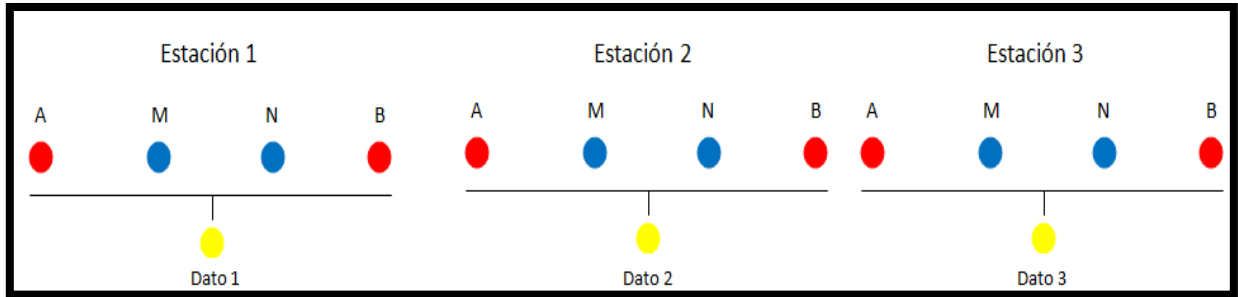


Figura 12. Arreglo Wenner calicata eléctrica (Engie & Fabio, 2017).

3.7.2 Calicata Schlumberger

En este tipo de arreglo la separación entre los electrodos MN denominada “a” y la distancia entre AM y NB denominada “na” permanecen constantes a lo largo de la calicata, ya que el arreglo completo es el que mueve horizontalmente una distancia “a” en cada una de las estaciones que se desee hacer, para adquirir datos horizontales.

Constante geométrica:

$$k = \frac{\pi}{4MN} (AB^2 - MN^2)$$

Disposición electródica:

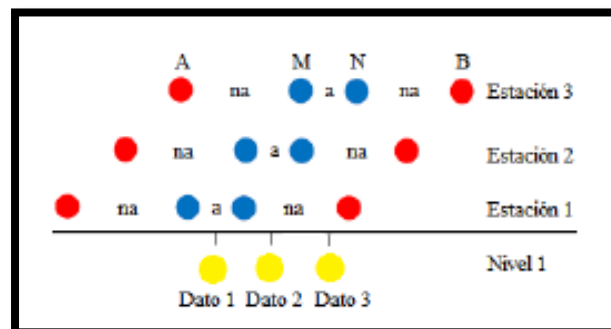


Figura 13. Arreglo Schlumberger calicata eléctrica (Engie & Fabio, 2017).

3.8 Estimación de porcentaje de finos

El fundamento teórico que se mostrará a continuación corresponde al modelo petrofísico de suelo areno-arcilloso, (Rylov & Sudoplatov, 1990b), el modelo desarrollado que consiste en la microestructura de suelo, el cual es tratado como un medio heterogéneo poroso, que incluye componentes de formaciones no consolidadas de granos de arena y partículas de arcilla (Figura 14), resistividad electroquímica de agua libre y el agua en los poros de la formación.

Sin embargo, el modelo teórico de granos sólidos constituye un aislante esqueleto donde sus capilares son vistos como cilindros huecos con diferentes radios, donde la componente de arena contiene un sistema poroso de canales cilíndricos denominados poros de ancho, con radio que van desde los 10^{-3} y 10^{-4} m, que son mucho más grandes que el espesor de la doble capa eléctrica, mientras que los microporos de la componente de arcilla son muy estrechas con un promedio de radios que van desde los 10^{-7} a los 10^{-8} m, que está cerca del espesor de la doble capa eléctrica, que depende completamente de la salinidad del agua y aumenta con la disminución de la concentración de sal. Cerca de la superficie cuando los cambios en la concentración de sal van de los 0,02 a 2 gramos/litro (g/L), el espesor de la capa eléctrica varía en el intervalo de $0.3^{-3} \times 10^{-8}$ m. (Rylov, 1987; A. Rylov & Shevnin, 2002; Rylov & Sudoplatov, 1990).

En este modelo, los poros pueden estar parcial o completamente saturados por salmuera, mientras que las paredes de los capilares tanto anchos y finos se consideran no conductores, que se caracterizan por parámetros electroquímicos como la capacidad de intercambio catiónico. Por lo tanto, las propiedades eléctricas de la mezcla arena-arcilla se definen por las conductividades eficaces de los sistemas capilares y por las interconexiones de estas dos redes de poros (Anexo 1).

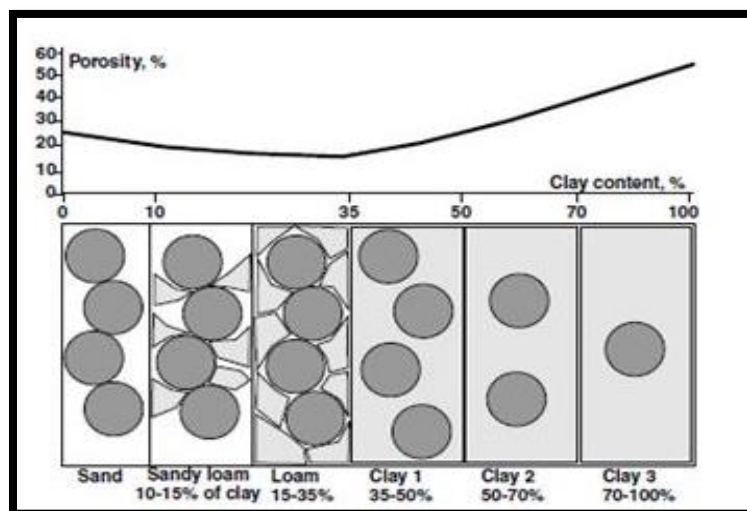


Figura 14. Modelo que representa la relación de la porosidad de suelo para diferentes contenidos de arcilla. (Shevnin, 2007)

En la figura anterior observamos que la curva comienza en una porosidad de la arena al 25% y es mínima cuando el contenido de arcilla es igual a la porosidad de la arena, es decir, la arcilla ha cubierto los poros de la arena, y en seguida se incrementa el valor que representa la porosidad de la arcilla 55%, por lo que es influenciada por la porosidad de la arena como se observa en la parte izquierda de la figura 14, y en la parte derecha por el contenido de arcilla y la porosidad de la misma.

Después de definir las características del modelo teórico, se prosigue a calcular una gráfica del comportamiento de la resistividad de los diferentes suelos, de la mezcla de arcillas y finos con respecto a la salinidad del agua de poro. En la figura 15, se muestra el comportamiento de los suelos para un modelo teórico definido por varios factores, entre los que destaca el radio de poro de la arcilla = 10^{-8} m, el radio de poro de la arena = 10^{-4} m, CIC (capacidad de intercambio catiónico) de la componente arcilla igual a 3 gramos/litro (g/L), también la porosidad de las componentes arcilla y arena de 55 y 25% respectivamente, así como una temperatura de 20°C y una saturación total de suelo (Shevnin et al., 2006).

En el modelo se puede observar en la parte superior figura 15, las curvas teóricas de resistividad contra salinidad de agua, que se encuentra presente en los poros para diferentes contenidos de arcillas en suelos areno-arcillosos. En el modelo existe la curva representativa de arena pura, es decir 100% de arena, 0% de arcilla, y en la

parte inferior la curva que representa la arcilla, es decir, 100% arcilla, y 0% arena. En la gráfica también observamos que para 0% de arcilla (curva de arena pura), la cual es casi recta y es paralela a la curva que representa la resistividad del agua contenida en los poros, donde la arena no muestra ningún efecto de doble capa eléctrica ni de capacidad de intercambio catiónico, siendo su resistividad muy dependiente del agua. Cuyo comportamiento no lineal de las curvas de suelos con arcilla es debido a la influencia de la doble capa eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico, donde la resistividad superficial es cada vez más predominante mientras mayor sea el contenido de arcilla.

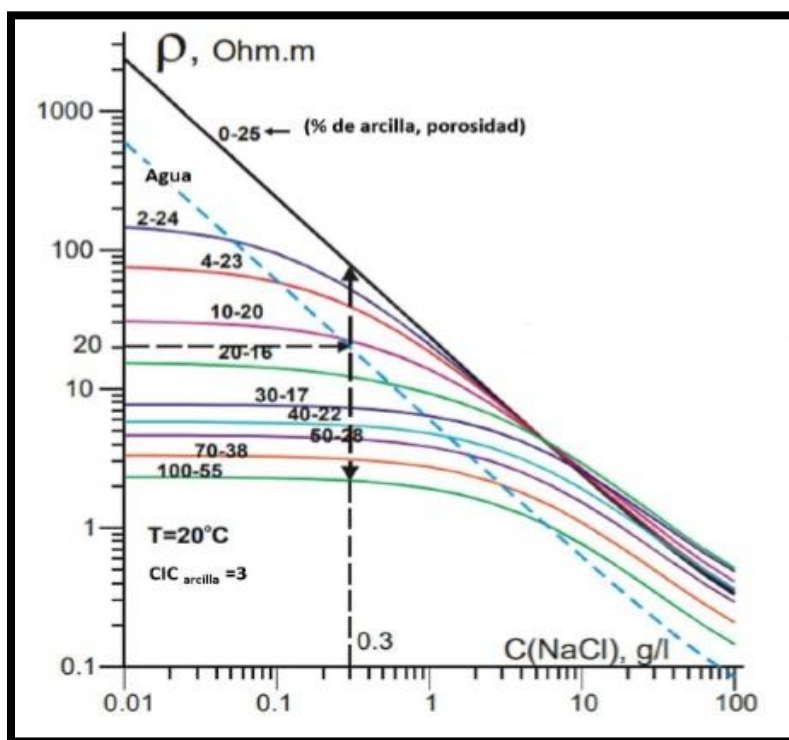


Figura 15. Modelo representativo de las curvas teóricas de resistividad contra salinidad de agua contenida en los poros para diferente contenido de arcilla (Shevvin, 2007).

3.9 Análisis textural de Bouyoucos

El conocimiento de la textura del suelo es importante porque afecta a la fertilidad, determina el consumo y almacenamiento de agua en el suelo. La proporción relativa de arena, limo y arcilla en un suelo puede ser utilizada para determinar un tipo de textura, para el caso de la arcilla, se requiere hasta 24 horas para un cálculo preciso

de partículas sedimentadas. Según (Bouyoucos, 1936) para el caculo de partículas de arena mayores a 0.005 mm. Se necesitan 40 segundos para que se asienten, mientras que las partículas de limos de 0.002 mm de diámetro se necesitan 2 horas. La textura de un suelo es una propiedad que da mucha información sobre el comportamiento de este respecto a los vegetales, la circulación del agua y la erosión, ya que condiciona en gran parte la estructura, la porosidad, la capacidad de intercambio catiónico, lo cual es muy importante en la industria petrolera en el tratamiento químico de la formación y los procesos de extracción del hidrocarburo. Por otro lado, reconocer la heterogeneidad del suelo y detectar la presencia o separar materiales distintos: gravas, arenas, limos y arcillas, es un objetivo que persiguen no solo los ingenieros agrícolas, sino también los petroleros, ya que debido a esta caracterización se pueden determinar propiedades intrínsecas del suelo como lo es la porosidad y permeabilidad del mismo. El método utilizado durante la práctica para la determinación del análisis de distribución del tamaño de las partículas en suelos es el de Bouyoucos, la cual presenta ventajas con respecto al método de la pipeta, ya que no hay necesidad de volver a tratar las muestras en largos periodos de reposo, evitando el pesaje exacto de pequeñas cantidades de sustancias coloidales, de igual forma las muestras de suelo no se someten a un pre tratamiento para eliminar la materia orgánica y sales solubles. (Diario Oficial de la Federación, 2000). Este método se basa en la ley de Stokes, la cual proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en un fluido de peso específico y viscosidad conocida, y el tamaño de las mismas (Delgado-Linares et al., 2013).

3.10 Textura de suelo

Es la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo, en edafología las partículas de un suelo se clasifican en elementos gruesos (tamaño de diámetro superior a 2 mm) y elementos finos (tamaño inferior a 2 mm). Estos últimos son utilizados para definir la textura del suelo (Gisbert Blanquer et al., 2010). En base a la terminología establecida por el (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

de América) por sus siglas en inglés USDA, (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de suelos según la USDA.

CLASIFICACIÓN	DIÁMETRO
Arena muy gruesa	$2\text{ mm} > \varnothing > 1\text{ mm}$
Arena gruesa	$1\text{ mm} > \varnothing > 0.5\text{ mm}$
Arena media	$0.5\text{ mm} > \varnothing > 0.25\text{ mm}$
Arena fina	$0.25\text{ mm} > \varnothing > 0.10\text{ mm}$
Arena muy fina	$0.10\text{ mm} > \varnothing > 0.05\text{ mm}$
Limo	$0.05\text{ mm} > \varnothing > 0.002\text{ mm}$
Arcilla	$\varnothing < 0.002\text{ mm}$

El diagrama textural de la USDA es una herramienta para obtener las clases texturales en función de los porcentajes de arena, limo y arcilla.

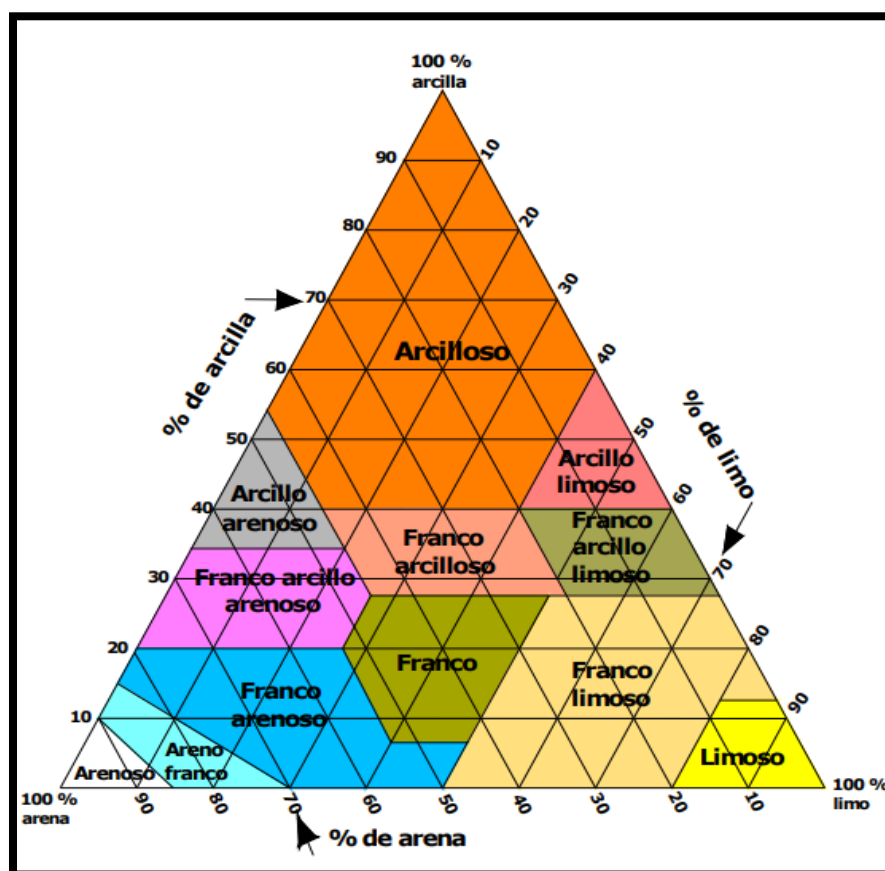


Figura 16. Diagrama textural. (USDA, 1999).

4 METODOLOGÍA

4.1 Toma de muestras en campo para mediciones eléctricas realizadas en laboratorio

En esta primera etapa del proyecto, se realizó una visita de reconocimiento a la zona de estudio para ubicar la parcela de interés (Figura 17).



Figura 17. Vista aérea de la ubicación del área de estudio, ejido E. Zapata, Villa de Arriaga SLP (Google Earth Pro).

Posteriormente a la elección de la parcela de interés, se empleó un día para la toma de muestras de suelo. Ya en el sitio, se utilizó el flexómetro para hacer las mediciones que abarcarían el área total para dicho estudio, en seguida se eligieron seis sitios de manera aleatoria (Figura 18), para la adquisición de seis muestras de suelo, se perforó aproximadamente 30 cm de profundidad con una pala, cuidando siempre que el suelo estuviese compactado y no removido recientemente, el suelo se resguardó en bolsas de plástico, con un peso aproximado de cuatro a cinco kilos, las cuales se identificaron con sus respectivas coordenadas, número y nombre de cada

una de las muestras tomadas del sitio, para su posterior traslado al laboratorio para su análisis.

4.1.1 Material utilizado

- ✓ Plumón
- ✓ Bolsas de plástico
- ✓ Pala
- ✓ GPS
- ✓ Banderitas
- ✓ Flexómetro



Figura 18. Ubicación y toma de muestras de suelo.

4.2 Mediciones de resistividad de suelo (SRM) en laboratorio

4.2.1 Preparación de soluciones

La metodología consiste en preparar cinco garrafas con agua desionizada de aproximadamente 5L cada una, a las cuales se le adhiere salmuera, es decir; agua saturada con sal (NaCl) a diferentes concentraciones (Tabla 3). Estas soluciones fueron preparadas con la ayuda de un multiparametro de mesa, marca Orion Versa

Star Thermo Scientific, cloruro de sodio y agua desionizada, con el objetivo de saturar al 110% los diferentes resistivímetros con contenido de suelo. Los valores de salinidad de las soluciones se muestrearon logarítmicamente equidistantes, para garantizar una adecuada modelación de la curva $\rho(C)$.

Tabla 3. Concentraciones de NaCl.

Nombre del reactivo	SÍMBOLO	Contenido de NaCl en g/L
Cloruro de sodio	NaCl	0.199 g/L
Cloruro de sodio	NaCl	0.61 g/L
Cloruro de sodio	NaCl	2.01 g/L
Cloruro de sodio	NaCl	7.1 g/L
Cloruro de sodio	NaCl	20.6 g/L

4.2.2 Preparación de la muestra y resistivímetros

Después del traslado de suelo a laboratorio, cada muestra se pone a secar a temperatura ambiente sobre charolas de plástico perfectamente identificadas con número y nombre durante dos o tres días según la humedad que el suelo presente, cuidando siempre que la muestra no se contamine. Posterior al secado se retira la materia orgánica visible y se homogeniza diluyendo los terrones grandes, como se muestra en la (Figura 19). En seguida se toma la muestra de suelo y se dividen en pequeñas sub-muestras, estas se agregan a los resistivímetros hasta la marca de calibración. Por último son saturadas con las soluciones de NaCl, que previamente se prepararon a diferentes concentraciones en orden de menor a mayor salinidad.



Figura 19. Muestra de suelo homogenizada y resistivímetro con muestra de suelo.

Los resistivímetros que se utilizaron consisten en un recipiente de plástico compuesto por tres pares de electrodos de los cuales un par (A y B) que sirve para inyectar corriente eléctrica y los otros dos pares de electrodos (M1, N1, M2, N2) son para obtener dos cálculos de diferencia de potencial; estas dos mediciones sirven para obtener un valor promedio de la resistividad eléctrica del suelo. Cada resistivímetro fue calibrado a un cierto nivel de llenado. Para ello se utilizaron diferentes soluciones de resistividad eléctrica conocida, por lo que a cada resistivímetro le corresponde dos valores de calibración k (constante geométrica del arreglo), uno para los electrodos de medición (M1, N1) y otro para los electrodos (M2, N2), siendo posible obtener dos valores de resistividad eléctrica del suelo, cuyo promedio será menos afectado por errores instrumentales o de homogenización de la muestra de suelo.

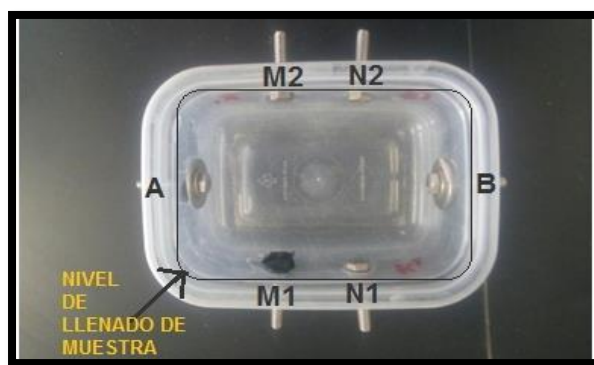


Figura 20. Resistivímetro de suelo Soil-Box.

4.2.3 Realización de mediciones eléctricas

4.2.4 Material y equipo

- ❖ Termómetro.
- ❖ Medidor de puesta tierra o “terrimeter Saturn Geo LEM”.
- ❖ 4 cables (2 para inyectar corriente A, B y 2 cables para medir diferencia de potencial M, N).
- ❖ Espátula.
- ❖ 5 resistivímetros (soil-box) para mediciones eléctricas de suelo.
- ❖ Vaso de precipitado de 50ml.

Para realizar las mediciones, se coloca primero cinco porciones iguales de un mismo suelo en cinco resistivímetros hasta el nivel de llenado como se observa en la (Figura 19), aproximadamente 250 a 300 gramos de suelo le corresponde a cada uno. Con las soluciones de NaCl, previamente preparadas, se saturan los resistivímetros con suelo al 110% como se muestra en la (Figura 21). Cada resistivímetro le corresponde una solución y un número, por ello es de suma importancia tener cuidado de no equivocarse al momento de saturar cada muestra, cabe mencionar que después del proceso antes descrito es necesario esperar 120 minutos para que los procesos físico-químicos que ocurren entre el suelo y las diferentes salinidades se estabilicen.



Figura 21. Resistivímetros con muestra, saturados de solución NaCl.

Pasado ese tiempo se retirara el 10% de agua sobrante que hay en los resistivímetros para proseguir con las mediciones, para esto se ocupó el equipo de resistividad (Terrimeter Saturn Geo LEM), (Figura 22), es el encargado de proporcionar el voltaje y la corriente que han de ser introducidos al subsuelo, cuenta con medidores que proporciona el valor de las magnitudes de corriente introducida en el subsuelo, y de la diferencia de potencial medida en el mismo, para ello se utilizó el equipo en posición de cuatro polos (A, M, N, B) a través de ellos se inyectó una corriente (I) por medio de los electrodos (A y B), mientras que con los electrodos (M, N), se midió la diferencia de potencial (ΔU).

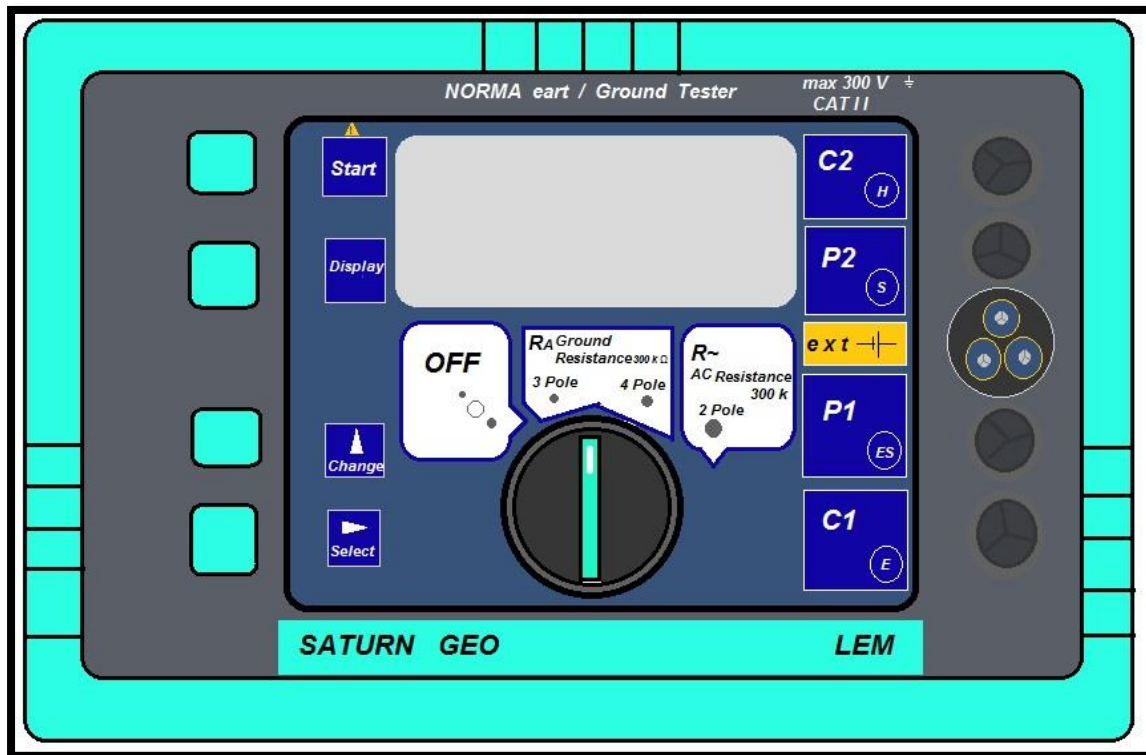


Figura 22. Medidor de puesta tierra o “terrimeter Saturn Geo LEM”, (elaboración propia).

El equipo de medición arroja directamente el valor de resistencia eléctrica (R, Ohm) como el cociente entre la diferencia de potencial (ΔU) y la intensidad de corriente (I), ($\Delta U/I$), y un valor de $\rho(C)$ para cada par de electrodos MN, (Figura 24). Dichos valores de resistividad fueron corregidos a una temperatura de referencia. Para cada par de electrodos $M_1 N_1$ del resistivímetro 1, el valor de resistividad corregido a 20°C, se calculó mediante la expresión:

$$\rho_{20} = \rho (1 + \alpha (T_M - 20^\circ\text{C})) \quad (3.42)$$

Donde:

ρ_{20} = Resistividad corregida a 20°C

ρ = Resistividad leída (Ohm m)

T_M = Temperatura medida (°C)

T_0 = Temperatura de referencia igual a 20°C

α = Coeficiente de temperatura igual a 0.0177, 1 / ° C (Beklemishev, 1963).

Para el resistímetro 1, ($M_1 N_1$ y $M_2 N_2$), se obtuvo 2 valores de resistividad (ρ), estos valores se corrigen por temperatura con la ecuación (3.42), para posteriormente promediarlos y obtener un valor de $\rho_1 (C_1)$. Este proceso se repitió para cada resistímetro, de los cuales se obtuvieron cinco valores de $\rho_{1-5} (C_{1-5})$, mismos que serán utilizados en el proceso de modelación petrofísica. En seguida se tomó la temperatura con el termómetro de cada una de las muestras antes de las mediciones con el equipo, (Figura 23). El resultado final de las mediciones es una curva de resistividad eléctrica en función de la salinidad de agua de poro $\rho(C)$, que después será utilizada en el proceso de interpretación para la obtención de parámetros petrofísicos del suelo, especialmente contenido de finos (Delgado Rodríguez, 2012).

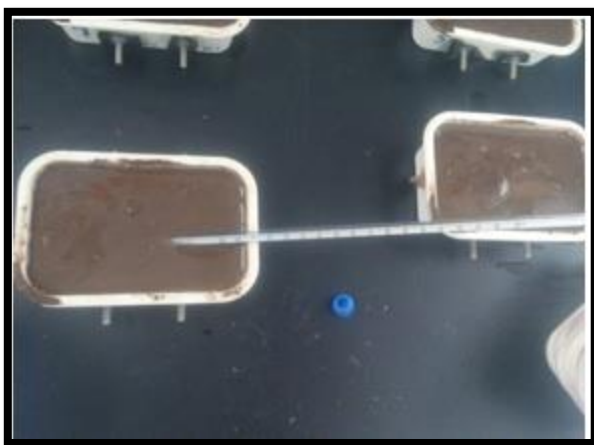


Figura 23. Toma de temperatura de la muestra de suelo

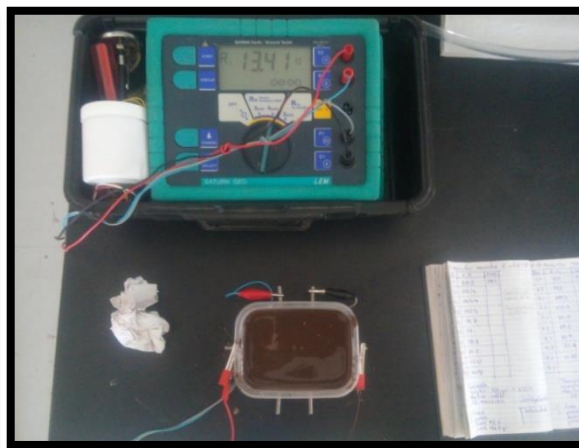


Figura 24. Mediciones eléctricas de las muestras.

Las mediciones correspondientes arrojaron los siguientes resultados (Tabla 4).

Tabla 4. Mediciones eléctricas de suelos en laboratorio.

Muestra Base	Resistencia $R (\Omega)$	Corriente I (mA)	Temp. ($^{\circ}C$)	Constante geométrica $K(m)$
11.1	445	16.3	22	0.07955
11.2	452	16.15	22	0.0765
12.1	304	17.7	22	0.06625
12.2	327	17.7	22	0.06175
13.1	186	20.39	22	0.04825
13.2	180	20.59	22	0.04895
14.1	71.7	35.28	22	0.04755

14.2	67.6	34.75	22	0.0494
15.1	26.51	90.6	22	0.049615
15.2	26.51	90.7	22	0.04875
Horizonte 2.1(A)	Resistencia R (Ω)	Corriente I (mA)	Temp. ($^{\circ}$C)	Constante geométrica K(m)
11.1	339	16.3	19	0.07955
11.2	351	16.15	19	0.0765
12.1	253.4	17.7	19	0.06625
12.2	273.9	17.7	19	0.06175
13.1	162.2	20.39	19	0.04825
13.2	153.9	20.59	19	0.04895
14.1	61.4	35.28	19	0.04755
14.2	59.1	34.75	19	0.0494
15.1	23.73	90.6	19	0.049615
15.2	24.01	90.7	19	0.04875
zapata 1	Resistencia R (Ω)	Corriente I (mA)	Temp. ($^{\circ}$C)	Constante geométrica (Km)
1.1	466	16.3	25	0.0715
1.2	442	16.15	25	0.075
2.1	282	17.7	25	0.06505
2.2	290	17.7	25	0.0622
3.1	178.3	20.39	25	0.05135
3.2	187.1	20.59	25	0.0496
4.1	62	35.28	25	0.0518
4.2	65.6	34.75	25	0.04925
5.1	23.12	90.6	25	0.04985
5.2	21.87	90.7	25	0.05115
zapata 2	Resistencia R (Ω)	Corriente I (mA)	Temp. ($^{\circ}$C)	Constante geométrica K(m)
11.1	535	16.3	25	0.07955
11.2	567	16.15	25	0.0765
12.1	313	17.7	25	0.06625
12.2	341	17.7	25	0.06175
13.1	216	20.39	25	0.04825
13.2	216.7	20.59	25	0.04895
14.1	75.1	35.28	25	0.04755
14.2	72.9	34.75	25	0.0494
15.1	25.21	90.6	25	0.049615
15.2	25.95	90.7	25	0.04875
zapata 3	Resistencia R (Ω)	Corriente I (mA)	Temp. ($^{\circ}$C)	Constante geométrica K(m)
1.1	654	16.3	24	0.0715
1.2	619	16.15	24	0.075
2.1	325	17.7	24	0.06505
2.2	335	17.7	24	0.0622

3.1	179.2	20.39	24	0.05135
3.2	184.2	20.59	24	0.0496
4.1	64.2	35.28	24	0.0518
4.2	68	34.75	24	0.04925
5.1	24.77	90.6	24	0.04985
5.2	23.33	90.7	24	0.05115
zapata 4	Resistencia R (Ω)	Corriente I (mA)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Constante geométrica K (m)
11.1	544	16.3	24	0.07955
11.2	496	16.15	24	0.0765
12.1	331	17.7	24	0.06625
12.2	356	17.7	24	0.06175
13.1	202.1	20.39	24	0.04825
13.2	198	20.59	24	0.04895
14.1	69.5	35.28	24	0.04755
14.2	68	34.75	24	0.0494
15.1	24.44	90.6	24	0.049615
15.2	24.7	90.7	24	0.04875

4.3 Procesamiento de mediciones eléctricas de laboratorio, estimación de porcentaje de finos algoritmo Ryjov.

Después de realizar las mediciones con el equipo Saturn, los resultados obtenidos se plasmaron en la (Tabla 11), en seguida, se prosigue a convertir los datos de resistencia (R) en resistividad (ρ), después se realiza el ajuste por temperatura de la resistividad (ρ), de cada par de mediciones obtenidas de los resistivímetros, conocida como resistividad corregida (rho- corr), como se muestra en la (Tabla 11) apartado anexo 1, en seguida se hace un promedio para obtener la resistividad promedio (rho-prom), la cual será utilizada en el programa PetroWin.

Posteriormente se crea un block de notas para cada una de las muestras de suelo, que será el archivo de entrada al software PetroWin, en la cual se muestran el orden de los datos del archivo EXP., donde la columna a) se colocan la diferentes salinidades que se utilizaron en la saturación de la muestra de suelo, posteriormente en la columna b) se colocan los valores de resistividad, corregidos por temperatura, tal cual se indica en la (Figura 25).

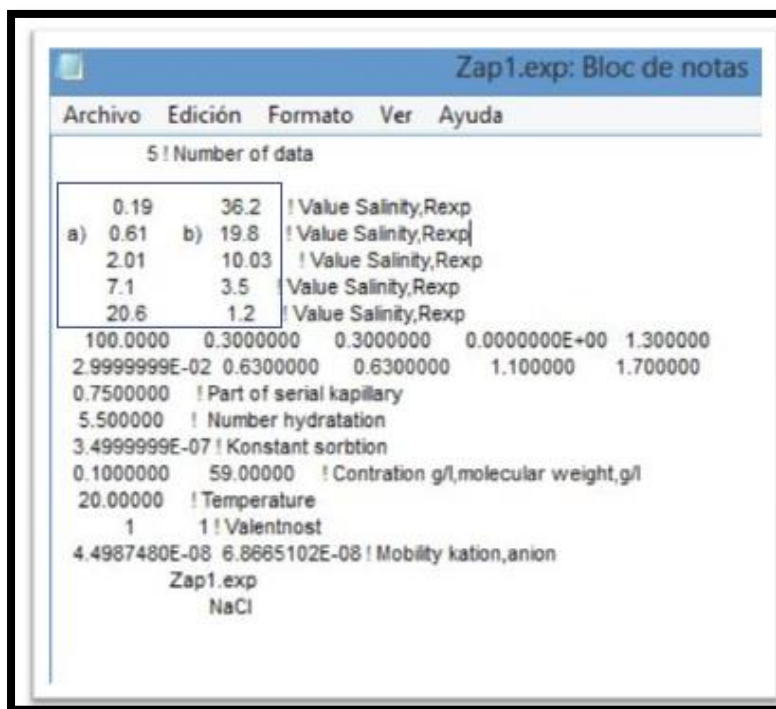


Figura 25. Formato base EXP. (a) Valores de salinidad, (b) valores de resistividad, para procesamiento PetroWin.

4.4 Determinación de la salinidad de suelo

Método AS-16 (Método para la obtención del extracto de saturación por filtración con vacío de la pasta saturada de suelo). El término “extracto de saturación” se usa para designar al extracto acuoso que se obtiene por filtración al vacío de una pasta de suelo saturado con agua destilada. Por otra parte, el término “sales solubles del suelo” que se usa en este método es para referirnos a constituyentes inorgánicos del suelo, que son solubles en agua. Por lo tanto el extracto de saturación es una solución acuosa importante porque muchas propiedades del suelo como la composición de las sales solubles y la conductividad eléctrica del extracto de saturación están relacionadas con la respuesta de los cultivos a la salinidad, (Diario Oficial de la Federación, 2000).

4.4.1 Reactivos

- ❖ Agua destilada
- ❖ Solución de haxametafosfato de sodio (NaPO_3)₆ al 0.1%(P/V). Disolver 0.1 g de haxametafosfato de sodio en agua y aforar a 100 ml.

4.4.2 Material y equipo

- ❖ Embudo buchner
- ❖ Línea de vacío
- ❖ Bomba de succión
- ❖ Tapón de hule monohoradado
- ❖ Papel filtro Whatman No. 42 o su equivalente
- ❖ Matraz kitazato
- ❖ Tubo de plástico
- ❖ Tubos de ensayo
- ❖ Tamiz de 2mm

4.4.3 Preparación de la pasta de suelo saturado

Se realiza mediante el método AS-01 (Diario Oficial de la Federación, 2000).

- ❖ Tamizar mediante malla de 2 mm y pesar 150 a 200 g de suelo.
- ❖ Colocar agua destilada y mezclar con una espátula hasta que la luz se refleje en ella y hasta que tienda a unirse la mezcla al ser cortada con la espátula.

4.4.4 Procedimiento para obtener el extracto

- ❖ Colocar el filtro Whatman No. 42 en el fondo de un embudo Buchner.
- ❖ Ajustar el tapón de hule monohoradado al embudo Buchner.
- ❖ Conectar el extracto de saturación mediante un tubo de ensaye colocándolo en el interior del matraz kitazato.
- ❖ Instalar el embudo con su tapón sobre el matraz kitazato de forma que el vástago del embudo quede alineado con la boca del tubo de ensayo que se encuentra en el interior del matraz.
- ❖ Mediante un tubo de plástico conectar el matraz kitazato con una línea de vacío.
- ❖ Conectar a la línea de vacío un dispositivo que contenga gel de sílica entre dicha línea y la bomba de succión para prevenir la condensación de humedad en la bomba.

- ❖ Preparar una pasta de suelo saturado y colocarla en el matraz kitazato para la extracción de la solución.
- ❖ Transferir la pasta al embudo Buchner y activar la bomba de vacío, (Figura 29).
- ❖ Finalmente se realiza la medición a partir del multiparametro de mesa.



Figura 26. Procedimiento para la obtención de salinidad, mediante el extracto de saturación (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

4.4.5 Pretratamiento del extracto de saturación

Antes de guardar el extracto de saturación se debe agregar una gota de solución de hexametáfosfato de sodio por cada 25 ml de extracto. Esto sirve para evitar la precipitación del carbonato de calcio en el extracto durante el reposo.

Si los extractos no se van analizar inmediatamente se conservan a 4°C hasta que sean analizados.

4.5 Técnica de Bouyoucos

Para esta técnica es necesario comenzar con tamizar las muestras de suelo, luego se hace el pre-tratamiento para eliminar la materia orgánica, así como las respectivas mediciones para la distribución de partículas, las cuales se utilizará para hacer los cálculos de porcentajes de arcilla, limo y arena de acuerdo a la norma, (Diario Oficial de la Federación, 2000).

4.5.1 Material y equipo a utilizar

- ❖ Hidrómetro de Bouyoucos con escala de 0-60.
- ❖ Probetas de 1000 ml.
- ❖ Cilindro de Bouyoucos.
- ❖ Termómetro de -10 a 110°C.
- ❖ Agitador de mano.
- ❖ Horno.
- ❖ Agitador con motor para dispersión.

4.5.2 Reactivos

- ❖ Peróxido de hidrogeno al 30%.
- ❖ Oxalato de sodio saturado. Disolver 30 g de oxalato de sodio en 1 litro de agua.
- ❖ Metasilicato de sodio con 36 g L de lectura con el hidrómetro. Disolver 50 g de metasilicato de sodio en 1 litro de agua ajustar la solución hasta que se obtenga la lectura de 36 con el hidrómetro.
- ❖ Hexametafostato de sodio (calcón). Disolver 50 g de $(\text{Na}_3\text{PO}_3)_6$ en agua destilada y aflorar a un litro.
- ❖ Alcohol etílico.

4.5.3 Cálculos

Después de tomar las lecturas, estas se deben corregir agregando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5°C, restando la misma cantidad por cada grado abajo de dicha temperatura, (Tabla 5). La lectura de los 40 segundos multiplicada por 2 es igual al porcentaje de arcilla más limo. Restando de 100 se obtiene el porcentaje de arena. La lectura obtenida a dos horas multiplicadas por 2 es igual al porcentaje de arcilla. El porcentaje de limo se obtiene por diferencia, cuando se usan 100 g no debe multiplicarse por 2 ya que el hidrómetro esta calibrado en porcentajes considerando 100 g de suelo. Con los porcentajes de limo, arena y arcilla se determinada la textura correspondiente con el triángulo de texturas.

Tabla 5. Corrección por temperatura.

Temp °C	Corrección	Temp °C	Corrección
15	-1.62	21.5	0.18
15.5	-1.44	22	0.9
16	-1.26	22.5	1.08
16.5	-1.08	23	1.26
17	-0.9	23.5	1.44
17.5	-0.72	24	1.62
18	-0.054	24.5	1.8
18.5	-0.36	25	1.98
19	-0.18	25.5	2.15
19.5	0	26	2.34
20	0.18	26.5	2.52
20.5	0.36	27	2.7
21	0.54	27.5	2.858

4.5.4 Pre-tratamiento de las muestras de suelo

1. Pesar 60 g de suelo de textura fina o 120 g de suelo de textura gruesa en un vaso de precipitados de 500 ml, agregar 40 ml de peróxido de hidrogeno.
2. Poner a evaporar hasta sequedad en el horno a una temperatura no mayor a 80°C.
3. Agregar otros 40 ml y observar la reacción del suelo. Evaporar nuevamente a sequedad. Este proceso se repite hasta que no haya efervescencia de agua oxigenada, este efecto sucede debido a la presencia de materia orgánica.
4. Regularmente para esta cantidad de suelo es suficiente con dos aplicaciones de peróxido de hidrogeno para la mayoría de suelos.



Figura 27. Pre-tratamiento muestras de suelo.

4.5.5 Determinación de textura de muestras de suelo

1. Después de eliminar la materia orgánica y llevar a sequedad la muestra, se debe pesar 50 g de suelo de textura arcillosa o 100 g de suelo de textura arenosa y ponerlos en un vaso de precipitados de 250 ml. En seguida se le agrega agua hasta cubrir la superficie por lo menos 2 cm arriba de la muestra, a la cual se le adiciona 5 ml de haxametafosfato de sodio y 5 ml de mateasilicato de sodio y se deja reposar durante 15 minutos. Si el suelo tiene mucha arcilla puede prolongarse hasta media hora.
2. Después se pasan las muestras de los vasos de precipitado a las copas del agitador mecánico, traspasando todo el material con la ayuda de una piseta. Posteriormente se activan los agitadores para dispersar la muestra durante 5 minutos. Al finalizar el tiempo de agitación, se pasa el contenido a una probeta de 1000 ml o al cilindro de Bouyucos enjuagando la copa con ayuda de la piseta.
3. En seguida se le agrega agua destilada hasta completar un litro con el hidrómetro dentro de la suspensión en el caso de la probeta, si se utiliza el cilindro de Bouyoucos se lleva la marca inferior (1113 ml) con el hidrómetro dentro de la suspensión. Luego se retira el hidrómetro y se suspende el suelo con un agitador de mano operando durante un minuto.
4. Tomar lecturas del hidrómetro a los 40 segundos y después de 2 horas de reposo terminada la dispersión con el agitador de mano.
5. Para hacer una lectura, se necesita colocar el hidrómetro dentro de la probeta 20 segundos antes del momento de la terminación, cuidando en no alterar la suspensión. Después de hacer la lectura, se lava el hidrómetro, se seca y se toma la temperatura. Si por alguna razón al hacer la lectura se acumula espuma alrededor del hidrómetro, se agrega unas gotas de alcohol etílico, para eliminarlas y se observe correctamente la lectura.



Figura 28. Determinación de texturas de muestras de suelo.

4.5.6 Diagrama de textura del suelo

El diagrama textural es un diagrama ternario, en el que a cada lado de éste, se sitúa cada una de las fracciones cuyo valor cero corresponde al 100 de la anterior y su 100 con el cero de la siguiente, siempre el movimiento en dirección de las agujas del reloj. Cada muestra de suelo viene definida por un punto del interior del triángulo, este punto se obtiene al hacer intersectar dos valores de porcentaje de la fracción de partículas (Ej. Arcilla y limo). La intersección de dichos puntos, se obtiene al trazar una recta, desde una fracción textural a la otra fracción, en función de los porcentajes (Figura 28).

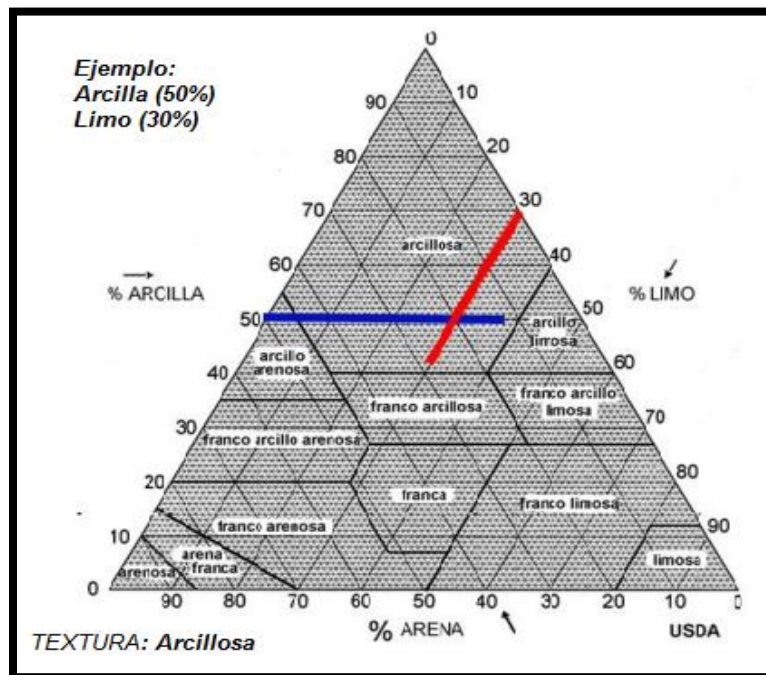


Figura 29. Ejemplo determinación del tipo de textura.

4.6 Tomografía de Resistividad Eléctrica en campo

En esta etapa del proyecto, para las mediciones de resistividad eléctrica en campo, se ocupó el equipo “terrimeter Saturn Geo LEM” descrito anteriormente en este documento. El tendido abarcó 37.8 metros de largo con dirección SW-NE (línea roja, Figura 30), paralelo y separado a 5 m al norte de un canal que permitía observar el perfil del suelo. Se realizaron 64 puntos de atribución de TRE, en un intervalo de 0.6 m con arreglo Wenner-Schlumberger (Figura 31), con electrodos equiespaciados a 0.2 m y abertura máxima $AB/2 = 2.1$ m garantizando una alta resolución para una profundidad de estudio aproximada de 1 m. Los datos adquiridos en campo se encuentran en el apartado (anexo 2).



Figura 30. Ubicación y adquisición de datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE).

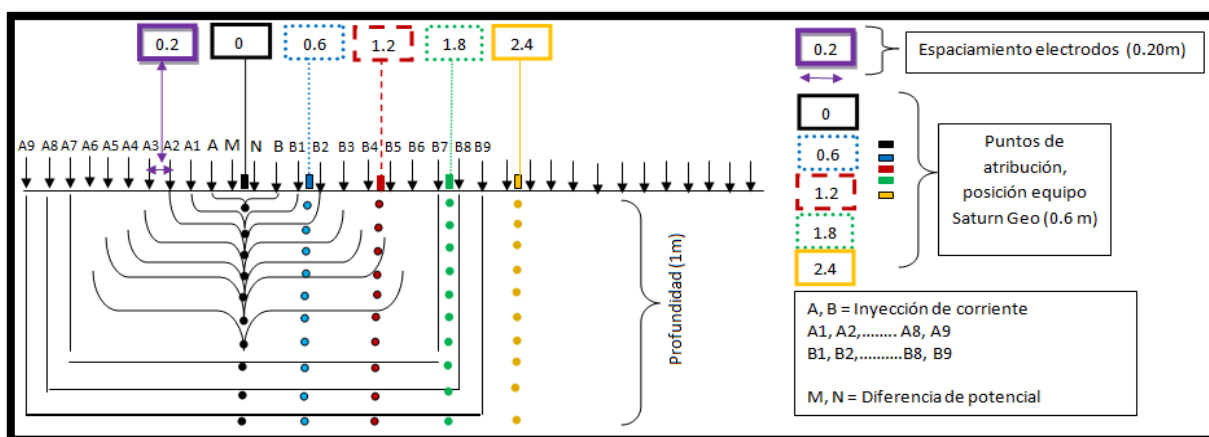


Figura 31. Esquema de adquisición de datos TRE, arreglo Wenner-Schlumberger.

4.7 Procesamiento Tomografía de Resistividad Eléctrica y sección de finos

Después de la adquisición de los datos de campo mostrados en el apartado (anexo 2), se prosigue a realizar el archivo de entrada al software Res2dinv, que se utilizará para la inversión de datos y obtener una imagen 2D de la resistividad del suelo. Para ello se genera un block de notas el cual contendrá el nombre del archivo, el espaciamiento de los electrodos, el tipo de arreglo utilizado, el número de mediciones por cada punto de atribución y la resistividad aparente medida en campo. Posteriormente, se realiza la inversión en el software Res2dinv (Figura 32), dando como resultado tres secciones; la primera se refiere a la sección de valores de resistividad medidos en campo, mientras que la segunda, es la sección de valores de resistividad aparente calculados como respuesta del modelo de resistividad determinado (modelo directo); la similitud entre estas dos secciones determina el % de error de ajuste y por lo tanto la confiabilidad del modelo de inversión resultante. La tercera sección, muestra el modelo en 2D de resistividad verdadera, siendo el resultado principal del proceso de inversión (Figura 32). La sección de resistividades verdaderas fue exportada a Surfer 12 Powerful Contouring, Gridding & 3D Surface Mapping System, para una mejor visualización (Figura 40).

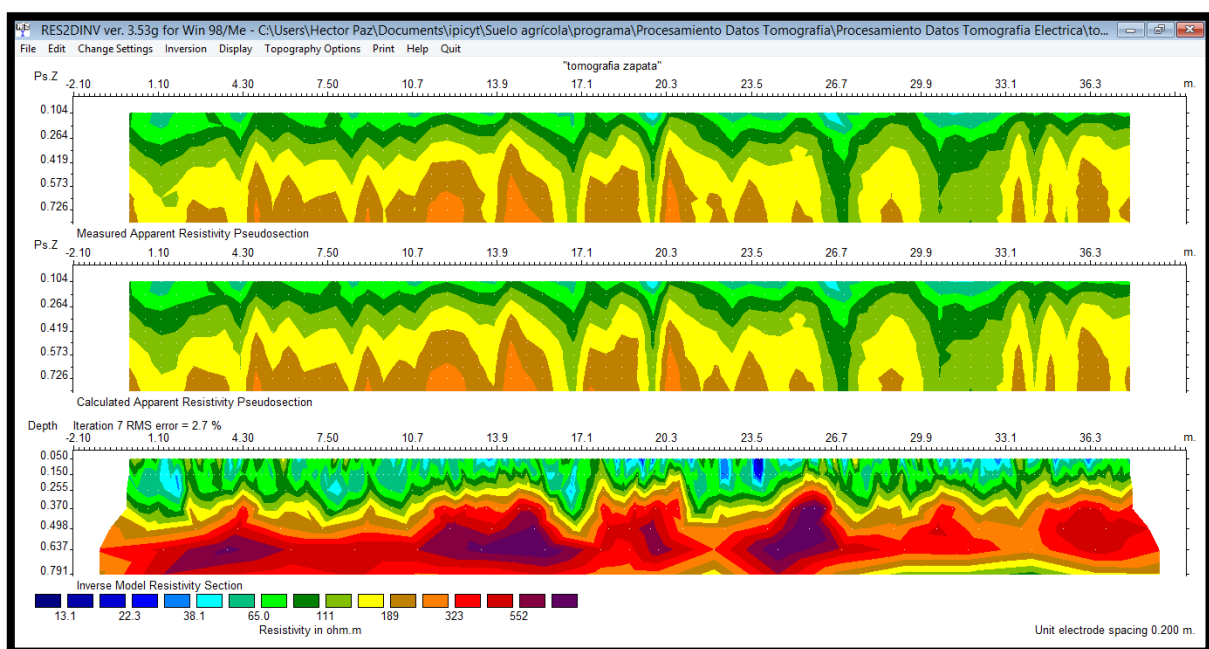


Figura 32. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Secciones de valores de resistividad aparente medida en campo, de valores calculados de resistividad aparente y de la sección o modelo 2D obtenidos en el programa, Res2Dinv.

4.8 Calicatas Eléctricas

El método CE se aplicó en una red de 25 x 25 m, dando un total de 161 mediciones georeferenciadas con la ayuda de GPS portátil, distribuidas en 13 perfiles con dirección N-S, y S-N, (Figura 33). El equipo utilizado para la lectura de las resistividades del suelo fue el Terrimeter Saturn Geo LEM. El tipo de arreglo que se empleó, fue el arreglo Wenner con una separación entre electrodos AMNB de 0.50 m, lo que significa una $k = \pi = 3.14159$, alcanzando una profundidad de estudio aproximada de 0.37 m. La aplicación del método de CE es más rápida que el método de la TRE; sin embargo, CE sólo proporciona valores de resistividad aparente (ρ_a). Ahora consideremos que el valor de ρ_a obtenido por CE para una profundidad de estudio de 0.37 m es similar al valor de resistividad interpretado (ρ) obtenido por la TRE para una capa superficial de espesor igual o superior a 0.5 m (suelo) en el mismo punto. Por lo que tomando en cuenta los espesores del suelo superior a 0.5 m observados en el canal, es válido afirmar que los valores de resistividad aparente ρ_a adquiridos por el método de CE para una profundidad de estudio estimada de 0.37 m son muy similares a los valores de ρ del suelo agrícola. El levantamiento geoeléctrico fue realizado en conjunto con mediciones de humedad del suelo in situ, cuyo procedimiento se explica en el epígrafe siguiente. Ejemplo de adquisición de datos y determinación de los valores de ρ_a se muestran en el (anexo 4).

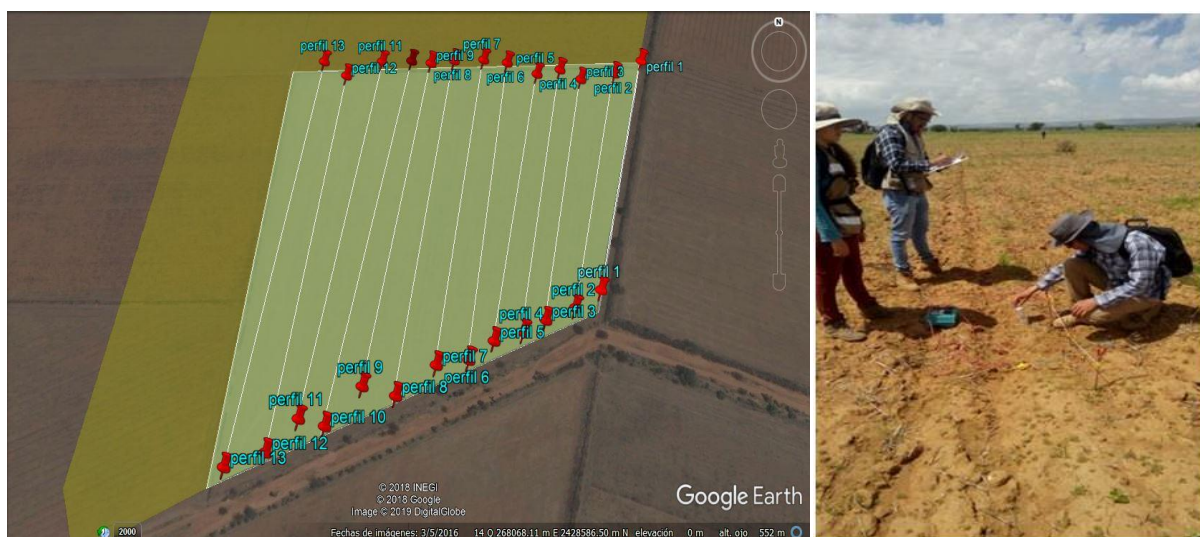


Figura 33. Ubicación de Red y adquisición de datos de calicatas eléctricas (CE).

4.8.1 Material y equipo utilizado para mediciones eléctricas

- ❖ Equipo Terrimeter Saturn Geo LEM
- ❖ Flexómetro
- ❖ Marro
- ❖ Electrodo
- ❖ Carretes de cables con sus conectores A-B, M-N
- ❖ Banderitas
- ❖ GPS
- ❖ Libreta
- ❖ Agua
- ❖ Tabla con plantillas

4.9 Procesamiento calicatas eléctricas

Después de la adquisición de datos de campo, cuyo ejemplo de datos se presentan en el aparatado (anexo 4), se prosigue a realizar el archivo de entrada del programa Surfer®, el cual consta de una tabla de Excel de cinco columnas; en la primera se encuentra el número de puntos, en la segunda el número de perfil, en las siguientes dos encontramos las coordenadas UTM X y Y de cada punto de medición, mientras que la ultima la resistividad. Posteriormente en el programa Surfer 12 se crea un grid de base datos utilizando el algoritmo de mínima curvatura. La cuadrícula de mínima curvatura proporciona mapas con suavizado óptimo de las líneas de campo (Briggs, 1974), ampliamente utilizados en las ciencias de la tierra (Orfanos & Apostolopoulos, 2012), incluidos los métodos geoelectricos (Korhonen et al., 2004).

Por último, se agrega la ubicación de los puntos de medición del calicateo, esto con el fin de recortar el mapa base eliminando la extrapolación de datos que afecta la escala de valores y colores máximos y mínimos de resistividad adquiridos en campo. El resultado final es un mapa de la distribución de alta resolución de la resistividad aparente del suelo agrícola.

4.10 Humedad de suelos en campo

Para las mediciones de humedad en campo, se realizó a la par de las mediciones de tomografía de resistividad eléctrica y calicatas eléctricas. Para el primer caso las lecturas fueron tomadas en los puntos de atribución con espaciado cada 0.60 centímetros, mientras que para calicatas eléctricas se realizaron las mediciones en la misma red de 25 x 25 m, utilizada para el levantamiento de resistividad. Para realizar la medición fue necesario colocar el electrodo a una profundidad aproximada de entre 15 y 20 cm, se procedió a leer y anotar el porcentaje de saturación de humedad.



Figura 34. Registro de humedad de suelo en campo.

4.10.1 Material y equipo

- ❖ Medidor de humedad de suelo marca **Sseyl Lutron**.

4.11 Procesamiento; Determinación de contenido de finos para campo

Para esta parte del proyecto se ocupó el software PetroWin (A. Ryjov & Shevnin, 2002). Para conocer el porcentaje y la sección de arcilla. Para este paso se emplean los datos recabados por el método de calicatas eléctricas y valores de humedad de cada punto de medición. Posteriormente se recurrió al software Surfer 12 Surfer® para crear el mapa de contenido de finos. Los pasos a seguir se presentan a continuación en la figura 35.

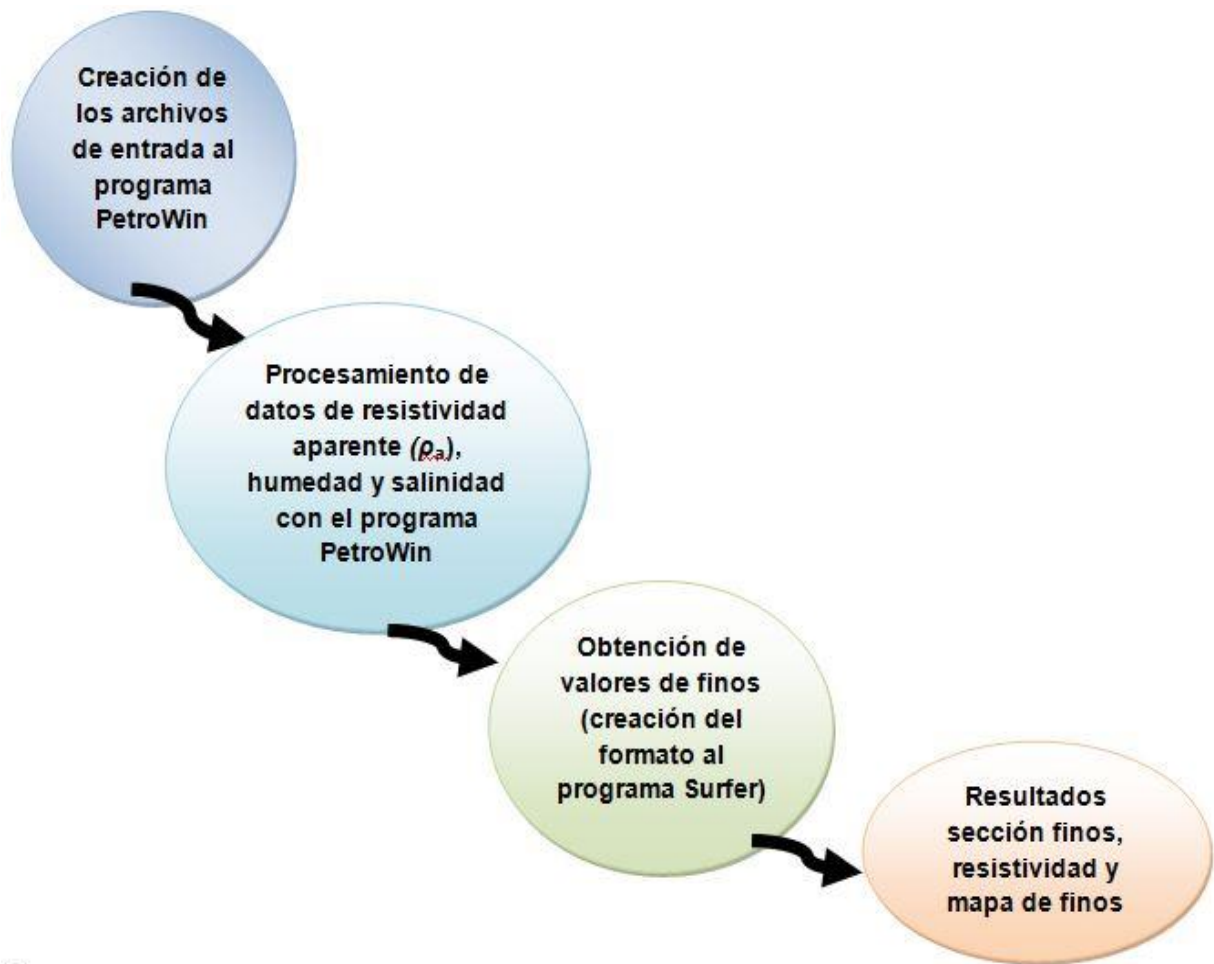


Figura 35. Secuencia de procesamiento para la sección de finos, resistividad y mapa de finos.

En lo que respecta al primer paso, se lleva a cabo la corrección de datos de los formatos de entrada al software PetroWin, con terminación (.DPR, .RES, y .MD), estos formatos permitirán correr el software para la obtención de porcentaje, sección de arcilla y de resistividad, que a futuro servirá para obtener la sección de finos y de resistividad, así como también el mapa de finos. Para ello se tomó en cuenta el espaciamiento y la resistividad que se obtuvo de las mediciones por el método de la TRE y de calicatas eléctricas (CE), así como la profundidad alcanzada por cada método. Por otro lado, se tomó en cuenta los valores arrojados de humedad en campo, los valores adquiridos en las curvas teóricas del procesamiento en el software PetroWin, entre lo que destaca, porcentaje de arcilla y arena, capacidad de intercambio catiónico (CIC), así como también la salinidad de los suelos obtenida en

laboratorio. Para la segunda parte, después de modificar los archivos de entrada se procede a correr el programa, del cual se obtiene la sección de arcilla y de resistividad obtenida del mismo (Figuras 36 y 37).

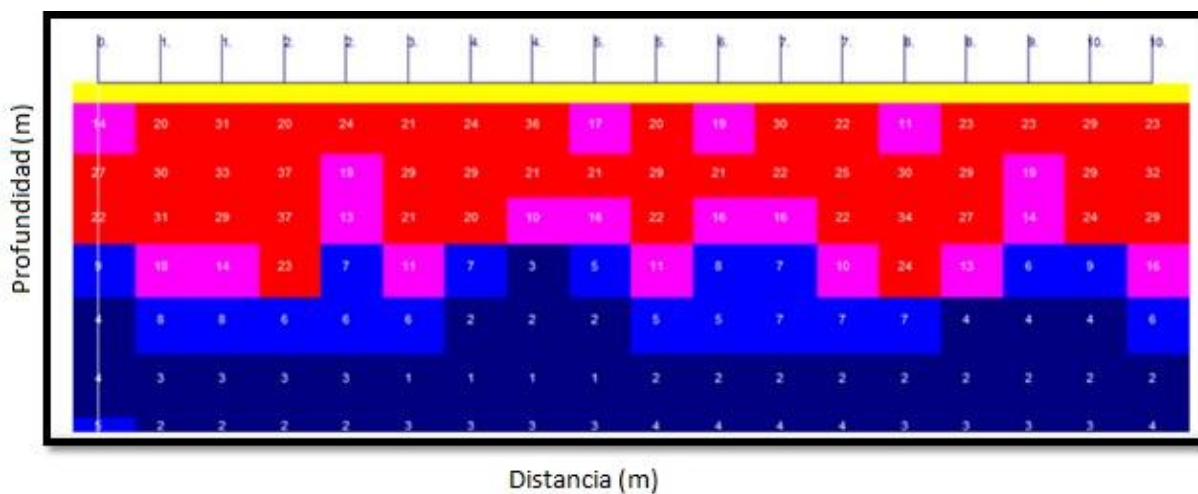


Figura 36. Sección de arcilla programa PetroWin.

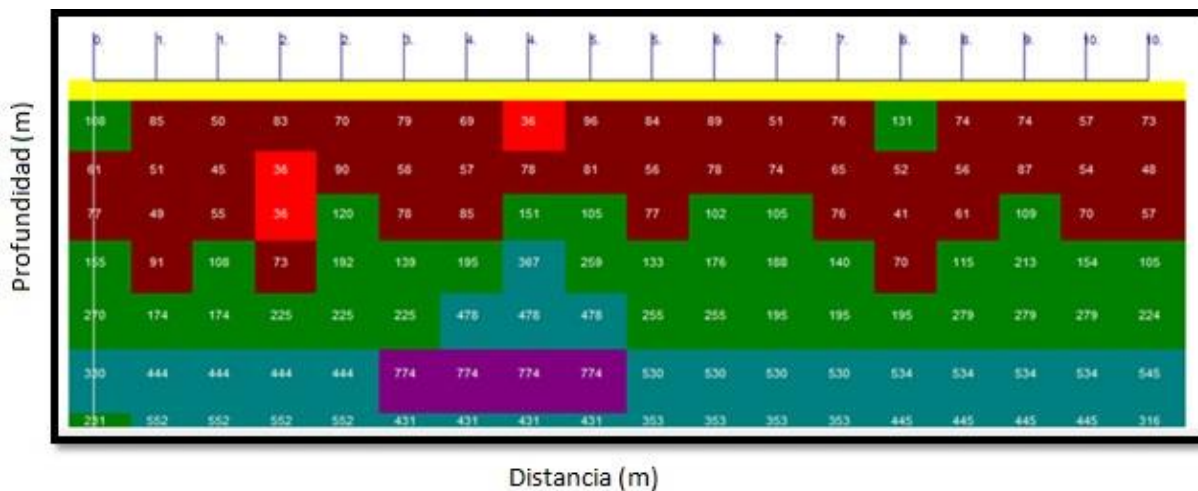


Figura 37. Sección de resistividad programa PetroWin.

Para la tercera parte se procede a exportar los valores resultantes de la sección de arcilla y resistividad, dichos valores se agregaron a una tabla de Excel, (Tabla 6).

Tabla 6. Porcentaje de finos obtenidos de la sección arcilla y resistividad del programa PetroWin.

Per	Fin	Res	Per	Fin	Res	Per	Fin	Res	Per	Fin	Res	Per	Fin	Res	Per	Fin	Res
1	44	65.25	3	31	97.38	6	33	74.51	8	37	68.17	10	46	60.95	13	31	94.56
1	45	63.96	4	28	101.78	6	35	82.02	8	37	66.6	11	33	87.34	13	51	54.98
1	40	73.01	4	32	79.16	6	58	48.03	8	40	71	11	35	80.64	13	43	65.97
1	48	59.5	4	31	81.21	6	43	65.15	9	34	84.82	11	38	74.64	13	48	59.91
1	35	94.03	4	30	87.43	6	48	58.24	9	31	90.79	11	42	68.14	13	38	75.96
1	43	67.7	4	30	93.11	6	40	70.65	9	32	88.59	11	44	65.75	13	39	73.51
1	37	78.85	4	45	55.04	6	31	79.48	9	39	63.77	11	41	60.66	13	32	89.54
1	30	92.67	4	31	80.95	7	32	89.84	9	31	80.2	11	31	98.33	13	42	68.8
1	31	83.25	4	42	67.85	7	32	79.79	9	42	59.38	11	44	64.72	13	33	86.08
1	39	64.9	4	37	76.65	7	31	82.59	9	45	54.73	11	47	60.04	13	31	79.17
2	32	77.09	4	35	81.96	7	36	68.67	9	38	75.15	11	43	66.63	13	34	70.69
2	38	75.55	4	44	63.86	7	33	75.02	9	32	90.48	11	38	62.67	13	33	72.88
2	32	90.47	5	44	65.03	7	31	97.38	9	31	76.65	11	31	68.05	13	33	64.18
2	33	88.27	5	38	76.02	7	51	55.82	9	31	68.74	11	30	73.07	13	37	63.49
2	36	78.63	5	38	75.08	7	44	56.17	9	28	83.19	11	27	92.55	13	38	54.6
2	31	85.45	5	32	78.09	7	42	58.74	9	33	60.98	12	30	67.86			
2	33	87.96	5	42	59.62	7	23	109.01	10	34	56.99	12	36	54.19			
2	43	66.82	5	31	98.01	7	33	70.62	10	35	59.44	12	28	81.9			
2	32	88.9	5	31	91.73	7	85	50.64	10	30	76.03	12	40	58.12			
2	33	75.36	5	37	76.65	8	79	54.82	10	30	80.11	12	40	56.86			
3	31	96.13	5	34	84.13	8	25	104.62	10	31	78.54	12	43	53.12			
3	30	86.7	5	49	58.43	8	44	62.61	10	31	79.89	12	30	106.5			
3	36	79.79	5	39	72.63	8	38	61.26	10	45	54.51	12	50	56.01			
3	34	73.48	5	30	84.98	8	42	58.12	10	34	84.57	12	39	63.3			
3	41	69.9	6	28	103.04	8	38	74.42	10	42	68.55	12	35	71			
3	43	66.53	6	30	86.7	8	50	48.66	10	31	83.13	12	33	76.72			
3	31	92.89	6	32	76.05	8	31	84.51	10	42	58.81	12	40	62.99			
3	34	83.03	6	40	61.6	8	48	51.58	10	32	77.94	12	43	66.29			
3	43	66.31	6	31	82.65	8	42	59.75	10	46	61.2	12	43	65.03			

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Resultado, mediciones eléctricas de laboratorio, estimación de porcentaje de finos

Una vez que se corre el software PetroWin, el resultado es una curva teórica de resistividad en el eje “Y” respecto a salinidad del agua en el eje de las “X”, para distinto contenido de finos. El objetivo es ajustar la curva teórica y encontrar un porcentaje de error no mayor a 5%, esto sucede al jugar con los valores de radio de poro de la arena y de la componente arcilla, así como los valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC), el resto de valores se deja tal cual lo arroja el software. Al trabajar en un inicio con el software PetroWin, este presenta dos modelos teóricos ajustables, de los cuales se debe indicar cuál es el correcto, por lo que se tiene que trabajar en conjunto con los resultados de la técnica de Bouyoucos para poder ajustar correctamente las curvas. Para este caso el modelo presentado en la (Figura 38), ya se ajustó a los resultados de Bouyoucos, por lo que representa la curva verdadera de la gráfica, con un error de 1.318% que se encuentra dentro del rango establecido, y en automático te arroja un aproximado de la cantidad de finos que es de 21%. Los resultados de las siguientes muestras se encuentran en el apartado (anexo 3).

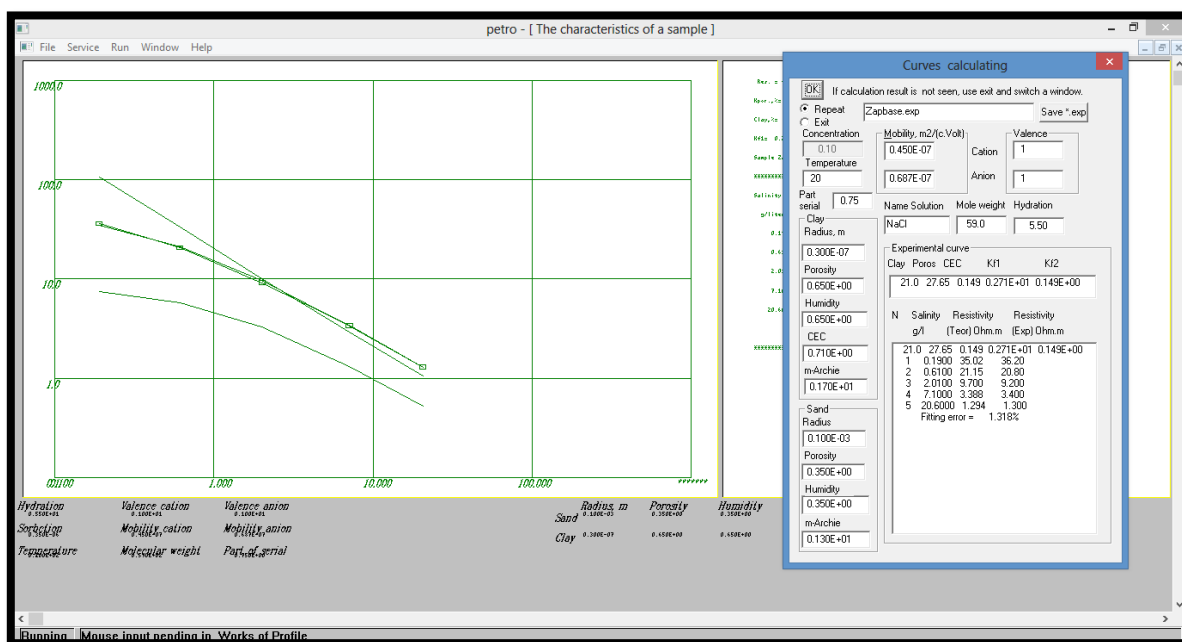


Figura 38. Modelo teórico PetroWin muestra “Zapata base” ajustado a la técnica de Bouyoucos.

5.2 Resultados de salinidad de muestras de suelo

En los resultados obtenidos de salinidad (Tabla 7), se observan valores de salinidad bajos según la Norma Mexicana 021, por lo tanto, las mediciones efectuadas a las muestras de suelo en los diferentes resistivímetros, no estarán afectadas por aportes de sales desde el suelo, siendo confiable considerar como salinidad del agua de poro la salinidad de la soluciones utilizadas en cada resistivímetro. Es precisamente por este motivo que el block de notas de entrada al software PetroWin no se modifican los valores de salinidad que están por default y se mantiene para la programación de cada curva teórica. En caso contrario, si los valores resultaran altos las mediciones se tienen que realizar en cada uno de los resistivímetros por cada muestra de suelo, ya que la salinidad juega un papel importante para la obtención de las curvas teóricas como se puede ver en el procesamiento de Ryjov.

Cabe señalar que las salinidades obtenidas para la muestra base y horizonte 2.1(A), por sus proximidades al perfil de TRE (Figura 30), serán consideradas posteriormente para el proceso de obtención de la sección 2D de contenido de finos (Apartado 5.6).

Tabla 7. Resultados muestra de salinidad.

NOMBRE O NUMERO DE MUESTRA	SALINIDAD (g/L)
Muestra Base	0.126
Horizonte 2.1(A)	0.166
zapata 1	0.121
zapata 2	0.160
zapata 3	0.096
zapata 4	0.155

5.3 Resultados de la técnica de Bouyoucos

Después de realizar la metodología de la técnica de Bouyoucos las lecturas fueron capturas en un formato de Excel previamente elaborado en el cual se anota el número/nombre de la muestra, las coordenadas, lectura con el hidrómetro y temperatura a los 40 segundos y a las 2 horas respectivamente. Con esos datos el formato arroja de manera automática la corrección de lectura del hidrómetro y la temperatura, así como los valores de contenido de arcilla, limo, y arena en cada uno de los suelos como se muestra en la (Tabla 8).

Tabla 8. Estimación de contenido de finos por la técnica de Bouyoucos.

No. DE MUEST	x	y	LECTURA HIDRO A 40S	LECTURA TEMP A 40S	VALOR DE AJUSTE POR TEMP	LEC AJUSTE POR TEMP	LECTURA HIDRO A 2H	LECTURA TEMP A 2H	VALOR DE AJUSTE POR TEMP	LECTURA AJUSTE POR TEMP	% ARC + LIMO	% ARE	% LIM	% ARC	% TOT
Zapata Base 1	267980	2428471	10	22	2.5	10.9	7	22	2.5	7.9	21.8	78.2	6	15.8	100
Horizont 2.1 A	267922	2428429	11	22	2.5	11.9	3	22	2.5	3.9	23.8	76.2	16	7.8	100
Zapata 1	268227	2428561	18	26	6.5	20.34	8	26	6.5	10.34	40.68	59.32	20	20.68	100
Zapata 2	268294	2428770	19	26	6.5	21.34	9	26	6.5	11.34	42.68	57.32	20	22.68	100
Zapata 3	267967	2428775	23	26	6.5	25.34	12	26	6.5	14.34	50.68	49.32	22	28.68	100
Zapta 4	268085	2428634	21	26	6.5	23.34	10	26	6.5	12.34	46.68	53.32	22	24.68	100

5.4 Resultados mediciones eléctricas de laboratorio, (algoritmo de Ryjov y técnica de Bouyoucos)

Después de realizar las mediciones correspondientes de cada uno de los suelos, los resultados obtenidos por la técnica de Bouyoucos representados en la tabla 8, en el apartado (% arcilla + limo = finos), se tomaron como base para ajustar las curvas teóricas en el software PetroWin, para después crear una comparación de resultados de ambas técnicas como se muestra en la tabla 9. En la primera columna podemos observar el número de muestra, en las siguientes dos, las coordenadas del sitio donde fueron tomadas. Posteriormente se encuentra la columna de capacidad de intercambio catiónico (CIC), obtenida en el cuadro de diálogo (calculando curvas) del software PetroWin. En la columna cinco se observa los porcentajes de finos

resultantes del procesamiento en el software PetroWin, mientras que en la columna seis se encuentran los resultados de la técnica de Bouyoucos % arcilla + limo.

Como se puede observar, la comparación de ambos resultados de cada una de las muestras no presenta una variación importante y se semejan los valores, por lo que podemos aseverar que ambas técnicas son complementarias y los resultados son correctos. Mientras que las columnas posteriores se encuentra especificado el porcentaje individual de arcilla, limo y arena, de cada muestra de suelo por la técnica de Bouyoucos.

Tabla 9. Tabla comparativa, resultados técnica de Ryjov y Bouyoucos.

No. DE MUESTRA	X	y	Resultado Ryjov		Resultados Bouyoucos				
			CIC	Finos %	Finos % ARCILLA+LIMO	% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	% TOTAL
Zapata Base 1	267980	2428471	0.149	21	21.8	78.2	6	15.8	100
Zapata 1	268227	2428561	0.041	41	40.68	59.32	20	20.68	100
Zapata 2	268294	2428770	0.036	40	42.68	57.32	20	22.68	100
Zapata 3	267967	2428775	0.004	45	50.68	49.32	22	28.68	100
Zapata 4	268085	2428634	0.045	45	46.68	53.32	22	24.68	100
Horizonte 2.1 A	267922	2428429	0.304	19	23.8	76.2	16	7.8	100

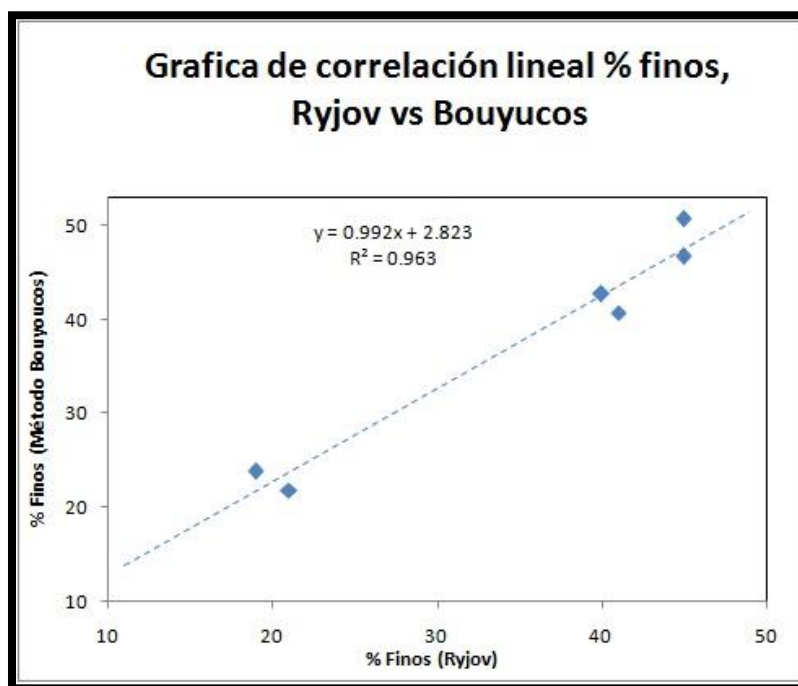


Figura 39. Gráfica de correlación lineal % finos Ryjov vs Bouyoucos.

5.5 Diagrama textural

62

5.6 Resultado de tomografía de resistividad eléctrica y sección de finos

Posteriormente al procesamiento en el software Res2dinv, se exportan los datos al software Surfer 12 Surfer® para crear un modelo de 2D de resistividad (Figura 41). De manera similar al proceso realizado con los resistivímetros, se procede a obtener la sección de finos para el perfil de TRE, tomando en cuenta no solo el modelo de resistividad, sino los valores de humedad determinados a lo largo del perfil de TRE y los valores de salinidad determinados en las muestras base y horizonte 2.1(A) próximas al perfil. La sección de contenido de finos mostrada en la (Figura 42), guarda correspondencia con el perfil del suelo que presenta en un canal orientado de manera paralela y distante a 5 m del perfil de TRE, donde se puede apreciar el horizonte A, el horizonte B, y el sustrato rocoso. La primera abarca del cero a los 40 cm de profundidad, pero unas partes específicas hay una correspondencia de valores mínimos de resistividad (azul oscuro), entre (73 a 160 Ohm.m) con porcentaje alto de finos. A partir de los 40 a los 60 cm de profundidad se puede apreciar mejor el horizonte B, con valores medios de resistividad (160 a 333 Ohm.m) en color verde y azul (Figura 41), mientras que para porcentajes de finos se aprecia en color azul turquesa (Figura 42). A partir de los 60 cm de profundidad, se logra distinguir el estrato rocoso que varía en profundidad a lo largo del eje horizontal, y corresponde a valores altos de resistividad (333 a 596 Ohm.m) en color rojo, mientras que para porcentajes de finos es nulo representado en color azul oscuro. Por ello se puede constatar la estrecha relación existente entre el perfil del suelo expuesto en el canal, el modelo de resistividad obtenido y la sección de porcentaje de finos.

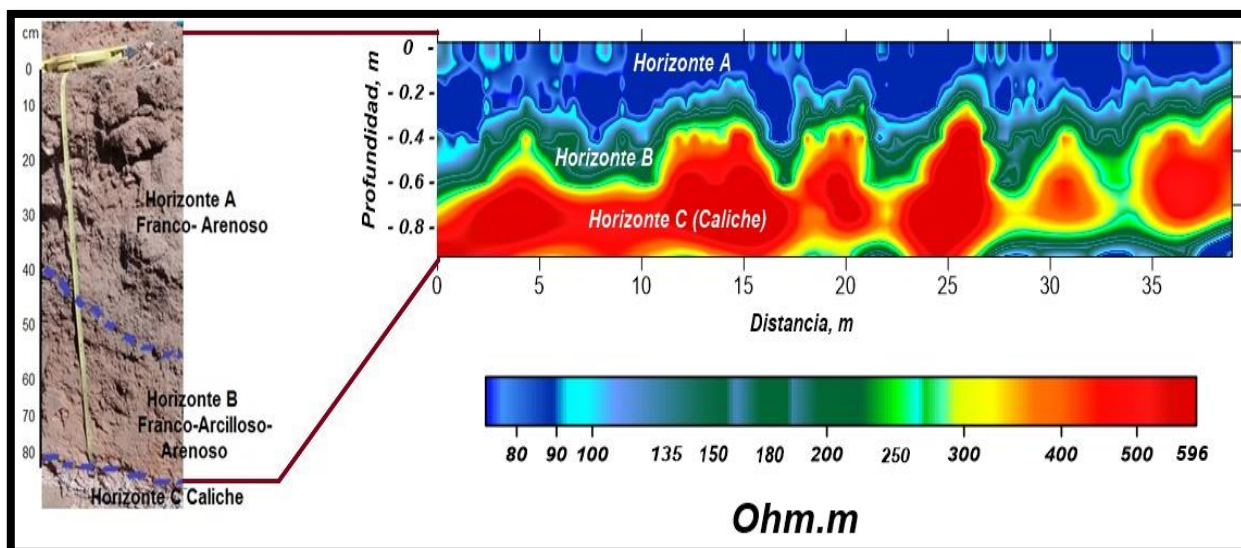


Figura 41. Correlación entre fotografía del sitio vs sección 2D de Tomografía Eléctrica, software Surfer 12.

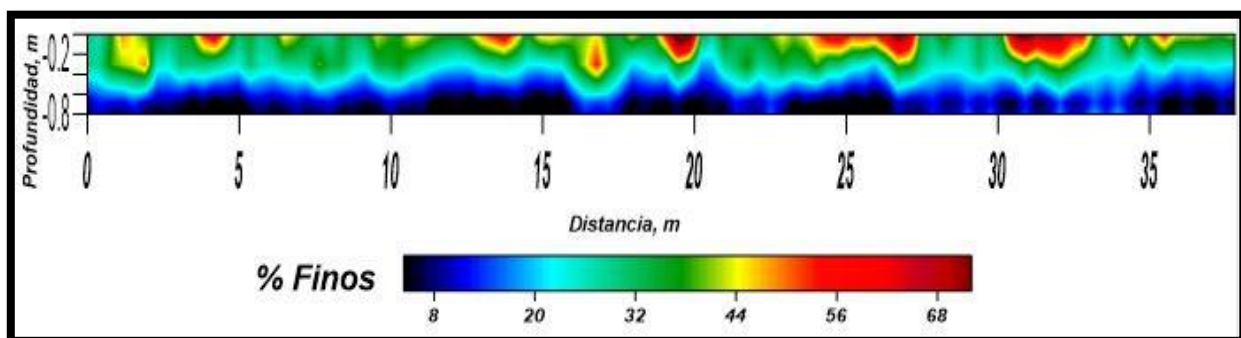


Figura 42. Sección de porcentaje de finos software Surfer 12.

Si bien, los resultados obtenidos mediante la aplicación del método del TRE son alentadores, éste método no es factible para ser utilizado en grandes extensiones de suelo agrícola. Para mapear la parcela objeto de estudio de dimensión 9 Ha es necesario utilizar un método de rápido avance como las calicatas eléctricas.

5.7 Resultados calicatas eléctricas: mapa de resistividad

En la (Figura 43), se encuentra representado el mapa de resistividad obtenido del método de calicatas eléctricas. Se observa una alta variabilidad de los valores de resistividad aparente en todo el mapa en un rango entre 47 y 113 Ohm.m con ligera tendencia E-W de aumento de la resistividad aparente. En el centro del mapa es

donde se encuentran los valores menores de resistividad, mientras que hacia la parte S-E las más altas.

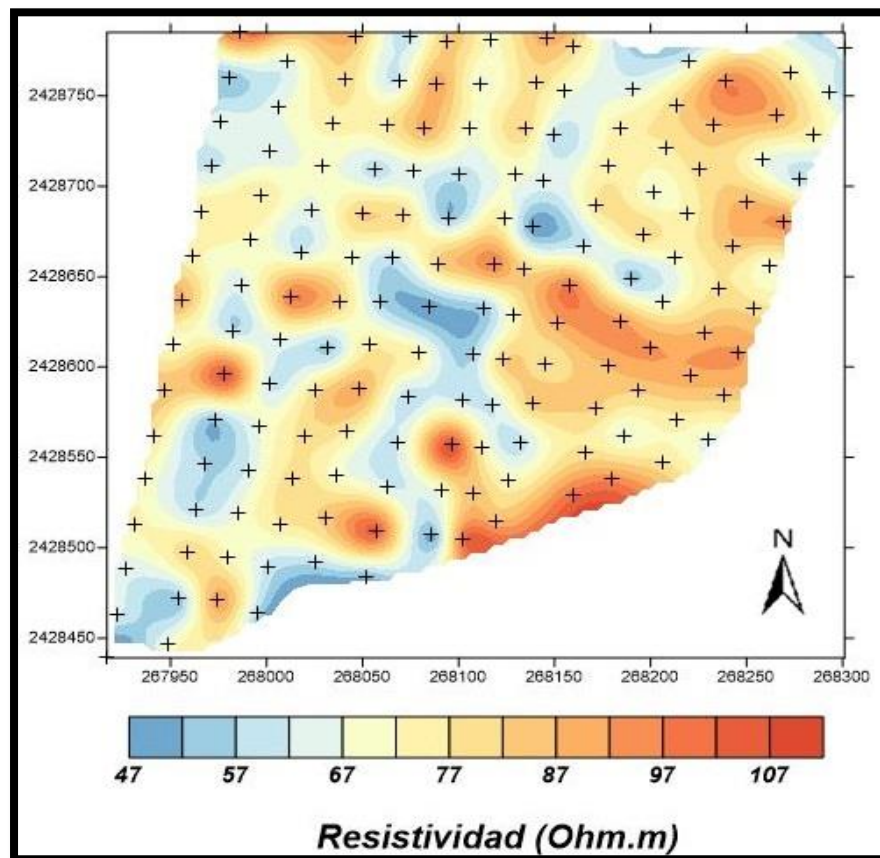


Figura 43. Mapa de resistividad de calicatas eléctricas.

5.8 Mapa de humedad del suelo.

Para realizar el mapa de humedad (Figura 44), se tomó en cuenta los datos colectados en las mediciones realizadas en campo. Para ello, se creó un archivo de entrada el cual contiene en sus primeras dos columnas las coordenadas, las cuales son las mismas que el método de calicatas eléctricas ya que el levantamiento de humedad del suelo fue realizado en conjunto con el levantamiento de resistividad, siendo por lo tanto en una red aproximada de 25 m por 25 m. Para la creación del mapa se utilizó el programa Surfer®.

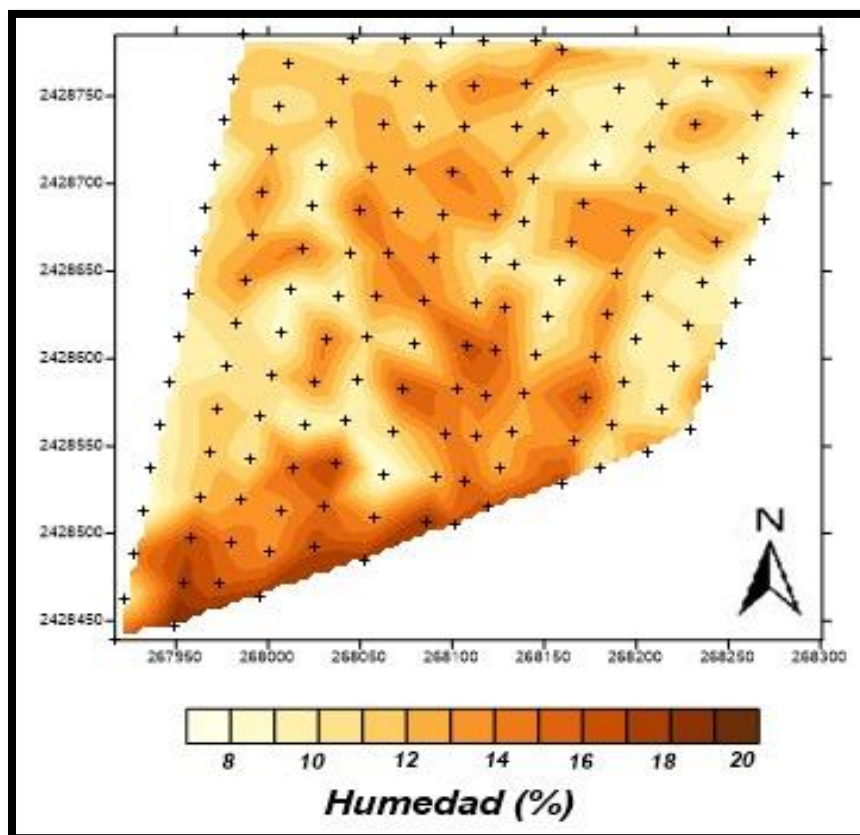


Figura 44. Mapa de humedad.

El mapa de humedad (Figura 44), del sitio presenta hacia la parte S-W los mayores valores (16 a 20%), esto debido a la cercanía al canal presente en área de estudio, el cual almacena agua de lluvia. También se aprecia en el centro una ligera concentración de humedad, que va de 12 a 16%, mientras que en el resto del área los bajos valores de humedad que prevalecen en un rango de 7.5 a 13%.

5.9 Creación de mapa de finos software Surfer 12, e Interpretación de Resultados.

El último paso consistió en crear el mapa de finos, el cual requirió los datos de resistividad, humedad, y un valor promedio de salinidad del suelo para la parcela.

Utilizando el programa PetroWin (A. Ryjov & Shevnin, 2002) se procesaron los diferentes perfiles. Cabe mencionar que los parámetros del modelo teórico inicial a procesar fueron definidos con base en los resultados del procesamiento de las muestras de los resistivímetros, entre los que destaca CIC de la componente finos, porosidad de la componente finos y porosidad de la arena, de tal manera que

garantice el ajuste al modelo correcto. Los resultados se encuentran registrados en la (Tabla 6). Posteriormente en el programa Surfer®, se utilizó el apartado columna de finos de la tabla mencionada, a la cual se agregó las coordenadas de cada punto de medición del método de calicatas eléctricas. Con esto se obtuvo el mapa de contenido de finos, obteniendo el siguiente resultado (Figura 45).

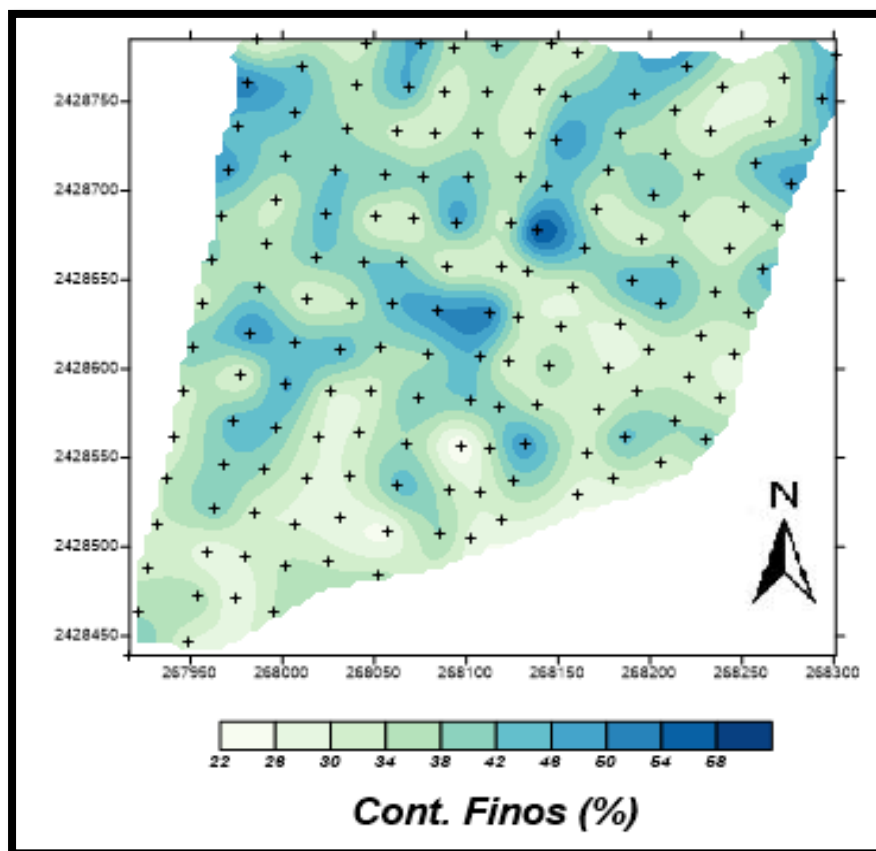


Figura 45. Mapa de porcentaje de contenido de finos Surfer.

En el mapa se muestra la distribución espacial de contenido de finos en el área estudio, en el cual se aprecia una distribución muy heterogénea en toda la superficie, aunque en la mitad norte del mapa se agrupan prevalecen los valores altos de contenidos de finos. Cabe destacar que si comparamos los mapas de resistividad y porcentaje de finos, podemos inferir que a mayor resistividad menor contenido de finos y viceversa, pero sabemos que la humedad y la salinidad juegan un papel importante, para este caso la salinidad que se obtuvo no afecta debido a los valores bajos, por lo tanto, para esta parcela podemos indicar que el mapa de contenido de finos solo es afectado por la resistividad y la humedad.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Mediante la aplicación del algoritmo de Ryjov (Programa PetroWin) se alcanzaron los objetivos planteados al inicio del proyecto, con la cual se determinó el contenido de finos de muestras de suelo agrícola a partir de mediciones de resistividad eléctrica en laboratorio. Estos resultados guardaron una alta correlación con los valores obtenidos mediante el análisis textural de Bouyoucos.
- La aplicación del análisis textural de Bouyoucos fue útil para verificar la confiabilidad de los contenidos de finos determinados en laboratorio por la técnica de Ryjov y crear el modelo teórico inicial que demanda el programa PetroWin para el procesamiento de mediciones eléctricas realizadas en campo (TRE y CE).
- La sección geoelectrica en 2D, obtenida de la aplicación del método TRE, mostró los diferentes horizontes del suelo, apreciándose en profundidad los horizontes A y B, así como el estrato rocoso. También tuvo como resultado una sección de contenido de finos en correspondencia con los diferentes horizontes antes mencionados. Sin embargo, el método TRE se muestra como poco eficiente para evaluar la distribución de contenido de finos en una parcela.
- El levantamiento de resistividad utilizando el método de CE como técnica de mayor avance, en conjunto con mediciones de humedad y salinidad, permitió generar el mapa de contenido de finos de la parcela, este último otorgando una correlación satisfactoria con los valores obtenidos por Bouyoucos, demostrando ser una combinación bastante eficiente para el estudio de suelos agrícolas.

- El mapa de finos obtenido en la parcela de 9 Ha constituye una herramienta útil en la determinación de la lámina de riego óptima para obtener mayores rendimientos de cultivo.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda determinar más parámetros petrofísicos del área de estudio como capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad hidráulica, porosidad, así como un análisis químico del suelo con el objetivo de tener un conocimiento más amplio de la calidad de los suelos agrícolas.
- También es necesario utilizar otros métodos geofísicos de mayor avance, como el método de Perfilaje Electromagnético, para obtener mapas de alta resolución, y con ello evaluar grandes extensiones de suelos agrícolas.

REFERENCIAS

- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54–62.
- Arias, D. E. (2011). *Exploración geotécnica–relaciones geoeléctricas* [PhD Thesis]. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Auge, M. (2008). Métodos geoeléctricos para la prospección de agua subterránea. *Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires*.
- Beklemishev, A. V. (1963). *Measures and units of physical values*. Fizmatgiz, Moscow (in Russian).
- Bouyoucos, G. J. (1936). Directions for making mechanical analysis of soils by the hydrometer method. *Soil Sci*, 42(3), 225–230.
- Briggs, I. C. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1), 39–48.
- Cantos, J. (1987). Tratado de Geofísica Aplicada.-535 págs. *Promotora de Minas de Carbón, Madrid*.
- Clavier, C., Coates, G., & Dumanoir, J. (1984). Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 24(02), 153–168.
- de Arriaga, V. (2005). *Prontuario de Información Geográfica Municipal*. 3, 8.
- Delgado Rodríguez, O. (2012). Estimation of soil petrophysical parameters based on electrical resistivity values obtained from lab and in-field measurements. *Geofísica internacional*, 51(1), 5-15.
- Delgado-Linares, J. G., Gutiérrez, C., Salazar, F., Guevara, M., Mercado, R., & Pereira, J. C. (2013). Aplicación de conceptos clásicos de la Física en la práctica ingenieril: La ley de Stokes como herramienta conceptual en el análisis de procesos de deshidratación del petróleo. *Educación química*, 24(1), 57–62.

Diario Oficial de la Federación. (2000). NOM-021-RECNAT-2000. *Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Federación del*, 14, 17.

FAO, & UNESCO. (1998). *Base de referencia para los suelos del mundo*. FAO/UNESCO.

Gisbert Blanquer, J. M., Ibañez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. (2010). *La textura del suelo*.

Gómez Burgos, L. A., & Parra Cubillos, Y. (2015). *Influencia de fluidos en el comportamiento de la doble capa difusa en arcillas* [B.S. thesis].

Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, 29(3-4), 211–226.

Griffiths, D. H., Turnbull, J., & Olayinka, A. I. (1990). Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First break*, 8(4), 121–129.

INEGI. (2012). *Regiones agropecuarias de San Luis Potosí. Censo Agropecuario 2007*. 69.

Instituto Nacional de Estadística, Censo Agropecuario, C. (2007). Instituto Nacional de Estadística. *Geografía e Informática, Mexico, DF*.

Korhonen, K., Kuivamäki, A., Ruotoistenmäki, T., & Paananen, M. (2004). Interpretation of lineaments from airborne geophysical and topographic data. *Geological Survey of Finland*.

Lapazaran, J. J. (2004). *Técnicas de procesamiento de datos de georradar y su aplicación al estudio del régimen termodinámico de los glaciares fríos y politérmicos* [PhD Thesis]. Telecomunicación.

Loke. (2010). *Res2DInv ver. 3.59. 102 Geoelectrical imaging 2D and 3D. Instruction manual*. Geotomo Software.

Loke, & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method 1. *Geophysical prospecting*, 44(1), 131–152.

Loke, M. H. (2000). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. *Electronic version available from* <http://www.terra-plus.com>.

Marion, D., Nur, A., Yin, H., & Han, D.-H. (1992). Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures. *Geophysics*, 57(4), 554–563.

McGeary, R. K. (1961). Mechanical packing of spherical particles. *Journal of the American ceramic Society*, 44(10), 513–522.

McKenzie, R. C. (1989). Conversion of electromagnetic inductance readings to saturated paste extract values in soils for different temperature, texture, and moisture conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(1), 25–32.

Milsom, J. (2003). *Field geophysics* (Vol. 25). John Wiley and Sons.

Orellana, E. (1982). *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*. Paraninfo.

Orfanos, C., & Apostolopoulos, G. (2012). Analysis of different geophysical methods in the detection of an underground opening at a controlled test site. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 15(1), 7–18.

Palés. (2015). *Revista Buzos—Html*.
<http://www.buzos.com.mx/revhtml/r677/reportslp.html>

Parasnis, D. S. (1997). *Principles of applied geophysics*. Springer Science & Business Media.

Pascual, A., Delgado, O., & Fuentes, N. (1995). República de Cuba. *Geofísica Internacional*, 34(2), 233–237.

Perdomo, S. (2009). *Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica* [PhD Thesis]. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas.

Rhoades, J. D., Raats, P. A. C., & Prather, R. J. (1976). Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity 1. *Soil Science Society of America Journal*, 40(5), 651–655.

Robert, P. C. (2002). *Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management*, (pp. 143-149).

Rylov. (1987). The main IP peculiarities of rocks. *the book "Application of IP method for mineral deposits' research". Moscow*, 5–23.

Rylov, A. A., & Sudoplatov, A. D. (1990). The calculation of specific electrical conductivity for sandy-clayed rocks and the usage of functional cross-plots for the decision of hydrogeological problems. *Scientific and technical achievements and advanced experience in the field of geology and mineral deposits research. Moscow*, 27.

Rylov, A., & Shevnin, V. (2002). Theoretic calculation of rocks electrical resistivity and some examples of algorithm's application. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2002*, P2–P2.

Rylov, & Sudoplatov, A. D. (1990). The calculation of specific electrical conductivity for sandy-clayed rocks and the usage of functional cross-plots for the decision of hydrogeological problems. *Scientific and technical achievements and advanced experience in the field of geology and mineral deposits research. Moscow*, 27.

Shevnin, V., Delgado Rodríguez, O., Mousatov, A., Flores Hernández, D., Zegarra Martínez, H., & Rylov, A. (2006). Estimation of soil petrophysical parameters from resistivity data: Application tooil contaminated site characterization. *Geofísica internacional*, 45(3), 179-193.

Shevnin, V., Mousatov, A., Rylov, A., & Delgado-Rodriquez, O. (2007). Estimation of clay content in soil based on resistivity modelling and laboratory measurements. *Geophysical Prospecting*, 55(2), 265–275.

Sudduth, K. A., Drummond, S. T., & Kitchen, N. R. (2000). Measuring and interpreting soil electrical conductivity for precision agriculture. *Second International geospatial information in agriculture and forestry conference, Lake Buena Vista, Florida*.

Tabbagh, A., Benderitter, Y., Michot, D., & Panissod, C. (2002). Measurement of variations in soil electrical resistivity for assessing the volume affected by plant water uptake. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 7, 229–237.

Velasco, M. A. (2017). *Caracterización del acuífero de Ahualulco, San Luis Potosí en una zona de riego, a partir de tomografía eléctrica en pozos y en superficie*.

Waxman, M. H., & Smits, L. J. M. (1968). Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(02), 107–122.

Williams, B. G., & Baker, G. C. (1982). An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. *Soil Research*, 20(2), 107–118.

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 10. Grupo de Suelos de Referencia (GSR) de la WRB con códigos sugeridos (FAO & UNESCO, 1998).

	GSR	Código	Definición
1.- Acumulación pronunciada de materia orgánica en el suelo mineral superficial. Suelo superficial oscuro sin carbonatos secundarios (a menos que estén muy profundos), alta saturación de bases:	Phaeozems	PH	Este grupo integra suelos de praderas relativamente húmedos y regiones de bosque en climas moderadamente continentales. Están lixiviados de manera más intensa. En consecuencia, tienen un horizonte superficial oscuro, rico en humus, es menos rico en bases. Están libres de carbonatos secundarios o los tienen sólo a mayores profundidades. Todos ellos tienen una alta saturación de bases en el metro superior del suelo
2.- Suelos con poca o ninguna diferenciación del perfil. - Moderadamente desarrollados: - Ningún desarrollo significativo del perfil:	Cambisols Regosols	CM RG	Suelos con al menos la formación de un horizonte, de diferenciación en el subsuelo, evidente por cambios en la estructura, color, contenido de arcilla o contenido de carbonato. Son suelos muy extensos en tierras erosionadas y zonas de acumulación, en particular en zonas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos. Son poco desarrollados en materiales no consolidados que carecen de un horizonte móllico o úmblico, no son muy delgados o muy ricos en fragmentos gruesos (Leptosols), tampoco arenosos (Arenosols), ni con materiales flúvicos (Fluvisols).
3.- Suelos enriquecidos en arcillas en la parte subsuperficial. Arcillas de alta actividad, alta saturación de bases:	Luvisols	LV	Tienen un mayor contenido de arcilla en el suelo subsuperficial que en la capa superior del suelo, como resultado de procesos edafogenéticos (especialmente migración de arcilla) que conduce a la formación de un horizonte árgico en el suelo subsuperficial. Tienen arcillas de alta actividad en todo el espesor del

Modelo teórico de Ryjov para el cálculo del contenido de finos

La conductividad para la arena (σ_{ar}) y arcilla (σ_{arc}) se expresan a través de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{ar} = \phi_{ar}^m \sigma_{ar cap} \quad (A3.30)$$

$$\sigma_{arc} = \phi_{arc}^m \sigma_{arc cap} \quad (A3.31)$$

Donde:

$$\phi_{ar} = V_{ar \text{ por}} / V_{ar}$$

$$\phi_{arc} = V_{arc \text{ por}} / V_{ar}$$

Que a su vez:

$V_{ar \text{ por}}$ = Valores de porosidad para componentes de arena

$V_{arc \text{ por}}$ = Valores de porosidad para componentes de arcilla

Mientras que:

V_{ar} = Volumen total de arena

V_{arc} = Volumen total de arcilla

$\sigma_{ar \text{ cap}}$ = conductividad de un capilar de arena

$\sigma_{arc \text{ cap}}$ = conductividad de un capilar arcilla

m = Exponente de cementación.

La conductividad promedio $\tilde{\sigma}_{cap}$ de un capilar completamente saturado puede ser considerada como una función variable en función del radio $\sigma(r)$ que, a su vez depende de las propiedades de la doble capa eléctrica (DCE), en específico el espesor y la concentración de las sales, según:

$$\tilde{\sigma}_{cap} = \frac{2}{r_c^2} \int_0^{r_c} r \sigma(r) dr \quad (A3.32)$$

Donde r_c es el radio capilar.

Para suelos parcialmente saturados, la fase no conductora ocupa la parte central de los poros, debido a que los suelos están generalmente húmedos. Para este caso la ecuación es:

$$\tilde{\sigma}_c = \frac{2}{r_c^2} \int_{r_w}^{r_c} r \sigma(r) dr \quad (\text{A3.33})$$

Donde $r_w = r_c \sqrt{1 - S_w}$ es el radio interno de la película de agua presente en los capilares; S_w es la saturación de agua y se expresa en fracción del volumen total de poro.

En los poros de la arena, donde los capilares son más grandes, la conductividad promedio de los canales de arena $\sigma_{ar \text{ cap}}$ no depende del radio capilar y corresponde al valor de la conductividad del agua libre σ_w . Entonces, la conductividad del agua, con o sin influencia de las paredes capilares, depende de la concentración de sal, de las propiedades de los aniones y cationes y de la DCE. La conductividad de la solución acuosa, puede ser aproximada mediante una función que depende de la concentración de cationes y aniones asociada al efecto de hidratación (Rylov, 1987); dicha función se expresa mediante la ecuación:

$$\sigma_w = F \left[Z_c U_c C_c \exp\left(\frac{C_c}{1000zn}\right) + Z_a U_a C_a \exp\left(\frac{C_a}{1000zn}\right) \right] \quad (\text{A3.34})$$

Donde:

Z_c, Z_a = Cargas o valencias que poseen los iones.

F = Es el número de Faraday equivalente a: 96485 Q/mol

C_c, C_a = Concentraciones de los cationes y aniones

n = Número de hidratación

Esta aproximación permite hacer una estimación de la conductividad del agua para diferentes tipos de sales como: NaCl, KCl, Ca (HCO₃)₂, CaCl₂, MgCl₂, CaSO₄, NaHCO₃, Na₂SO₄, etc., en un amplio rango de salinidad entre 0.001 y 120 g L⁻¹.

Sin embargo, para determinar el valor de la conductividad para los finos capilares que componen las arcillas, es necesario aplicar una ecuación análoga a la ecuación (A3.34); en la cual, la concentración de aniones y cationes está en función del radio

capilar y de la CIC de las arcillas. La distribución radial de la conductividad en los capilares depende de la variación en la concentración de cationes y aniones, $C_c(r)$ y $C_a(r)$ respectivamente en los poros. Dicha ecuación es:

$$\sigma(r) = F \left[Z_c U_c C_c(r) \exp\left(\frac{C_c(r)}{1000zn}\right) + Z_a U_a C_a(r) \exp\left(\frac{C_a(r)}{1000zn}\right) \right] \quad (A3.35)$$

Donde: $C_c(r)$ y $C_a(r)$ son las concentraciones de cationes y aniones en mol/m³ como función de la distancia r desde la pared del capilar. Dicha concentración también depende de la CIC de la fase sólida; específicamente, $C_i(r) = C_i^{DCE}(r) + C_i^{CIC}(r)$; donde el índice i indica los cationes y aniones específicos.

El fenómeno de la doble capa eléctrica (DCE), depende principalmente de las concentraciones de iones calculadas para cada concentración de sal. CIC depende básicamente de las propiedades de la fase sólida; es decir, cuando hay un cambio en la concentración de iones, existe un cambio en la influencia de la DCE de acuerdo al tipo de solución, pero la CIC no cambia.

Entonces, la concentración $C_i(x)$ de aniones y cationes con carga z_i dentro de la DCE está basada en la ecuación de Boltzmann.

$$C_i(x) = C_{0i} \exp\left(\frac{-z_i F \psi(x)}{RT}\right) \quad (A3.36)$$

Donde:

C_{0i} = Es la concentración de aniones y cationes dentro de una solución eléctricamente neutra.

x = Es la distancia mínima desde un punto dentro de la fase líquida a la superficie sólida.

$\Psi(x)$ = es el potencial eléctrico dentro de un fluido a una cierta distancia x desde la pared capilar.

R = Es la constante de gas.

T = Es la temperatura absoluta °K.

El potencial eléctrico está en función de la distancia “ x ” desde la pared capilar; es determinada medio de la distribución de la carga en la doble capa eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico en la fase sólida. Dicha función se determina a partir de la ecuación de Poisson-Boltzmann.

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{\rho(x)}{\epsilon \epsilon_0} \quad (A3.37)$$

Donde:

$$\rho(x) = \sum_i Z_i F C_i(x) \quad (A3.38)$$

Es la suma de los iones a una distancia x ; ϵ es la constante dieléctrica relativa para un fluido; ϵ_0 es la permeabilidad del vacío (8.854×10^{-12} F/m).

Finalmente, la microestructura que componen a los suelos areno-arcillosos pueden ser descritas como empaquetamiento ideal de mezclas binarias de partículas con formas semiesféricas (McGeary, 1961). Cuando la concentración de arcilla es menor que la porosidad de la arena, las partículas de arcilla se acomodan dentro de los poros de la arena como películas en las paredes de los granos de arena; esto sin modificar la estructura. Sin embargo, cuando la concentración de arcilla es mayor que la porosidad de la arena, los granos de arena se encuentran en la arcilla.

La porosidad total Φ_t para suelos areno-arcillosos se calcula mediante las expresiones (Marion et al., 1992) y (A. A. Ryjov & Sudoplatov, 1990).

$$\Phi_t = (\Phi_{\text{arena}} - C_{\text{arcilla}}) + \Phi_{\text{arcilla}} * C_{\text{arcilla}} \quad \text{para } C_{\text{arcilla}} < \Phi_{\text{arena}} \quad (A3.39)$$

$$\Phi_t = C_{\text{arcilla}} * \Phi_{\text{arcilla}} \quad \text{para } C_{\text{arcilla}} \geq \Phi_{\text{arena}} \quad (\text{A3.40})$$

Donde: C_{arcilla} Es el contenido de arcilla volumétrico de la mezcla.

Por último, cuando $C_{\text{arcilla}} > \Phi_{\text{arena}}$ la conductividad total del suelo σ_{Σ} corresponde a la conductividad efectiva; (σ_{arcilla} la conductividad de la arcilla). Los valores de dichas conductividades dependen del tamaño de los capilares, la porosidad de la arcilla y su concentración. Pero si $C_{\text{arcilla}} < \Phi_{\text{arena}}$ la conductividad del suelo es definida por los poros de la arena, así como por los de arcilla.

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\text{arcilla}} C_{\text{arcilla}} * \Phi_{\text{arcilla}}^m \quad (\text{A3.41})$$

Tabla 11. Valores medidos en laboratorio de resistividad y de salinidad.

Muestra Base	R	I	Temp.	K	rho	rho_corr	rho prom	salinidad
11.1	445	16.3	22	0.0795	35.39	36.65	36.22	0.19
11.2	452	16.15	22	0.0765	34.57	35.80		
12.1	304	17.7	22	0.0662	20.14	20.85	20.88	0.61
12.2	327	17.7	22	0.0617	20.19	20.90		
13.1	186	20.39	22	0.0482	8.97	9.29	9.20	2.01
13.2	180	20.59	22	0.0489	8.81	9.12		
14.1	71.7	35.28	22	0.0475	3.40	3.53	3.49	7.10
14.2	67.6	34.75	22	0.0494	3.33	3.45		
15.1	26.51	90.6	22	0.0496	1.31	1.36	1.35	20.60
15.2	26.51	90.7	22	0.0487	1.29	1.33		
Horizonte 2.1(A)	R	I	Temp.	K	rho	rho_corr	rho prom	salinidad
11.1	339	16.3	19	0.0795	26.96	26.49	26.43	0.19
11.2	351	16.15	19	0.0765	26.85	26.37		
12.1	253.4	17.7	19	0.0662	16.78	16.49	16.55	0.61
12.2	273.9	17.7	19	0.0617	16.91	16.61		
13.1	162.2	20.39	19	0.0482	7.82	7.68	7.54	2.01
13.2	153.9	20.59	19	0.0489	7.53	7.40		
14.1	61.4	35.28	19	0.0475	2.91	2.86	2.86	7.10
14.2	59.1	34.75	19	0.0494	2.91	2.86		
15.1	23.73	90.6	19	0.0496	1.17	1.15	1.15	20.60
15.2	24.01	90.7	19	0.0487	1.17	1.14		
zapata 1	R	I	Temp.	K	rho	rho_corr	rho prom	salinidad
1.1	466	16.3	25	0.0715	33.31	36.26	36.17	0.19

1.2	442	16.15	25	0.0750	33.15	36.08		
2.1	282	17.7	25	0.0650	18.34	19.96	19.80	0.61
2.2	290	17.7	25	0.0622	18.03	19.63		
3.1	178.3	20.39	25	0.0513	9.15	9.96	10.03	2.01
3.2	187.1	20.59	25	0.0496	9.28	10.10		
4.1	62	35.28	25	0.0518	3.21	3.49	3.50	7.10
4.2	65.6	34.75	25	0.0492	3.23	3.51		
5.1	23.12	90.6	25	0.0498	1.15	1.25	1.23	20.60
5.2	21.87	90.7	25	0.0511	1.11	1.21		
zapata 2	R	I	Temp.	K	rho	rho_corr	rho prom	salinidad
11.1	535	16.3	25	0.0795	42.55	46.32	46.77	0.19
11.2	567	16.15	25	0.0765	43.37	47.21		
12.1	313	17.7	25	0.0662	20.73	22.57	22.74	0.61
12.2	341	17.7	25	0.0617	21.05	22.92		
13.1	216	20.39	25	0.0482	10.42	11.34	11.44	2.01
13.2	216.7	20.59	25	0.0489	10.60	11.54		
14.1	75.1	35.28	25	0.0475	3.57	3.88	3.90	7.10
14.2	72.9	34.75	25	0.0494	3.60	3.91		
15.1	25.21	90.6	25	0.0496	1.25	1.36	1.36	20.60
15.2	25.95	90.7	25	0.0487	1.26	1.37		
zapata 3	R	I	Temp.	K	rho	rho_corr	rho prom	salinidad
1.1	654	16.3	24	0.0715	46.76	50.07	49.89	0.19
1.2	619	16.15	24	0.0750	46.42	49.71		
2.1	325	17.7	24	0.0650	21.14	22.63	22.47	0.61
2.2	335	17.7	24	0.0622	20.83	22.31		
3.1	179.2	20.39	24	0.0513	9.20	9.85	9.81	2.01
3.2	184.2	20.59	24	0.0496	9.13	9.78		
4.1	64.2	35.28	24	0.0518	3.32	3.56	3.57	7.10
4.2	68	34.75	24	0.0492	3.34	3.58		
5.1	24.77	90.6	24	0.0498	1.23	1.32	1.30	20.60
5.2	23.33	90.7	24	0.0511	1.19	1.27		
zapata 4	R	I	Temp.	K	rho	rho_corr	rho prom	salinidad
11.1	544	16.3	24	0.0795	43.27	46.33	43.48	0.19
11.2	496	16.15	24	0.0765	37.94	40.63		
12.1	331	17.7	24	0.0662	21.92	23.48	23.51	0.61
12.2	356	17.7	24	0.0617	21.98	23.53		
13.1	202.1	20.39	24	0.0482	9.75	10.44	10.41	2.01
13.2	198	20.59	24	0.0489	9.69	10.37		
14.1	69.5	35.28	24	0.0475	3.30	3.53	3.56	7.10
14.2	68	34.75	24	0.0494	3.35	3.59		
15.1	24.44	90.6	24	0.0496	1.21	1.29	1.29	20.60
15.2	24.7	90.7	24	0.0487	1.20	1.28		

Anexo 2: Tablas de adquisición de datos de Tomografía de Resistividad Eléctrica para los puntos de atribución X= 0, 0.6, 1.2, 36.6, 37.2 y 37.8 m.

Tabla 12. Datos X= 0 m (TRE).

X= 0 m			
AB/2 (m)	k (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)
0.3	1.25664	69.5	87.34
0.5	3.76992	22.7	85.58
0.7	7.53984	13.7	103.30
0.9	12.5664	9.9	124.41
1.1	18.8496	7.4	139.49
1.3	26.3894	5.9	155.70
1.5	35.1859	5	175.93
1.7	45.239	4.4	199.05
1.9	56.5488	3.6	203.58
2.1	69.1152	2.98	205.96

Tabla 13. Datos X= 0.6 m (TRE).

X= 0.6 m			
AB/2 (m)	k (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)
0.3	1.25664	59	74.14
0.5	3.76992	18.2	68.61
0.7	7.53984	10.6	79.92
0.9	12.5664	8.1	101.79
1.1	18.8496	6.4	120.64
1.3	26.3894	5.2	137.22
1.5	35.1859	4.4	154.82
1.7	45.239	3.6	162.86
1.9	56.5488	2.83	160.03
2.1	69.1152	2.5	172.79

Tabla 14. Datos X= 1.2 m (TRE).

X= 1.2 m			
AB/2 (m)	k (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)
0.3	1.25664	42.4	53.28
0.5	3.76992	16.5	62.20
0.7	7.53984	9.8	73.89
0.9	12.5664	7.6	95.50
1.1	18.8496	5.7	107.44
1.3	26.3894	4.4	116.11
1.5	35.1859	3.7	130.19
1.7	45.239	3.2	144.76
1.9	56.5488	2.6	147.03
2.1	69.1152	2.4	165.88

Tabla 15. Datos $X= 36.6 \text{ m}$ (TRE).

X= 36.6 m			
AB/2 (m)	k (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)
0.3	1.25664	61	76.66
0.5	3.76992	31.9	120.26
0.7	7.53984	19.66	148.23
0.9	12.5664	12.99	163.24
1.1	18.8496	9.61	181.14
1.3	26.3894	7.35	193.96
1.5	35.1859	5.59	196.69
1.7	45.239	4.61	208.55
1.9	56.5488	3.59	203.01
2.1	69.1152	2.91	201.13

Tabla 16. Datos $X= 37.2 \text{ m}$ (TRE).

X= 37.2 m			
AB/2 (m)	k (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)
0.3	1.25664	66.6	83.69
0.5	3.76992	26.87	101.30
0.7	7.53984	16.79	126.59
0.9	12.5664	11.57	145.39
1.1	18.8496	8.86	167.01
1.3	26.3894	6.38	168.36
1.5	35.1859	5.06	178.04
1.7	45.239	3.96	179.15
1.9	56.5488	3.27	184.91
2.1	69.1152	2.65	183.16

Tabla 17. Datos $X= 37.8 \text{ m}$ (TRE).

X= 37.8 m			
AB/2 (m)	k (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)
0.3	1.25664	61.6	77.41
0.5	3.76992	28.2	106.31
0.7	7.53984	17.16	129.38
0.9	12.5664	12.51	157.21
1.1	18.8496	8.45	159.28
1.3	26.3894	6.53	172.32
1.5	35.1859	5.14	180.86
1.7	45.239	4.21	190.46
1.9	56.5488	3.49	197.36
2.1	69.1152	2.74	189.38

Anexo 3. Modelos teóricos PetroWin ajustados a la técnica de Bouyoucos

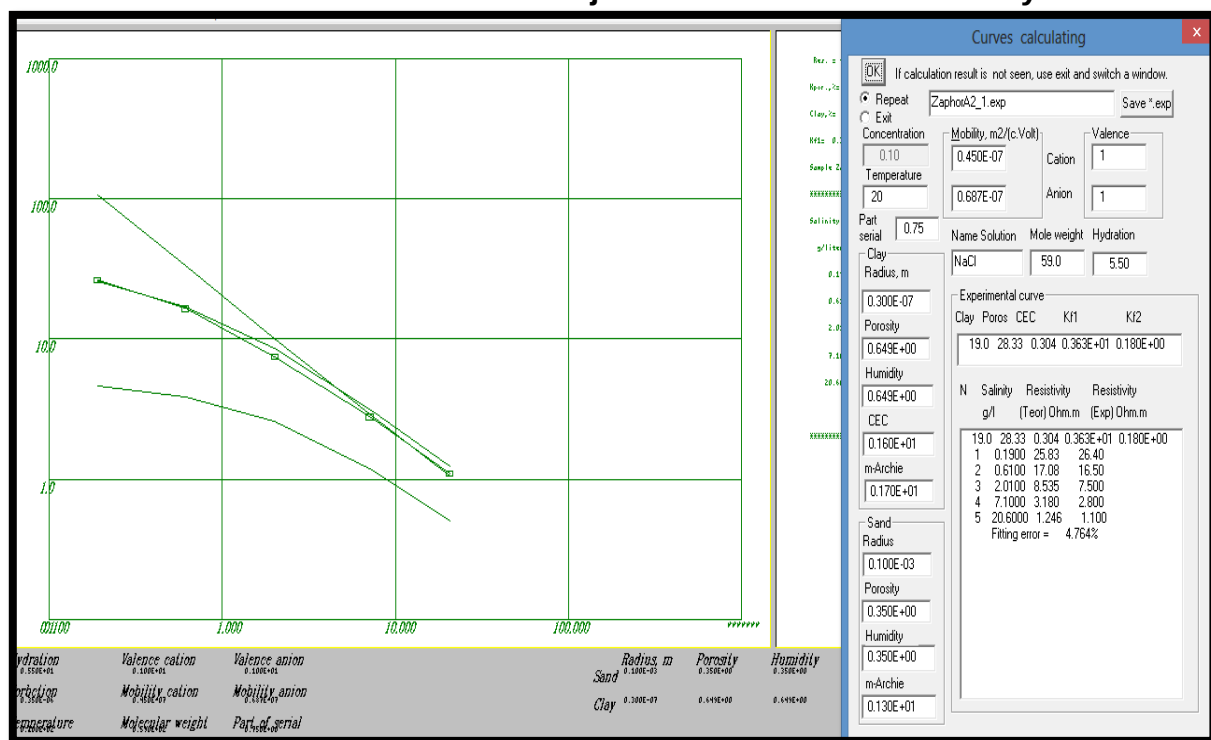


Figura 46. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata A 2.1, ajustado a la técnica de Bouyoucos.

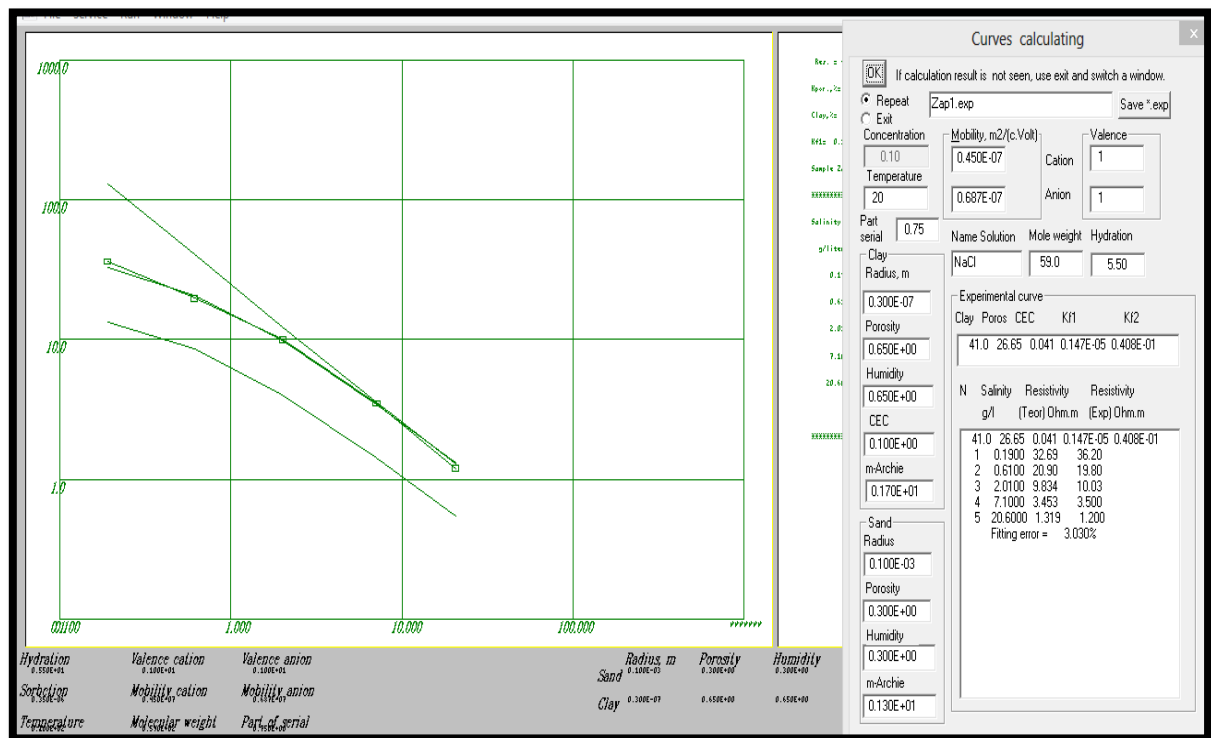


Figura 47. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata 1, ajustado a la técnica de Bouyoucos.

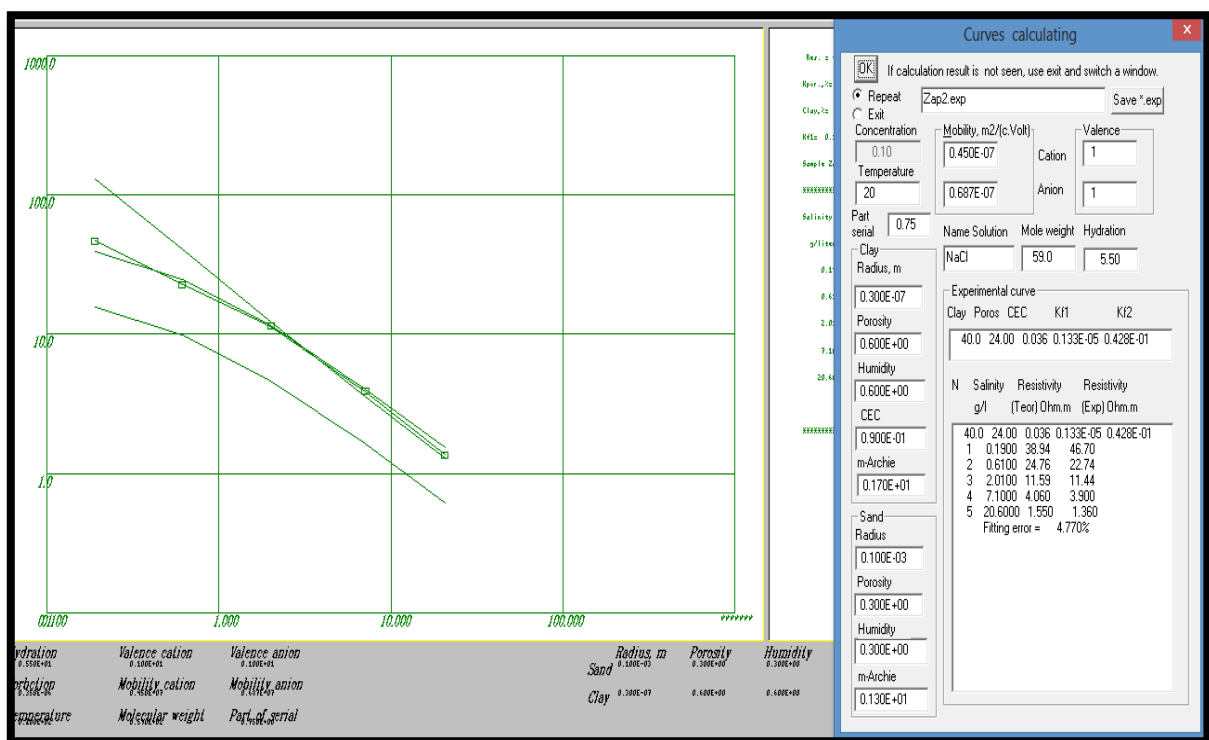


Figura 48. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata 2 ajustado a la técnica de Bouyoucos.

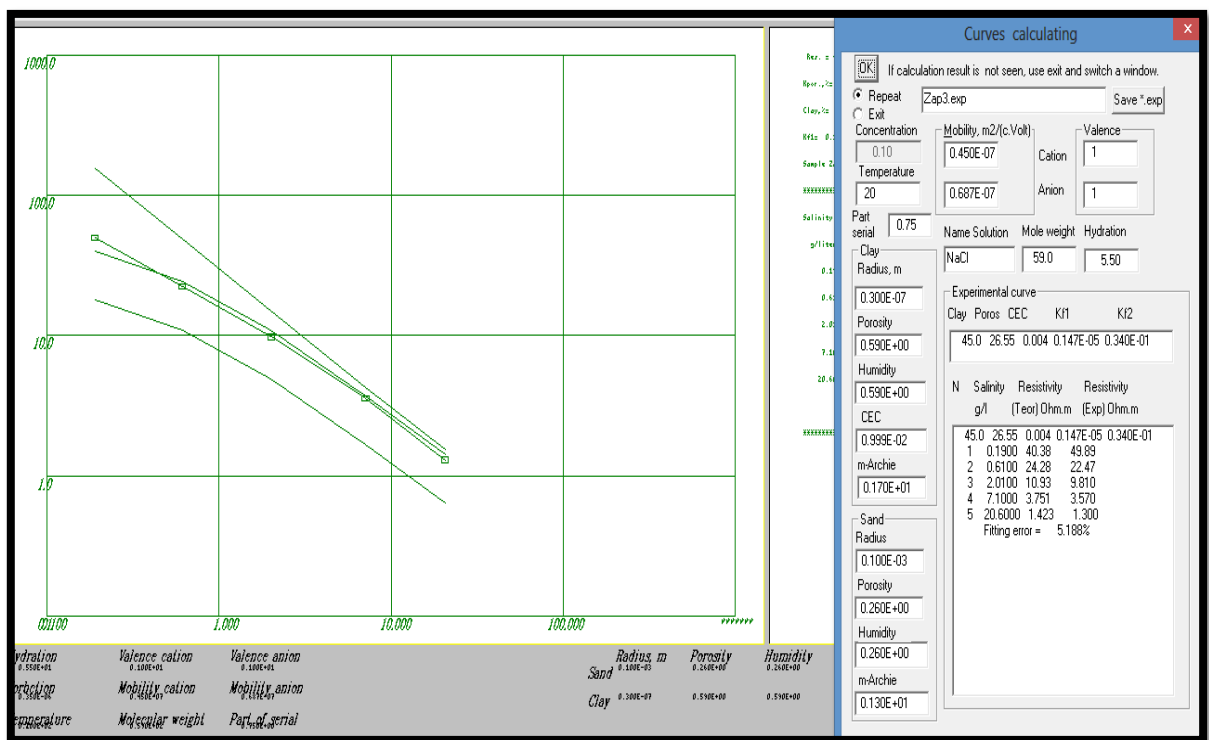


Figura 49. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata 3 ajustado a la técnica de Bouyoucos.

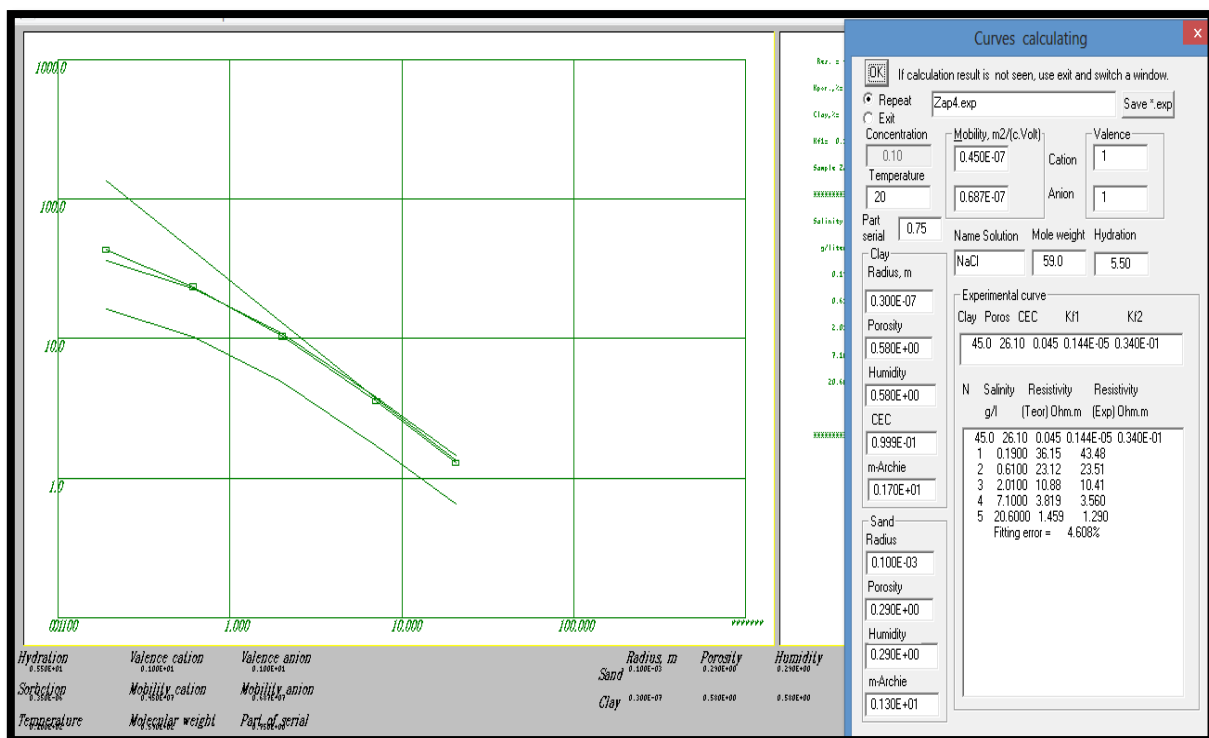


Figura 50. Modelo teórico PetroWin muestra Zapata 4 ajustado a la técnica de Bouyoucos.

Anexo 4. Tablas de adquisición de datos, resistividad aparente determinada con Calicatas Eléctricas Wenner ($K= 3.14159$) y humedad para los perfiles 1 al 4.

Tabla 18. Perfil 1 CE y humedad.

Perfil 1			
Dist (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)	Hum (%)
0	20.77	65.25	7.5
25	20.36	63.96	7.6
50	23.24	73.01	7.9
75	18.94	59.50	8.8
100	26.75	84.04	10.3
125	21.55	67.70	7.9
150	25.1	78.85	9
175	29.5	92.68	11.4
200	26.5	83.25	14
225	20.66	64.91	10.9

Tabla 19. Perfil 2 CE y humedad.

Perfil 2			
Dist (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)	Hum (%)
0	24.54	77.09	13.7
25	24.05	75.56	9.5
50	28.8	90.48	9.3
75	28.1	88.28	10.3
100	25.03	78.63	9.8
125	27.2	85.45	13.2
150	28	87.96	9.5
175	21.27	66.82	9.7
200	28.3	88.91	10.9
225	23.99	75.37	13.5

Tabla 20. Perfil 3 CE y humedad.

Perfil 3			
Dist (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)	Hum (%)
0	30.6	96.1327352	9.5
25	27.6	86.7079572	13.5
50	25.4	79.7964534	10.2
75	23.39	73.4818522	12.7
100	22.25	69.9004365	10.6
125	21.18	66.5389324	10.3
150	29.57	92.8968948	9.3
175	26.43	83.0322938	11
200	21.11	66.3190209	11.3
225	31	97.3893723	9.5

Tabla 21. Perfil 4 CE y humedad.

Perfil 4			
Dist (m)	R (Ohm)	Rho a (Ohm.m)	Hum (%)
0	32.4	101.79	16.3
25	25.2	79.17	13.6
50	25.85	81.21	16.1
75	27.83	87.43	13.1
100	29.64	93.12	13.9
125	17.52	55.04	12.7
150	25.77	80.96	13.8
175	21.6	67.86	11.9
200	24.4	76.65	10.8
225	26.09	81.96	10.2
250	20.33	63.87	10.9