



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA

Maestría en Ciencias en Conservación y
Aprovechamiento de Recursos Naturales
Ingeniería

**“Estudio de resistividad eléctrica en un valle aluvial
para adecuar los sistemas de puesta a tierra”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
P R E S E N T A :

Francisco Reyes López

Director de Tesis: Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 23 del mes de junio del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **“Estudio de resistividad eléctrica en un valle aluvial para adecuar los sistemas de puesta a tierra”.**

Presentada por el alumno:

Reyes Apellido paterno	López materno	Francisco nombre(s)							
Con registro: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">B</td> <td style="padding: 2px 5px;">0</td> <td style="padding: 2px 5px;">6</td> <td style="padding: 2px 5px;">1</td> <td style="padding: 2px 5px;">4</td> <td style="padding: 2px 5px;">7</td> <td style="padding: 2px 5px;">9</td> </tr> </table>			B	0	6	1	4	7	9
B	0	6	1	4	7	9			

aspirante al grado de: **MAESTRO EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA
Director de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

Dr. Andrés Pech Pérez

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Dr. Juan Alejandro Vásquez Feijoo

Dr. Magdaleno Caballero Caballero

EI PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Juan Rodríguez Ramírez



COMITÉ INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR
UNIDAD OAXACA
IPN

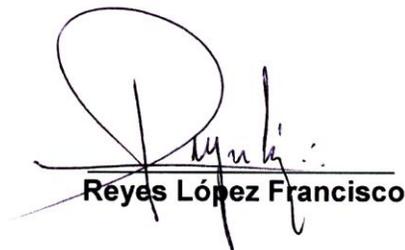


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 23 del mes junio del año 2009, el (la) que suscribe **Reyes López Francisco** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B061479**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y cede los derechos del trabajo titulado: **“Estudio de resistividad eléctrica en un valle aluvial para adecuar los sistemas de puesta a Tierra”**. Y cede los derechos al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó re53104f02@yahoo.com.mx Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Reyes López Francisco



RESUMEN

Este trabajo de investigación muestra el estudio del subsuelo aluvial de Santa Cruz Xoxocotlán usando exploración indirecta con métodos geofísicos de corriente continua (CC), piezometría y granulometría para conocer las respuestas de las resistividades de los estratos y sus espesores, sus propiedades físicas y la profundidad a la zona saturada para conocer las causas-efecto de fallas en la disipación de corrientes de descargas atmosféricas y de aislamiento en los sistemas de puesta a tierra (SPT) en el Valle de Oaxaca.

Con 22 sondeos eléctricos verticales (SEV) se determinan los cortes geoelectricos; en 16 sondeos azimutales Wenner (SAW) 8 en lluvias y 8 en estiaje se conocen los valores de anisotropía su distribución y variación con la humedad; con piezometría se obtuvo la distribución del nivel piezométrico de 6 pozos en estiaje y lluvias obteniéndose los cambios respectivos de la dirección del flujo subterráneo del agua; con granulometría se obtuvieron las características de los agregados sus tamaños y distribución en el subsuelo. Se contrastan los datos obtenidos infiriendo en ellos las causas-efecto, de los (SPT) determinándose las adecuaciones de seguridad a los usuarios y equipos que operan.

Palabras clave. Disipación de corrientes, descargas atmosféricas, cortes geoelectricos, (SPT), (SEV), (SAW), piezometría.

SUMMARY

This study research shows the work done in the subsoil of the aluvial Valley of Santa Cruz Xoxocotlán based on geophysical methods of piezometry CC and granulometry. This study was to know the responses of the stratum resistivities and thicknesses, its physical properties and depth to the saturated zone, thus identify the causes and effects of failures on the dissipation of atmospheric flows and isolation in the systems set into land (SPT) in the valley of Oaxaca.

Twenty two vertical electrical soundings SEV determine the geoelectric cuts, sixteen Wenner azimuthal soundings (SAW), eight in ram season and eight soundings in dry season are done to know the distribution of values of anisotropy and its variation with humidity. The distribution of the piezometric level of six wells in dry and ram season with the respective changes in direction of underground water flow was obtained with the piezometry method. The characteristics of the aggregate sizes, distribution and behavior in the subsoil were obtained with the granulometry method. The obtained dates are contrasted inferring on them the causes and effects of SPT on them thus, stating the appropriate safety adjustments to the users and operating equipment.

Key words: flows dissipation, atmospheric discharges, geoelectrical cuts, (SPT), (SEV), (SAW), piezometry.

AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Politécnico Nacional** por haberme brindado las facilidades para la elaboración de mi tesis “Estudio de resistividad eléctrica en un valle aluvial para adecuar los sistemas de puesta a tierra”.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT), por el apoyo brindado en la beca otorgada.

En especial al **Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez** por brindarme su amistad y la oportunidad de compartir sus experiencias, además de los conocimientos compartidos y sobre todo por el apoyo recibido a lo largo de la elaboración de este trabajo.

Al honorable comité tutorial y jurado integrado por: **Dr. Andrés Pech Pérez, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Dr. Juan Alejandro Vásquez Feijoo y Dr. Magdaleno Caballero Caballero** por las atenciones, consejos, sugerencias y recomendaciones para el mejoramiento de este trabajo.

Al **Dr. Juan Rodríguez Ramírez**, por su valioso apoyo para la realización de esta tesis.

Al personal del **CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca**:

Ing. José Luis Montes Bernabé, al Dr. Pastor Matadamas Ortiz, Ing. Calletano Serrano Blanco, M en C. Margarito Ortiz Guzmán; M. en C. Luis Silva Santos; Dr. Carlos Martínez Álvarez; Ing. Vicente Ríos Olivera; Ing. Rodolfo Martínez y Cárdenas; MC. Elia Méndez García, Sra. María Rosario Enrique Leyva; Hipólito Hernández Pérez; Alicia; Enrique Fresco y colaboradores en el Sindicato no docente del Centro; a todos los compañeros del personal docente del CIIDIR-Oaxaca y a todos los compañeros de Servicios Generales, en general a todos mis compañeros de trabajo en el CIIDIR.

A mis compañeros de generación: **Alberto Bortoloti, Ebert Zepulveda Escalera, Martha Jiménez Castalleda, Isaí Hernández, Armando José José, María León Yescas y a todos mis compañeros** por su amistad, paciencia, apoyo y comprensión que tuvieron conmigo en este caminar.

DEDICATORIAS

Este documento es un tributo a **Dios**, por el regalo y privilegio de su presencia en todos mis amigos, seres queridos, maestros y todos aquellos que aún sin creer en él son presencia viva suya.

A mi esposa Emma; a mis hijos Judith, Juan Pablo y Francisco Javier.

A la memoria de mis padres Celestino Reyes Hernández y Refugio López Lara.

A mis amigos muy queridos Francisco Morales y Yadgar Gómez; Arturo, Ivan y Uxmal.

ÍNDICE GENERAL

	PÁG.
Planteamiento de la Investigación	
Introducción.....	2
Planteamiento del problema.....	3
Justificación.....	6
Objetivos.....	7
General.....	7
Particulares.....	7
Antecedentes.....	8
Hipótesis.....	13

CAPÍTULO I. Marco Conceptual

1.1. Propiedades de las rocas.....	15
1.1.1 Resistividad eléctrica.....	16
1.1.2. Potencial eléctrico.....	18
1.1.3 Isotropía y anisotropía.....	19
1.1.4. Dispositivos electródicos.....	20
1.1.5. Dispositivo Schlumberger.....	21
1.1.6. Dispositivo Wenner.....	21
1.2. Piezometría.....	22
1.3. Granulometría de materiales aluviales.....	23
1.3.1. Minerales arcillosos.....	24
1.4. Sistemas de puesta a tierra.....	25
1.4.1. Peligro de contacto con la corriente eléctrica.....	26
1.4.2. Descargas atmosféricas.....	31
1.4.3. Instalaciones de SPT.....	32
1.4.4. Dispersores a tierra.....	34
1.4.5. Tipos de sistemas de puesta a Tierra.....	35

CAPÍTULO II. Marco Teórico

2.1 Variación de la resistencia con la temperatura.....	38
2.2.1 Anisotropía en la zona no saturada.....	38

2.2.2 Porosidad en la zona no saturada.....	39
2.2 Fundamentos teóricos de la exploración eléctrica.....	40
2.2.1 Impedancia Z.....	41
2.2.2 Método de resistividad de corriente continua (CC).....	41
2.3.3 Dispositivo Schlumberger.....	45
2.3.4 Sondeo eléctrico vertical (SEV).....	47
2.2.5 Campo de fuente puntual en medio homogéneo.....	51
2.2.6 El trazo y exposición de LT.....	55
2.2.7 La conexión a Tierra en LT	57
2.2.8 La respuesta de resistividad	58

CAPÍTULO III. Metodología

3.1 Ubicación geográfica del estudio.....	60
3.2 Desarrollo metodológico.....	61
3.3 Desarrollo metodológico del sondeo eléctrico vertical Shlumberger (SEV).....	64
3.3.1 Materiales y equipo.....	65
3.3.2. Trabajo de campo.....	65
3.3.3 Toma de datos de (SEV).....	66
3.4 Sondeo Wenner Azimutal.....	69
3.4.1 Materiales y equipo.....	70
3.4.2 Trabajo de campo.....	71
3.4.3 Toma de datos.....	71
3.5 Piezometría.....	73
3.5.1 Materiales y equipo.....	73
3.5.2 Trabajo de campo y toma de datos.....	74
3.6 Granulometría.....	75
3.6.1 Materiales y equipo.....	75

CAPÍTULO IV. Resultados y Discusión

4.1 Gráficos de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	78
4.2 Perfiles de los cortes geoelectricos.....	87
4.2.1 Discusión (SEV).....	92
4.3 Resultados de los sondeos Wenner azimutales.....	95

4.3.1. Índices de anisotropía.....	96
4.3.2 Distribución de Índices de anisotropía.....	97
4.3.3 Distribución de los Índices de Anisotropía en perspectiva.....	102
4.3.4 Discusión de resultados de los sondeos Wenner azimutales.....	104
4.4 Resultados de piezometría.....	107
4.4.1 Distribución de niveles piezométricos.....	108
4.4.2 Variación de niveles piezométricos.....	109
4.4.3 Discusión de piezometría.....	111
4.5 Resultados y discusión de granulometría.....	111
4.6 Discusión de correlación.....	113

CAPÍTULO V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones.....	117
5.2 Recomendaciones.....	119
 BIBLIOGRAFÍA.....	 120

ANEXOS

ANEXO 1: La NOM-001- SEDE-1999.....	125
ANEXO 2: Gráficos de sondeos azimutales Wenner.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variables de respuesta del suelo a un SPT.....	4
Figura 2. Capas concéntricas de material rocoso de la tierra.....	15
Figura 3. Relación entre la resistividad y una solución de NaCl y su concentración en el agua.....	18
Figura 4. Textura del esqueleto mineral de una roca: a) isótropa, b) anisótropa.....	20
Figura 5. Dispositivos electródicos a) simétrico tetraelectródico AMNB; b) trielectródico AMN.B $\rightarrow\infty$ c) bielectródico AM,N $\rightarrow\infty$,B $\rightarrow\infty$	21
Figura 6. Emplazamiento para toma de datos y gráfico de un arreglo Azimutal Wenner.....	22
Figura 7. Descarga eléctrica en el cuerpo humano por defecto de Aislamiento.....	28
Figura 8. Defecto de aislamiento en un equipo eléctrico.....	28
Figura 9. Protección a las personas y al equipo eléctrico.....	29
Figura 10. Peligro de contacto por descarga atmosférica.....	31
Figura 11. Puesta a tierra elemental	33
Figura 12. Electrodo de puesta a tierra múltiple	34
Figura 13. Estudios geofísicos con métodos de cc para limitar descargas atmosféricas en líneas de transmisión	36
Figura 14. Gráficos de azimutales Wenner de una zona vadosa.....	38
Figura 15. Dispositivo tetraelectródico para el trabajo por el método de resistividad.....	42
Figura 16. Dependencia de ρ_{α} del carácter del corte geoelectrico. Medio: a) homogéneo, b) cuerpo buen conductor, c) cuerpo mal conductor	44
Figura 17. Dispositivo Schlumberger y su valor de K.....	46
Figura 18. Cortes geoelectricos. a) de dos capas; b) de tres capas; c) de cuatro capas	48
Figura 19. Curvas SEV a) de dos capas; b) de tres capas	48
Figura 20. Circuito con dos electrodos semiesféricos M) campo normal de una tierra puntual.....	52
Figura 21. Campo de una tierra semiesférica. Líneas I de corriente y líneas equipotenciales.....	52
Figura 22. Gráfica del potencial U y de la intensidad E de una toma de tierra semiesférica	55

Figura 23. Estimación de la atracción de rayos en función de las características orográficas y geográficas.....	55
Figura 24. Índice de atracción de rayos en función de la altura de las LT.....	56
Figura 25. Isodensidad de descargas atmosféricas a tierra	56
Figura 26. Desempeño de las líneas y torres en las descargas atmosféricas.....	57
Figura 27. Ubicación de los puntos explorados en un terreno aluvial.....	60
Figura 28. Desarrollo metodológico del proyecto en estiaje.....	61
Figura 29. Desarrollo metodológico del proyecto en lluvias.....	62
Figura 30. Dispositivo electródico Schlumberger para SEV.....	65
Figura 31. Gráfica de resistividad aparente en Ωm contra $AB/2$ en metros.....	68
Figura 32. Gráfica de resistividad aparente y modelo propuesto en Ωm	69
Figura 33. Dispositivo electródico Wenner azimutal y su emplazamiento	70
Figura 34. Secuencia metodológica para obtención de los datos de granulometría y los equipos usados	66
Figura 35. Perfil geológico 1 SEV: 15, 1, 4, 16, 5, y 14.....	87
Figura 36. Perfil geológico 2 SEV:3, 2 y 1.....	88
Figura 37. Perfil geológico 3 SEV: 3, 17, 13, 6 y 12.....	89
Figura 38. Perfil geológico 4: SEV: 12, 11, 10 y 9.....	90
Figura 39. Perfil geológico 5: SEV: 10, 7, 8 y 22.....	91
Figura 40. Promedios de resistividades y espesores de suelos no modificados.....	93
Figura 41. Efecto de una descarga atmosférica y comportamiento de los estratos...	94
Figura 42. Distribución de índices de anisotropía para $a = 1$	97
Figura 43. Distribución de índices de anisotropía para $a = 3$	98
Figura 44. Distribución de índices de anisotropía para $a = 6$	99
Figura 45. Distribución de índices de anisotropía para $a = 10$	100
Figura 46. Distribución de índices de anisotropía para $a = 20$	101
Figura 47. Perspectiva de estratos y distribución lateral en estiaje.....	102
Figura 48. Perspectiva de estratos y distribución lateral en lluvias.....	103
Figura 49. Distribución de niveles piezométricos en estiaje.....	108
Figura 50. Distribución de niveles piezométricos en lluvias.....	109
Figura 51. a) Mapa piezométrico del área de estudio, b) dirección de flujo subterráneo en esteaje, y c) dirección de flujo subterráneo en épocas de lluvias	110

Figura 52. Curva de distribución de granulometría del medio.....	112
Figura 53. La zona saturada es el lugar propicio de conexión para los SPT en el valle aluvial de Santa Cruz Xoxocotlán.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de la resistividad de los minerales principales que constituyen las rocas y menas.....	17
Tabla 2. Clasificación granulométrica en tamaños de partículas.....	23
Tabla 3. Correspondencia entre resistividad eléctrica y textura de los sedimentos no consolidados.....	25
Tabla 4. Efectos de la tensión eléctrica en el cuerpo humano.....	27
Tabla 5. Contacto del cuerpo humano por defecto aislamiento.....	30
Tabla 6. Espaciamientos de AB/2 para 60 m con valores respectivos de MN, I , κ y ρ_a	67
Tabla 7. Datos de campo de azimutales Wenner	72
Tabla 8. Valores de λ en temporada de lluvias obtenidas en el valle aluvial.....	96
Tabla 9. Valores de λ en temporada de estiaje obtenidas en el valle aluvial.....	96
Tabla 10. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 1.....	104
Tabla 11. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 2.....	104
Tabla 12. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 3.....	105
Tabla 13. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 4.....	105
Tabla 14. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 5.....	105
Tabla 15. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 6.....	106
Tabla 16. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 7.....	106
Tabla 17. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 8.....	106
Tabla 18. Datos piezométricos del área bajo estudio (valle aluvial de Santa Cruz, Xoxocotlán)	107
Tabla 19. Variación del nivel piezométrico de lluvias a estiaje.....	109

ABREVIATURAS

ASNM	Altura sobre el nivel del mar.
CFE	Comisión Federal de Electricidad.
SPT	Sistemas de Puesta a Tierra.
STF	Sistema de tierra física.
RPAT	Resistencia para aterrizar a tierra.
INDECO	Instituto de la Vivienda.
CEBTIS	Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
NOM-001-SEDE-1999	Norma Oficial Mexicana 001 de la Secretaría de Energía 1999
SEV	Sondeos eléctricos verticales.
SAW	Sondeo azimutal Wenner.
CC	Corriente continua.
SER	Secuela de etapas y estudios de resistencia.
LT	Líneas de Transmisión.
Ng	Densidad de rayos a tierra.
ρ	Resistividad.
ρ_a	Resistividad aparente.
λ	Índice de anisotropía.
Ωm	Ohm-metro. Unidad de resistividad.
γ	Conductividad eléctrica.

Planteamiento de la investigación

Introducción

El desarrollo de conocimientos científicos y tecnológicos en electricidad y electrónica han permitido avanzar en la aplicación y perfeccionamiento de innovaciones tecnológicas con la solución de problemas que generan nuevos conocimientos técnicos y materiales para el adecuado aprovechamiento de la energía y de los recursos naturales.

En este contexto la energía eléctrica ha jugado un papel de gran importancia en la actual civilización industrial. Sin ésta la vida moderna se vería seriamente afectada en todos los sitios de trabajo donde participa la electricidad y los riesgos propios de su uso y manejo. El número de accidentes por el uso y manejo de la energía eléctrica ha crecido en relación directa al progreso económico y social, ocasionando muertes, invalidez, indemnizaciones, pensiones, baja producción y costos extras de equipo, (De la Vega, 2002).

En el aprovechamiento y manejo de la energía eléctrica, todos los equipos eléctricos y partes metálicas relacionados con éstos deben conectarse a Tierra a fin de que ofrezcan un camino de baja impedancia a las corrientes eléctricas de falla, facilitando el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes y pueda usarse la energía eléctrica en forma eficiente y segura (NOM-001-SEDE-1999)

Este trabajo presenta primeramente el planteamiento de la investigación; en el primer capítulo contiene el marco conceptual; el marco teórico en el segundo; en el tercero la metodología; en el cuarto los resultados y discusión; en el quinto las conclusiones y las recomendaciones. Finalmente se presenta la bibliografía y los anexos.

Planteamiento del problema

La utilización del servicio de energía eléctrica se ha convertido en uno de los servicios fundamentales, aumentando constantemente la demanda-producción internacional, nacional y regional (CFE, 2007).

En el uso de la electricidad los sistemas de puesta a tierra (SPT) presentan riesgos a las personas y sus equipos que operan cuando la resistividad del subsuelo es alta e impide la disipación eficiente a tierra de corrientes de falla de los sistemas eléctricos y de las descargas atmosféricas (De la vega 2002).

En el valle aluvial de Oaxaca son intensas las tormentas eléctricas al inicio de las lluvias. Para investigar este fenómeno y la respuesta eléctrica del subsuelo se eligió el valle aluvial de Santa Cruz Xoxocotlán para determinar la confiabilidad o ineficiencia de los (SPT). En junio de 2004 una descarga atmosférica destruyó equipos de cómputo en las instalaciones del CIIDIR IPN U Oaxaca. El sistema eléctrico y el de cómputo tienen (SPT) por separado. El voltaje de servicio del sistema en los dos transformadores delta estrella oscila en 127 y 220 voltios. Los registros de la red exterior de distribución de energía eléctrica se inundan en temporada de lluvias; este problema es común en la Universidad La Salle y otras instituciones vecinas.

Los pozos de agua de los habitantes del Fraccionamiento INDECO, se inutilizaron por la progresiva profundización del nivel estático, este fenómeno es manifestación de ausencia de humedad del subsuelo por escasa infiltración al acuífero de agua contaminada del río Atoyac que transporta aguas residuales de los desechos humanos en el Valle de Oaxaca. Belmonte (2003, 2005).

Los SPT no son confiables por causas atribuibles a los estratos del subsuelo aluvial del que es necesario conocer las propiedades; naturaleza, agregación granular y textura de los estratos con sus resistividades y espesores en el medio geológico tanto en temporada de secas como en lluvias, así como la profundidad al nivel freático (Belmonte 2003, 2005), (Steinich, 1997), (Soto, 1999).

Para la protección contra descargas atmosféricas, entran en juego, las características orográficas y geográficas de la región, influyen la densidad de rayos a la tierra y es el suelo y su respuesta de resistividad la solución para la dispersión de corrientes de alta intensidad (CFE., 2007), (De la Vega, 2002).

Las respuestas de resistividad de un suelo a los SPT dependen de las condiciones del medio, esquematizada en la figura 1.



Figura 1. Variables de respuesta del suelo a un SPT.

En la figura 1 el medio en el que se dispersan a tierra las corrientes de descargas atmosféricas o de falla de un sistema eléctrico para referenciar todo potencial eléctrico a cero es en el suelo. La resistividad es la oposición al flujo de las corrientes y es una respuesta de las propiedades y constitución cambiante a cada centímetro o metro del suelo (González, 1980).

En temporada de lluvias el contenido de electrolitos disueltos aumenta la conductividad y disminuye la resistividad en función de la temperatura y precipitación pluvial; este efecto es totalmente contrario en temporada de secas o estiaje. Sin embargo en ambos casos los minerales constituyentes del suelo determinan por presencia de humedad las propiedades de respuesta del suelo, puede observarse como la extracción masiva del agua en un suelo aluvial poroso puede ser un factor determinante en la interrelación de la respuesta de resistividad del medio (suelo), así como las propiedades particulares de cada estrato (Abdelhady, 2004).

Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2007) establece para sus líneas de transmisión los elementos principales que juegan un papel relevante para el diseño de los SPT o Sistema de Tierra Física (STF) en apego a la Norma Oficial mexicana (NOM-001-SEDE-1999) que determina fundamentalmente la seguridad a las personas, seguridad a equipos que operan y la referencia de petición de 10 Ω m. Estableciendo:

- ▶ Investigar las características del sistema.
- ▶ Medir la resistencia eléctrica del sistema de tierra física (STF) en dos etapas.
- ▶ Obtener la resistividad del medio geológico (uno de los parámetros de mayor influencia para el buen desempeño de un (SPT) o (STF).
- ▶ Obtener la resistividad del medio geológico (uno de los parámetros de mayor influencia para el buen desempeño).
- ▶ Tener en cuenta las limitaciones (orografía, medio geológico y dimensión del área).
- ▶ Seguimiento anual (índice de salidas por descargas atmosféricas).

Dos parámetros son importantes para diseñar o modificar un (Sistema de Tierra Física): la resistividad del medio geológico y la resistencia del sistema de puesta a Tierra (CFE, 2007).

Por lo que es fundamental investigar la resistividad del medio geológico para conocer las causas de destrucción de equipos en junio de 2004 y en base a los resultados obtenidos plantear las correcciones a los sistemas de puesta a Tierra que son extensivos al valle de Oaxaca al ser un suelo de similar depositación; con resistividades y propiedades de estratos equivalentes en profundidad, concentración de químicos y sales, contenido de humedad, temperatura, tipo de grano y tamaño, edad del medio geológico, contaminación del río Atoyac y del acuífero, (De la Vega 2002), Belmonte, (2003-2005).

Justificación

Este trabajo de investigación pretende estudiar y caracterizar la respuesta de resistividad eléctrica del valle aluvial de Oaxaca en Santa Cruz, Xoxocotlán usando los métodos geofísicos de resistividad de (CC) en su variante de sondeo eléctrico vertical (SEV) sondeos azimutales Wenner (SAW), así como características hidrogeológicas con piezometría y granulometría en temporada de estiaje y lluvias; para inferir las causas que han generado la destrucción de equipos de cómputo en el CIIDIR-IPN U. Oaxaca por descargas atmosféricas, de falla y variaciones del voltaje de servicio en las instalaciones eléctricas.

El problema se presume imputable al suelo debido a su naturaleza y propiedades así como a la profundización progresiva de la humedad por la extracción cada vez más intensa y extensa del agua subterránea en la zona, que ha elevado la resistividad de los estratos subyacentes y han hecho ineficientes los SPT generando situaciones de riesgo a las personas y equipos que utilizan la energía eléctrica como a quienes dan mantenimiento al sistema eléctrico, (González, 1980); (De la Vega, 2002); (CFE, 2007).

Todas las instalaciones eléctricas se deben conectar intencionalmente a Tierra (SPT) en un área del terreno, y deben proteger a las personas contra choques eléctricos al limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de fenómenos de inducción o cargas electrostáticas de equipos, fallas de aislamiento con cables conductores de corriente, protegiendo la operación de los equipos eléctricos y electrónicos estabilizando la tensión eléctrica a tierra durante su funcionamiento normal en forma eficiente son la justificación de este trabajo, (NOM-001 SEDE-1999), (CFE, 2007).

Los (SPT) se basan en conceptos de geofísica tradicionales pero su aplicación puede ser muy compleja ya que cada instalación es única en su localización y tipo de suelo. Conocer los elementos geológicos es de capital importancia para la seguridad personal, social y económica de los seres humanos en el uso y manejo de la energía eléctrica y su relación con la respuesta del suelo, (Soto, 1999).

Objetivos

General

Determinar las características geoelectricas del subsuelo y su relación con la piezometría, para evaluar la disipación de corrientes eléctricas en los SPT en un valle aluvial.

Particulares

1. Obtener perfiles geoelectricos del subsuelo a partir de SEV_s para inferir profundidades de estratos geológicos.
2. Determinar los índices de anisotropía partir de mediciones geoelectricas para inferir la variación de la anisotropía.
3. Determinar los niveles piezométricos en estiaje y lluvias para conocer la dirección del flujo del agua subterránea.
4. Conocer las propiedades de los estratos y su relación con los SPT.

Antecedentes

Para el soporte de este trabajo de investigación se efectuó una revisión de temas concernientes a sistemas de puesta a Tierra y su importancia para la seguridad de las personas y sus bienes. En el campo del conocimiento respecto al valle aluvial de Santa Cruz Xoxocotlán no existe información documentada respecto al tema de estudio. Sin embargo, la problemática que encierra las características del suelo guió la investigación documental incluyendo legislación y normas, (NOM-001-SEDE-1999), (CFE, 2007), (Soto, 1999).

Se revisó información de estudios respecto a suelos y sus propiedades de respuesta al paso de la corriente a tierra en donde se usaron métodos geofísicos de corriente continua (CC) que son una herramienta fundamental para el análisis de la respuesta de resistividad del suelo y son inofensivos al medio ambiente y sensibles a la variación de la humedad en temporada de estiaje y lluvias; reflejan información en la recarga de acuíferos a través del nivel freático de los pozos de agua, (Belmonte, 2003-2005), (Steinich, 1997) (Zapata, 2001).

(Ramos et al, 2007) reportan los resultados de la interpretación geométrica del acuífero y la evolución tectónica de la cuenca hidrogeológica de San Luis Potosí-Villa de Reyes, mediante el empleo del arreglo Schlumberger de sondeos eléctricos verticales, determinando la conformación por sedimentos clásicos del Cenozoico tardío, además de identificar dos tendencias lineales georesistivas en direcciones N-S y NE-SW, controladas por anisotropías estructurales en rocas que limitan al valle. Las resistividades (ρ) encontradas oscilan en el rango de 67 a $> 500 \Omega\text{m}$, además de valores bajos asociados a lechos rocosos fracturados o alterados con presencia de agua. Esto permitió identificar zonas en el subsuelo potenciales a fracturas que al propagarse hacia la superficie afecten obras civiles.

Así mismo Bakkali (2006) efectuó un estudio con el objeto de evaluar el potencial hídrico mediante el método eléctrico (SEV) en la provincia de Tafroute Marruecos. Dicho arreglo consistió en dos direcciones en paralelo a la fuente de agua de Este a Oeste, adquiriendo las medidas de resistividad aparente. Los resultados

obtenidos permitieron deducir seis capas caracterizadas por resistividades correspondientes a cinco formaciones geológicas de carácter litológico con resistividades del orden de 727-860 Ωm para aluviones secos, 156 Ωm aluviones acuíferos, 93 Ωm esquistos alterados, 130 Ωm esquistos fracturados y 750 Ωm esquistos sanos. Estos resultados brindan la posibilidad de inferir que las variaciones espaciales confieren a la cuenca acuífera una forma lenticular alargada, con una alimentación de aguas por esorrentía como por fallas y fracturas que detrimentan a las cuarcitas y a los esquistos.

Por otra parte, Zapata (2001) estudió la prospección de aluvión para explotación de materiales pétreos en la región del río Medellín, en Colombia, empleando una red de sondeos eléctricos verticales espaciados a cada 100 metros. Este estudio determinó los perfiles stratigráficos, además de la relación espesor-material de descapote / material granular y la litología. Estos estudios fueron soportados por observación geológica e interpretación y caracterización de curvas geoelectricas y registros fotográficos de exploración. Los datos obtenidos contribuyeron a identificar que el modelo geoelectrico presenta incertidumbres por los bajos valores de resistividad correlacionados a arcillas, ocasionados por la participación de sales minerales presentes en las aguas subterráneas. Para tal fin, se obtuvieron los factores de formación (F_m) < 2 asociados a arcillas, y de 2 a 5 para arenas y gravas. La resistividad adquirida en las arcillas fue de 15-85 Ωm , grava fina y arena gruesa limpia, cuarzosa, parcialmente saturada 200-450 Ωm y grava y arena limpia cuarzosa seca de 700-1300 Ωm . Estos datos permitieron determinar que la producción y vida útil de la mina es de 50 000 m^3/mes para un período de 14.73 años. Del mismo modo, determinó el riesgo de explotación de acuíferos con profundidades entre 210 y 300 metros.

Ballester (2001) evaluó el proceso de contaminación de acuíferos someros por la infiltración de sustancias químicas con predominancia de cobre, empleando la prospección geofísica y sondeos eléctricos verticales aplicando el método AVI (Aquifer Vulnerability Index) de vulneración acuífera. Esto permitió definir el modelo electrostratigráfico hasta una profundidad de 20 m, delimitando presencia

de cuerpos arcillosos con electrolito y horizontes arenosos a profundidades de 10 metros. Los planos de isorresistividad diferenciaron a $1.0 \Omega\text{m}$, correlacionables con estratos altamente saturados de electrolitos y con resistividades de $20 \Omega\text{m}$ con menor área de contaminantes. Los indicadores de conductividad hidráulica en el acuífero superior están en el rango de 1.5 E-6 y 5 E-9 m/s. En depósitos piroclásticos se obtuvieron del orden de 3.6 E-6 a 2.1 E-5 m/s. Los depósitos fluviolacustres, de 4.9 E-6 a 1.7 E-4 m/s; y, en medios fracturados para rocas volcánicas se identifican transmisividades de 8.6 E-5 a $0.14 \text{ m}^2/\text{s}$. Estos indicadores permitieron concluir que la prospección geofísica presenta electroestratigrafías delimitadas por cuerpos arcillosos y horizontes arenosos con intercalaciones de limos y gravas. Además, se definieron tres grados de vulnerabilidad acuífera con rangos de 2 a 4 días.

Asimismo, Soto (1999) estudió los sistemas de puesta a Tierra en la costa Atlántica mediante los criterios de Koch y Schwartz con catalizadores artificiales. Los resultados arrojaron que en los cerros las resistencias presentaron valores promedio de 20Ω , lo cual no se ajustaba al valor de diseño. Esto propició un replanteamiento mediante la incorporación de dominio de energía por almacenamiento, obteniendo resistencia de puesta a Tierra de $R(\text{SPT}) < 50 \Omega$, además de identificar la incongruencia entre mallas pequeñas y mallas de mayores dimensiones. Esto permitió advertir que los métodos convencionales de Koch y Schwartz, basados con IEEE 80 (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. para asistencia y asesoría privada en USA), no son acertados para líneas de transmisión en alta tensión en los cerros en general. Soto propone una nueva metodología en periodo experimental con el método del dominio de energía por almacenamiento basada en las características conductoras del terreno tomándolo como un todo

Carn (1990) estudió la prospección eléctrica fluvioglacial, incorporando sondeos eléctricos verticales para determinar la distribución vertical de la resistividad, estableciendo una red cuadrada de 500 m de malla. La interpretación de los SEV's se realizó mediante el catálogo "Standard Graphs for resistivity prospecting. Los

resultados arrojados del estudio revelaron la determinación de la geometría y las formaciones recientes con espesores de inferiores a 150 m, además de contrastes litológicos entre las formaciones, los cuales permitieron distinguir conjuntos geoelectricos.

Heining (2005) menciona que la medición geoelectrica es una herramienta adecuada para mediciones en el subsuelo; sin embargo, los efectos topograficos frecuentemente son complicados en la medición e interpretación de los datos.

Por su parte, Vega (2007) encontró que para conductores a tierra pueden usarse las tuberías de agua, también menciona el problema de la corrosión en los metales por el fenómeno electroquímico que se lleva a cabo como reacción química, en la que participan especies químicas y corriente eléctrica en forma de electrones. En los procesos de corrosión se da un intercambio de especies en la superficie del sustrato, que se puede resumir en las reacciones de oxidación en medios ácidos y neutros-alcinos debido a la naturaleza electroquímica de la corrosión. Este fenómeno se ve influido por el potencial, concentración y velocidad de fluidos electrolíticos. La corrosión se incrementa por la concentración de sales diluidas en el agua acelerando la reacción química de la degradación de la tubería metálica o en los electrodos de dispersión de corrientes a tierra, que entre mas deseable es una zona de baja impedancia por su conectividad y electrolitos es mas agresiva hacia los electrodos los que requieren revisión periódica.

Taylor y Fleming (1980); (Mayer, 1984); Lane, et al. (1995) extendieron el análisis a un arreglo cuadrado no lineal. Las resistividades aparentes en $\text{ohm}\cdot\text{m}$ para cada espacio entre electrodos, obtenido por expansión del arreglo de electrodos a lo largo de cada azimut, son graficados contra el azimut en un diagrama polar. Si este es circular, entonces no hay fracturas medibles (grupos) o el volumen de roca investigada fue insuficiente (debido a que el arreglo de electrodos fue pequeño en espacio) para que la roca se comporte anisotrópicamente. Si una elipse resulta, entonces, el eje mayor de la elipse es coincidente con la orientación de las fracturas. Esto ocurre a pesar de si el fracturamiento es más o menos resistivo que la roca anfitrión.

Nunn, et al. (1983), establecen porque la resistividad a lo largo es de significado aritmético y siempre es más alta que la resistividad que cruza el fracturamiento que es maliciosamente armónico.

Debido a la paradoja de la anisotropía (Kéller y Frischknecht, 1966) la medición de la resistividad aparente normal a las fracturas es igual a la resistividad verdadera

Steinich (1997) estudio el desarrollo teórico de la respuesta de una masa de roca homogénea y anisótropa para una medición colineal de resistividad aparente en una zona vadosa de un valle aluvial con SEVs y Wenner tipo azimutales para conocer los cambios en tres décadas, que la extracción extensiva de agua en el valle ha causado una sobreexplotación aunado a la contaminación producida en la superficie que se infiltra en el acuífero. La anisotropía que se determino en la zona vadosa de ese valle fueron valores de λ entre 1.18 y 1.49 infiriéndose que la anisotropía está presente en la parte superior de la zona vadosa y que decrece con la profundidad. El medio donde estas mediciones fueron hechas son arenas poco consolidadas, las cuales, en principio, no muestran dirección preferencial. Sugieren que la anisotropía superficial podría deberse a la recarga por la irrigación del agua (infiltración). Esto implica que la zona vadosa arriba del acuífero en esta zona podría ser descrita como isotrópica con respecto a su conductividad hidráulica, excepto por anomalías superficiales como consecuencia de la infiltración del agua irrigada. Menciona Steinich que otros estudios muestran que la anisotropía eléctrica del medio podría relacionarse con el gradiente hidráulico.

González (1980) comenta respecto a la literatura técnica en cuanto a ciencias de la tierra que en la literatura técnica soviética se aprecia un afán didáctico y sistematizado con rigor en la exposición, a diferencia de las publicaciones occidentales que suelen estar protegidas por un silencio interesado. Este trabajo de caracterización de la respuesta del subsuelo a los SPT puede ser útil en relación con otros trabajos similares; sin embargo, hay que recordar que no son idénticos, porque se trata de suelos diferentes en cuanto a su origen, evolución y edad.

Hipótesis

1

Los (SPT) son ineficientes en la disipación de corrientes (I) de descarga atmosférica y de falla por la disposición y propiedades de los estratos del suelo aluvial, que impiden la conductividad eléctrica (γ) con una zona del subsuelo de baja impedancia (Z).

2

La sobreexplotación de los acuíferos ha incrementado la profundización (h) del nivel freático aumentando progresivamente la resistividad (ρ) del subsuelo en detrimento de la conductividad (γ) en los SPT.

CAPITULO I. Marco conceptual

1.1. Propiedades de las rocas

La Tierra es un cuerpo semiesférico compuesto de capas concéntricas de material rocoso, mostrada en la figura 2. La corteza superior tiene una profundidad aproximada de 30 km., el manto superior situado entre 30 y 700 km. de profundidad, el manto inferior ubicado entre 700 y 2900 km. de profundidad, las cuales envuelven a un núcleo central con un radio aproximado de 3741 km (De la Vega, 2002).

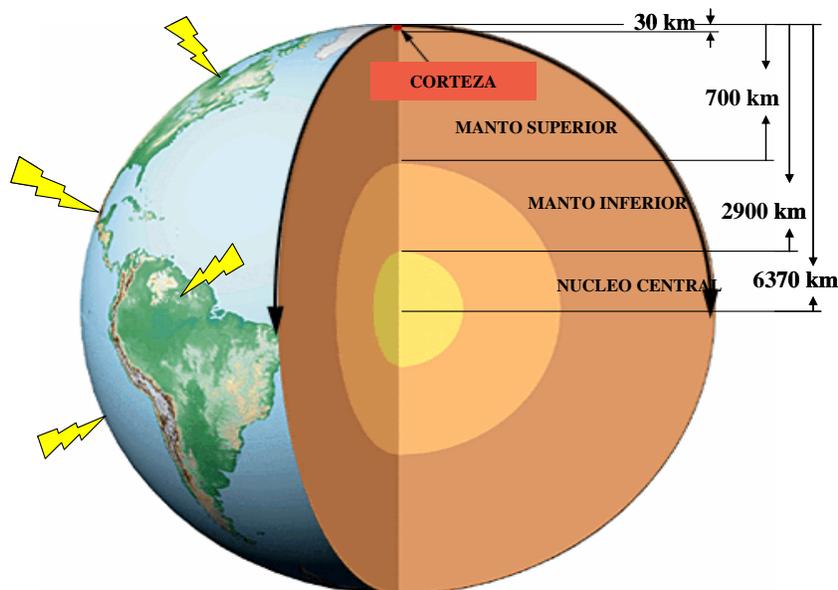


Figura 2. Capas concéntricas de material rocoso de la tierra.

Todo en la tierra es roca, en sus diferentes capas; el suelo es un material sedimentario rocoso sin consolidar producto de fenómenos de erosión de las rocas en las que tiene su origen. Como ejemplo, las arcillas son granos finos de origen rocoso que por sus propiedades mecánicas describen la forma en que el material responde a una fuerza aplicada, incluyen resistencia, rigidez, ductilidad, fatiga, termo fluencia y desgaste. Las propiedades físicas incluyen el comportamiento eléctrico, magnético, óptico, térmico, elástico y químico. (Jones, 2007), (Domínguez 1992), (Custodio 2001).

1.1 1. Resistividad eléctrica

La *resistividad eléctrica* ρ de cualquier sustancia se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene de un centímetro cúbico de esa sustancia, tomado en forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente a una de las aristas de ese cubo. Según el sistema de unidades elegido, la resistividad se mide en ohm·centímetro u ohm·metro (Ωm). En la exploración eléctrica se utiliza el Ωm por ser una unidad mayor ($1 \Omega\text{m} = 100 \Omega\text{cm}$). La magnitud inversa de la resistividad, $\gamma = 1/\rho$ se denomina *conductividad eléctrica*. Sus dimensiones se dan en siemens por metro o siemens por centímetro (Sm/m , Sm/cm), (González, 1980).

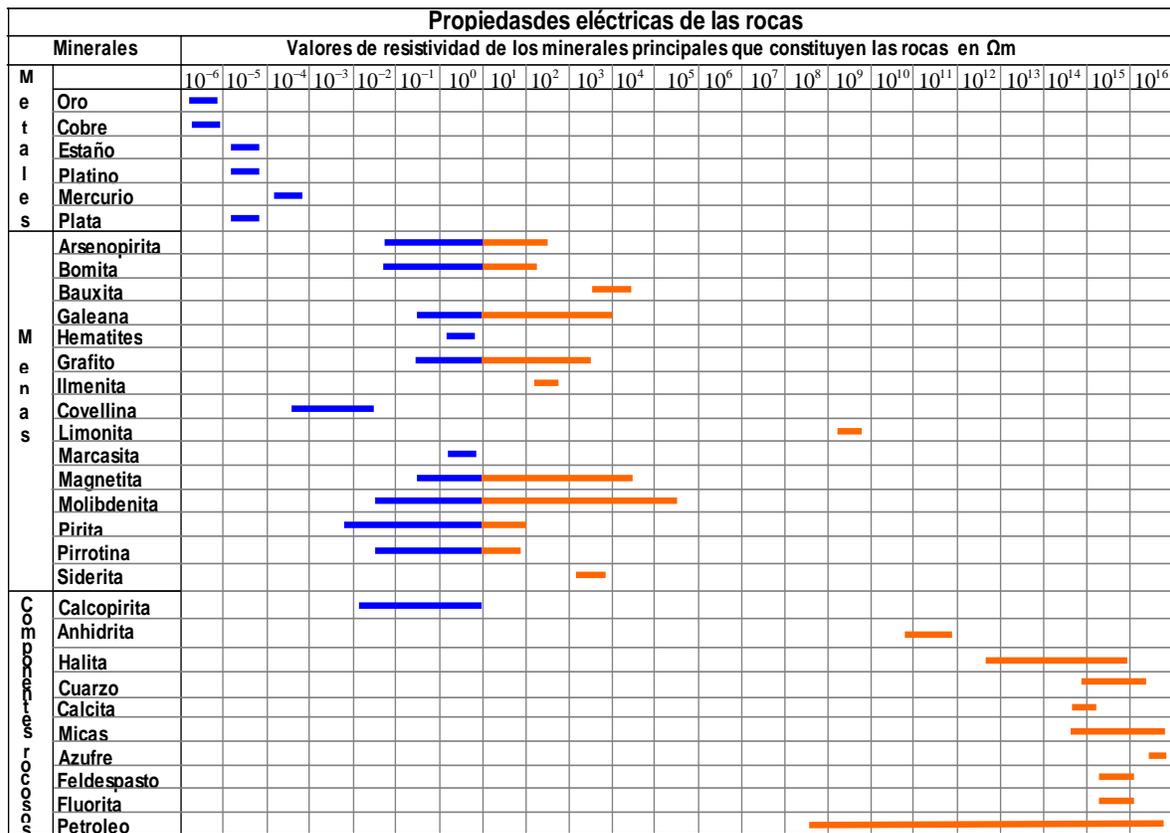
A una roca como conductor de corriente eléctrica se le puede considerar como un agregado que consta de una estructura sólida mineral de líquidos y gases. En la resistividad de un agregado influyen los siguientes factores:

- 1) la resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca.
- 2) la resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca;
- 3) la humedad de la roca;
- 4) la porosidad de la roca;
- 5) los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros;
- 6) los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral.
- 7) edad de la roca;
- 8) temperatura.

Consideremos la influencia de cada uno de estos factores. En la tabla 1 se muestran los valores de la resistividad de los minerales principales que constituyen las rocas y menas. La resistencia de los minerales constituyentes de

las rocas, entre ellos todos los minerales del grupo silicatado, es muy grande y oscila entre 10^6 y $10^{15} \Omega m$. La resistencia de los metales nativos, que poseen conductividad electrónica oscila entre 10^{-6} y $10^{-4} \Omega m$. La mayoría de las menas por el carácter de la conductancia pertenecen a los semiconductores. Entre ellas se pueden observar minerales muy conductores: (10^{-5} a $10^{-1} \Omega m$) y minerales relativamente malos conductores (10^0 a $10^5 \Omega m$), (González, 1980).

Tabla 1. Valores de la resistividad de los minerales principales que constituyen las rocas y menas. (González, 1980).



La resistividad de los fluidos que saturan las rocas puede variar entre amplios límites. En la mayoría de los casos estos líquidos son soluciones acuosas de diversas sales minerales, entre las cuales juega un papel muy importante el Cloruro de Sodio (NaCl). La resistividad del agua que rellena los poros de las rocas varía en relación inversa a la concentración de la sal en disolución. En la figura 3 está representada la curva de dependencia de la resistencia de la solución

NaCl de su concentración en escala logarítmica, en el eje Y la resistencia de la solución salina y en el eje X la concentración en gr/litro. (Custodio, 2001)

En condiciones naturales la resistencia mínima (1 ohm·m y menos) la poseen las aguas profundas fuertemente mineralizadas y también las marinas. (González, 1980)

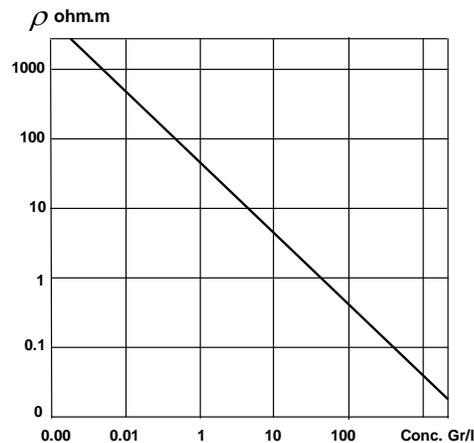


Figura 3. Relación entre la resistividad y una solución de NaCl y su concentración en el agua.

La resistencia de las aguas subterráneas oscila en función de su mineralización, entre 10^{-2} y $10^2 \Omega m$. Las resistencias muy altas (del orden de decenas y centenas de Ωm) corresponden a aguas fluviales débilmente mineralizadas: las aguas de lluvia tienen aún mayores resistencias (hasta $1\ 500 \Omega m$) a causa de su escasa mineralización. En condiciones naturales, las rocas finamente dispersas (en particular las arcillas) normalmente conducen mejor la corriente eléctrica que las rocas de grano grueso, (González, 1980).

1.1.2. Potencial eléctrico

En la tierra se genera potencial eléctrico y se diluye en la misma debido a los fenómenos que se dan en su interior, Gasulla (1999).

1. Se genera potencial eléctrico por magnetismo; la tierra es un imán gigante en movimiento.

2. Por acción química; El agua salada del mar y el agua dulce de ríos y lagos hacen de la superficie de la tierra una gigantesca pila voltaica que genera potencial eléctrico.
3. La luz del sol incide en la superficie de la tierra y el mar que hace de ella una fotocelda gigante generando diferencia de potencial eléctrico.
4. Se genera electricidad por calor en magma ígneo de la tierra que genera potencial eléctrico.
5. Por presión se genera potencial eléctrico en las placas tectónicas que están en movimiento continuo.
6. En la atmósfera entre los gases tienen un frotamiento continuo debido a la velocidad del aire y la radiación solar generan cargas electrostáticas el potencial acumulado es eliminado en las primeras lluvias a la tierra a través de las descargas atmosféricas, (Valkenburgh, 2004).

La conductividad es la inversa de la resistividad en los estratos térreos y puede ser eléctrica o electrolítica. La eléctrica es la de los metales, es decir sin transporte de iones. La electrolítica la poseen los minerales y rocas que son aisladores más o menos perfectos y deben su conductividad al agua contenida en sus poros, Su resistividad es 100,000 veces la de los metales y varía con la cantidad de agua y iones de las sales en solución, (De la Vega, 2002).

1.1.3 Isotropía y anisotropía

La relación de la resistencia de las rocas con su estructura se presenta en la figura 4 a y b. En la figura 4 se representa en forma esquemática una roca isótropa en a; en b la estructura mineral y poros tienen forma alargada. Esto lleva a que las condiciones de paso de la corriente en la roca sean distintas para las diversas direcciones.

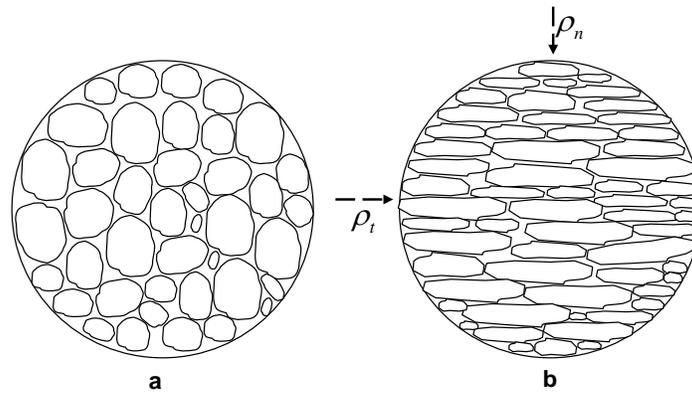


Figura 4. Textura del esqueleto mineral de una roca: a) isotrópica, b) anisotrópica.

La resistencia de tales rocas depende de la dirección, es decir, la roca desde el punto de vista eléctrico, es *anisotrópica* en la dirección designada en la Figura 4b, con la flecha de puntos ρ_n la resistividad de la roca será mayor que con la dirección coincidente ρ_t de los granos minerales y poros entre los mismos. $\rho_n > \rho_t$. Para las rocas el valor de este coeficiente varía entre 1 y 2, sólo en casos raros excede de esta magnitud, (González 1980).

Las resistividades aparentes en Ωm para cada espacio entre electrodos obtenidas por expansión del arreglo de electrodos a lo largo de cada azimut, son graficadas contra el azimut en un diagrama polar. Si éste es circular, entonces no hay anisotropía o el volumen de roca investigada fue insuficiente (debido a que el arreglo de electrodos fue pequeño en espacio) para que la roca se comporte anisotrópicamente, (Steinich, 1997).

Si se observa un patrón de múltiples picos, entonces el azimut de éstos indica que hay más de un grupo de cambio de resistividades que denotan cambios de propiedades.

1.1.4. Dispositivos electrónicos

Los dispositivos de toma de Tierra con electrodos de emisión y medición de datos para la obtención de la resistividad aparente se diferencian entre sí por el número

de electrodos y su disposición respectiva. Cada uno de los arreglos está destinado a la solución de determinados problemas geológicos. Dahlin (2000)

Los dispositivos electródicos por el número de tomas de Tierra son: *Tetraelectródicos*, *Trielectródicos* y *Bielectródicos*. Si todas las tomas de Tierra del dispositivo están situadas en una recta, el dispositivo es *rectilíneo*. Si esta condición no se cumple, el dispositivo es *no rectilíneo*.

En la figura 5 se describen estos dispositivos más utilizados y sus límites de medición. (González, 1980)

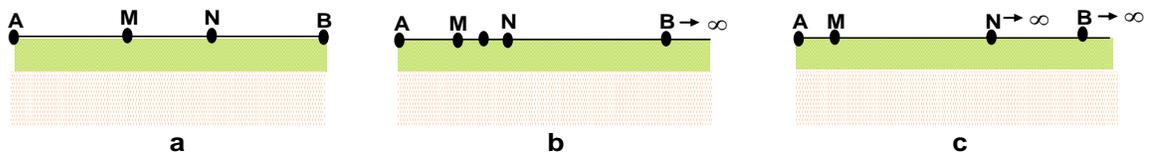


Figura 5. Dispositivos electródicos a) simétrico tetraelectródico AMNB; b) trielectródico AMN.B $\rightarrow\infty$ c) bielectródico AM,N $\rightarrow\infty$,B $\rightarrow\infty$

1.1.5. El dispositivo Schlumberger

Este dispositivo de la figura 5 (a). Es el más utilizado para obtener los perfiles geoelectrónicos y se describe el desarrollo en el apartado 2.2.4. en el capítulo del marco teórico.

1.1.6. Dispositivo Wenner

Se usan para determinar los cambios laterales de resistividad y conocer la anisotropías y cambios en las propiedades en la litología relativas a humedad, cambios en cantidad y calidad del agua en los poros de suelos de origen sedimentario. Son hechos por rotación de arreglo de electrodos 360°. Tomando mediciones en las direcciones S-N; NE-SW; E-W y SE-NW con centro común, (Bolshakov,1995, 1998a, 1998b).

Muestran la variación de las propiedades de resistividad con la orientación azimutal; los espaciamientos determinan la profundidad en función de los valores

de $MN = 1 \text{ m}$, 3 m , 6 m , 10 m y 20 m . La profundidad de sondeo para cada estrato será $1/3$ de la suma de $(AM + MN + NB)$; para $MN = (20 \text{ m})$ será: $60/3 = 20 \text{ m}$ teóricos de profundidad. Para ejemplificar en la figura 6 se muestra el procedimiento de emplazamiento y el gráfico que puede obtenerse en campo y con programas computacionales, (Busby, 2006).

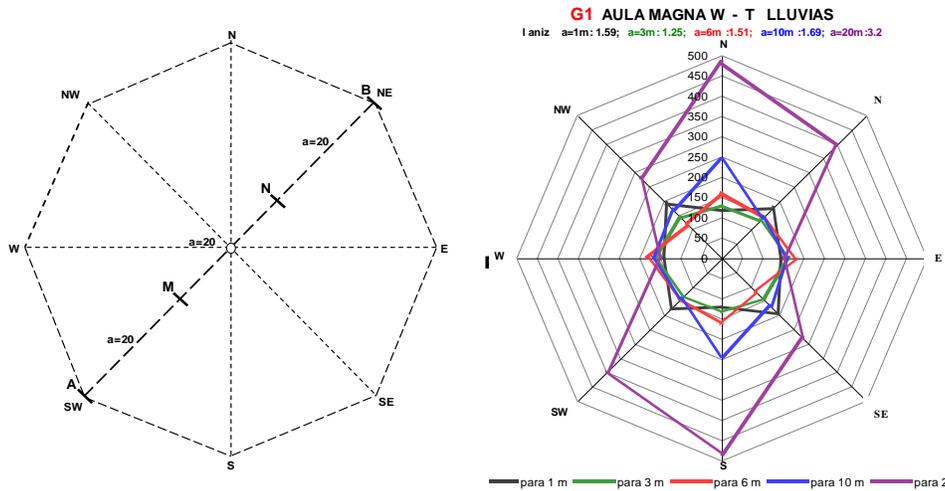


Figura 6. Emplazamiento para toma de datos y gráfico de un arreglo azimutal Wenner.

Con este tipo de arreglos se obtienen los índices de anisotropía λ en los rumbos definidos que caracterizan la excentricidad: figura 6 que es la razón entre la resistividad máxima y la mínima; valores que son de utilidad para determinar la distribución de la anisotropía por estratos del suelo bajo estudio, Schmutz (2006).

1.2. Piezometría

La piezometría integra los datos de indicadores numéricos que permiten la comparación cuantitativa de los valores hidrogeológicos, como la influencia de la explotación y detección de las variaciones naturales y estacionales de un acuífero, (Pernía y Corral, 2000).

Una serie histórica de piezometría tiene que ser lo suficientemente amplia en el tiempo como para reflejar todos los posibles tipos de eventos (periodos de lluvia, sequía, bombeos prolongados, etc), Fetter (2001).

Por medio de estos datos se obtiene una evolución temporal (mensual, anual, etc.), enmarcada entre las curvas de valores de máximos y mínimos históricos que componen la serie considerada. Ruiz (1993), esta representación nos permite obtener valores numéricos con los que se hacen comparaciones entre acuíferos o partes de un mismo acuífero, Lashkaripour (2003).

1.3. Granulometría de materiales aluviales

La técnica de granulometría hace posible el conocimiento de los agregados del suelo y permite una adecuada comprensión de sus propiedades fundamentales inherentes a su naturaleza definidas por la compacidad de los granos y su orientación, estas propiedades son decisivas para interpretar respuestas tales como resistividad, conductividad y permeabilidad de un medio granular.

La clasificación granulométrica de suelos según sus tamaños propuesta por Kopecky (1936) citada por Juárez (1985), mostrada en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación granulométrica en tamaños de partículas. Juárez (1985)

MATERIAL	CARACTERISTICA	TAMAÑO EN mm
PIEDRA	---	MAYOR DE 70 mm
GRAVA	GRUESA	30 A 70
	MEDIA	5 A 30
	FINA	2 A 5
ARENA	GRUESA	1 A 2
	MEDIA	0.2 A 1
	FINA	0.1 A 0.2
POLVO	GRUESO	0.05 A 0.1
	FINO	0.02 A 0.05
LIMO	GRUESO	0.006 A 0.002
	FINO	0.002 A 0.0006
ARCILLA	GRUESA	0.0006 A 0.002
	FINA	0.0002 A 0.00006
ULTRA ARCILLA	---	0.00002 A 0.00002
DEBAJO DE 0.00002 mm LAS PARTICULAS CONSTITUYEN DISOLUCIONES VERDADERAS Y YA NO SE DEPOSITAN.		

Esta técnica de clasificación mostrada en la tabla 2 suele hacerse mediante el uso de tamices adecuados a cada tamaño, cuya luz o anchura de malla se corresponde con una serie de grupos o categorías previamente fijadas.

Con los datos de tamaños y peso de los materiales que pasaron por las mallas se obtienen curvas granulométricas en donde las ordenadas se refieren a porcentaje en peso y las abscisas en escala logarítmica los diferentes tamaños.

1.3.1. Minerales arcillosos

Existen suelos que al modificarse su contenido de agua cambian sus propiedades fisicoquímicas, estos suelos han sido denominados arcillas, Domínguez (1992).

La plasticidad se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares de las arcillas generando campos eléctricos que actúan como condensadores e influyen en la disociación de las moléculas bipolares del agua y se almacenan en equilibrio eléctrico en los espacios interlaminares produciendo un incremento de volumen, por lo tanto la plasticidad no es una propiedad permanente en las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Estados de consistencia definidos por Atterberg, (Juárez, 1985).

1. Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.
2. Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
3. Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.

Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo con plasticidad nula, y esa misma, con un porcentaje de agua igual a dos veces o más su volumen en contenido de agua presenta propiedades plásticas absorbiendo más agua hasta su límite plástico.

Cuando por una acción mecánica vigorosa que puede ser una lluvia torrencial, el límite plástico es rebasado en contenido de agua y presenta las propiedades de un lodo semilíquido o inclusive, la de una suspensión líquida; al cesar o disminuir la

acción mecánica la arcilla se deposita en forma natural. A esta propiedad en las arcillas se le llama tixotropía.

La permeabilidad en las arcillas es muy baja al no liberar el agua sujeta por los iones de la arcilla en sus espacios interlaminares. El calor de la luz solar si rompe la atracción iónica y evapora el agua de sus espacios interlaminares.

Las arcillas se originan por erosión de las rocas, sus componentes más comunes son el Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 sus porcentajes de contenidos determinan su composición origen y textura. Se les conocen comúnmente como: Montmorillonita, illita, caolinita, halloysita, mica clorítica, glaucomita, argilita, limonita. Son fácilmente arrastradas por el aire, y erosionadas por la precipitación fluvial depositándose en planicies, riveras y lagos al atenuarse la agitación mecánica. forman bancos de aglomerados arcillosos de diferentes edades geológicas.

(Tapias y Himi, 2005) evalúan en una zona vadosa la resistividad y textura de los sedimentos no consolidados con contenido de agua. Sus resultados se muestran en la Tabla No. 3.

Tabla 3. Correspondencia entre resistividad eléctrica y % de sedimentos no consolidados.

Sedimento	% de arcilla	Resistividad en ohms-m
Gravas	3	500 - 1000
Arena	5	50 - 100
Arena limosa	10	50 - 100
Limo	15	25 - 30
Limo arenoso	20	25 - 30
Arcilla arenosa	30	15 - 25
Arcilla limosa	45	10 - 15
Arcilla	65	5 - 10

1.4. Sistemas de puesta a Tierra

La (NOM-001-SEDE-1999) relativa a las instalaciones destinadas al suministro y uso de la energía eléctrica establece en el artículo 250 de puesta a Tierra las

especificaciones de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones eléctricas.

Establece: los sistemas se conectan a Tierra para limitar las sobretensiones eléctricas debidas a descargas atmosféricas, Transitorios en la red o contacto accidental con líneas de alta tensión, y para estabilizar la tensión eléctrica a Tierra durante su funcionamiento normal, CFE (2007).

Los equipos se conectan a Tierra a modo de que ofrezcan un camino de baja impedancia para las corrientes eléctricas de falla, y que faciliten el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en caso de falla a Tierra.

Abunda en que los materiales conductores que rodean a conductores o equipos eléctricos o que formen parte de dichos equipos se conecten a Tierra para limitar la tensión a Tierra de esos materiales y para facilitar el funcionamiento de los equipos de protección contra sobrecorriente en caso de falla.

Cada país tiene una legislación al respecto teniendo como fin central salvaguardar la integridad de la persona humana y el uso seguro de objetos eléctricos y electrónicos que adquieren para su uso así como la confiabilidad de las instalaciones eléctricas a su servicio minimizando al máximo los riesgos al respecto.

1.4.1. Peligro de contacto con la corriente eléctrica

En el aprovechamiento y uso de la energía eléctrica, la protección a las personas es el fundamento técnico y esencial de diseño de toda instalación eléctrica. El contacto accidental de la energía eléctrica sobre el cuerpo humano puede tener efectos de alto riesgo a la salud y ocasionar la muerte, (Enríquez, 2000).

La electrofisiología es una rama de la medicina que estudia los efectos de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano. Los efectos biológicos dependen de la intensidad de la corriente relacionada con el valor del voltaje aplicado al cuerpo así como de la resistencia y conductividad del mismo. La parte más

sensible del cuerpo se encuentra en la retina; con sólo 0.02 mA se produce sensación luminosa. Con 0.045 mA se manifiesta sabor alcalino en la lengua. En la piel la percepción es variable y se tiene con alrededor de 1 mA. Al incrementarse la corriente, los músculos de la mano no pueden desprenderse del contacto ocasionando contracción muscular en los brazos afectando posteriormente los músculos de la respiración iniciando el proceso de asfixia, (De la Vega, 2002).

La corriente eléctrica en el cuerpo es más letal en su recorrido por el tórax al afectar en forma directa al corazón. El grado de peligrosidad se sustenta en una serie de experimentos en animales con peso semejante al del hombre, determinándose que el recorrido más peligroso es el de la mano izquierda hacia los pies, siendo 88% de los accidentes mortales, (De la Vega, 2002).

Es la tensión a la cual puede verse sometido el cuerpo humano en el contacto con partes metálicas de las máquinas y aparatos que normalmente no están energizados, pero que pueden estarlo en caso de falla (Enríquez, 2000). Tabla 4; figuras 7 y 8.

Tabla 4. Efectos de la tensión eléctrica en el cuerpo humano. (Enríquez, 2000).

TENSIÓN DE CONTACTO EN (VOLTS)	RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO EN (OHMS)
25	2500
50	2000
250	1000 ≈
VALOR LÍMITE	650

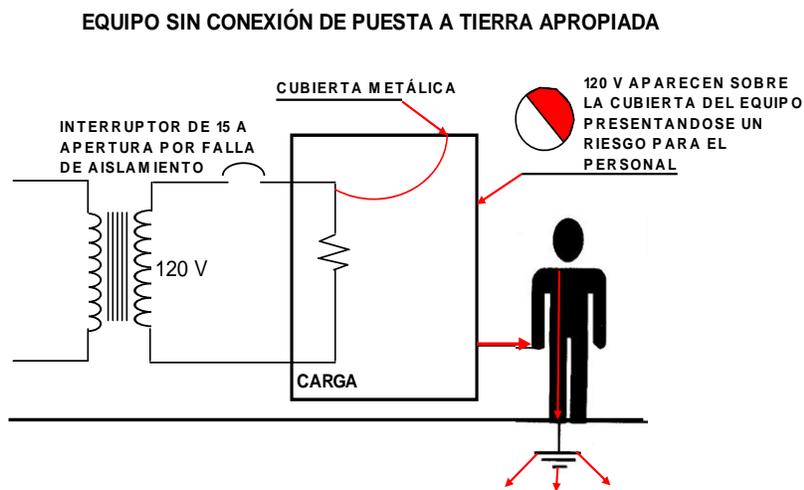


Figura 7. Descarga eléctrica en el cuerpo humano por defecto de Aislamiento, (Enríquez, 2000).

Las corrientes de defecto de aislamiento en un cable o componente de cualquier equipo eléctrico o electrónico como un refrigerador, una estufa, o una lámpara, etc.; si no tienen protección a Tierra para corto circuito, el usuario, al tocarlo, puede volverse conductor de corriente a Tierra que dependiendo de la intensidad de la corriente puede llegar a causarle daños y hasta ocasionar la muerte.

Una intensidad de 50 miliamperes es considerada peligrosa para el cuerpo humano en función del tiempo de contacto y de la tensión en corriente alterna o continua, De la Vega, (2002).

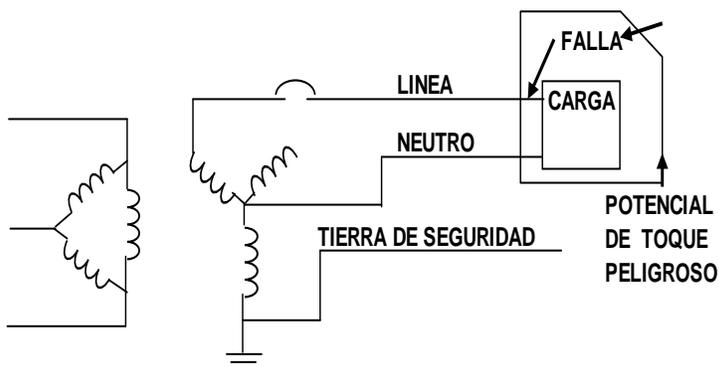


Figura 8. Defecto de aislamiento en un equipo eléctrico, (Enríquez, 2000).

El diagrama del sistema eléctrico de la figura 8, corresponde a un transformador conexión estrella en el secundario, en el cual una fase y el neutro alimentan la carga de un equipo. Si el conductor de corriente que corresponde a la línea por falla de aislamiento se pone en contacto con el chasis del equipo, se pone en corto circuito si un operario toca el chasis recibe una descarga eléctrica porque el equipo no tiene corrección a Tierra física con el riesgo correspondiente a su integridad física.

Si el equipo estuviera con conexión a Tierra, la protección interrumpe el suministro de energía y no funcionaría el equipo hasta que se corrigiera la falla, protegiendo en esto a los usuarios.

El uso de la energía eléctrica en baja tensión en servicios públicos, centros comerciales, industriales, casas habitación y residenciales, así como de otras instalaciones como hospitales, centros de cómputo, etc., están tocando constantemente el equipo eléctrico o los equipos que hacen uso de dispositivos eléctricos como taladros, secadoras, pulidoras, soldadoras eléctricas, etc.

Debido a que los voltajes y corrientes asociados con estos equipos pueden exceder los valores que el cuerpo humano es capaz de soportar, es necesario adoptar precauciones especiales para garantizar que el equipo tenga las condiciones de seguridad requeridas (Enríquez, 2000).

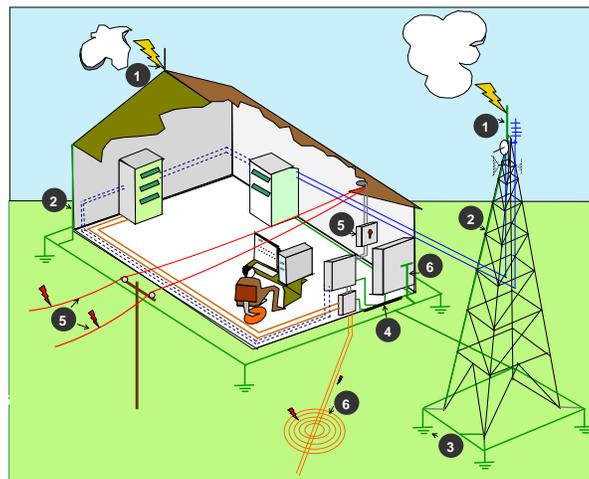


Figura 9. Protección a las personas y al equipo eléctrico.

Todo sistema eléctrico y electrónico debe conectarse a Tierra como se muestra en la figura 9 para la protección de los usuarios y equipos que operan en previsión de descargas atmosféricas (número 1) de la figura; estas descargas deben dispersarse en un sistema de Tierras con un conductor apropiado como se ve en el (número 2); la Tierra debe tener un valor bajo de impedancia para que la excesiva energía de alto voltaje y elevadas frecuencias sean dispersadas en el subsuelo y el voltaje sea referenciado a cero, esto se puede ver en el (número 3). También el sistema eléctrico como se ve en el (número 5) (alimentación de energía eléctrica), debe conectarse a tierra el neutro común (número 4) del sistema eléctrico como se ve en el (número 6) y para protección de los usuarios y los equipos que operan toda parte metálica debe conectarse a tierra (número 6). Para dispersar las corrientes de falla o por cargas electrostáticas en equipos electrónico como se ve en el número 4 y 6). Como puede observarse es fundamental para la protección e integridad de las personas que usan equipo eléctrico y electrónico tener un eficiente SPT. Los requisitos para la calidad de los materiales y su instalación están establecidos en la norma: NOM-001-SEDE-1999, de la Secretaría de Energía.

El comportamiento del cuerpo humano al paso de la corriente eléctrica es variable de una persona a otra, dado que no sólo su resistencia es muy variable, también lo es su conductividad, la cual depende de la sangre, de los huesos y de la fluidez de los tejidos del cuerpo que impide que se fije un valor preciso. Pero sí se puede establecer que las incidencias se presentan estadísticamente en baja tensión y son por su incidencia, las más peligrosas. Ver tabla 5.

Tabla. 5. Contacto del cuerpo humano por defecto aislamiento.
(Enríquez, 2000)

TRAYECTORIA LONGITUDINAL	TRAYECTORIA TRANSVERSAL
MANO A PIE \approx 1000 OHMS	MANO A MANO \approx 1000 OHMS
MANO A PIES \approx 750 OHMS	TRAYECTORIAS PARCIALES
MANOS A PIES \approx 750 OHMS	MANO A TRONCO \approx 500 OHMS
	MANOS A TRONCO \approx 250 OHMS

1.4.2. Descargas atmosféricas

En toda instalación eléctrica comercial o industrial debe instalarse un sistema de tierras cuyos objetivos son:

- Proporcionar un método de disipación de las cargas electrostáticas entre la tierra y las nubes.
- Proporcionar una trayectoria segura para las altas corrientes del rayo. Como puede observarse en la figura 10.



Figura 10. Peligro de contacto por descarga atmosférica.

Una nube de tormenta promedio podría contener unos 140 MWh de energía con voltajes hasta de 100 MV, con una carga en movimiento intranube de unos 40 Coulombs. Esta energía es la que se disipa a tierra mediante los rayos, con corrientes pico que van de unos cuantos kiloamperes a unos 200 kA de acuerdo a los datos de (Bent, 2007).

Por esto el sistema de protección contra descargas atmosféricas se debe instalar en edificios e instalaciones de acuerdo a su tamaño, tipo de estructura, localización y que el nivel cerámico (isodensidad de descargas atmosféricas que son variables dependiendo de la ubicación geográfica, altitud, etc.) o de densidad de rayos a tierra lo justifiquen. Es necesario conocer estos valores de la zona donde haya edificios que se deseen proteger y saber la respuesta del suelo en cuanto a la resistividad para disipar las corrientes de las descargas atmosféricas, y

minimizar los efectos en la incidencia de rayos. Los niveles de isodensidad o isoceraúnicos son de gran ayuda, sin embargo el ambiente y las condiciones atmosféricas son cambiantes, (CFE, 2007).

La solución razonable está en el equilibrio de la probabilidad de incidencia de una descarga atmosférica, el costo de la instalación de la red de tierra y el daño resultante. Deberá ponderarse el propósito de seguridad a las personas y el equipo que operan.

La protección con puntas en los extremos, bordes, orillas y esquinas de los techos incluyendo tuberías y partes metálicas de edificios y construcciones deberán de conectarse a tierra a través de un conductor de baja impedancia para transportar las corrientes de descargas atmosféricas, (Enríquez, 2000).

Cuando un rayo ha sido interceptado, la red de tierra tiene la función de disipar esta corriente rápidamente de manera segura y efectiva. El aspecto de la resistencia mínima a tierra de un sistema de protección contra rayos es la disipación del potencial a tierra en donde se tenga baja impedancia.

En áreas de baja resistividad, el suelo no presentará dificultad y será barato su acondicionamiento, pero en la mayoría de los suelos del mundo, la resistividad es de un valor elevado; en tales circunstancias, no será fácil lograr que la resistencia baje a un valor aceptable.

1.4.3. Instalaciones de SPT

Una instalación de puesta a Tierra tiene como función derivar corrientes eléctricas hacia la tierra estableciendo contacto efectivo con ella, estas corrientes pueden ser originadas por un sistema técnico o por un fenómeno natural. La instalación a tierra más elemental, satisface el requisito de ser considerado un sistema de Tierra si es eficiente en la función de dispersar corrientes eficientemente a la Tierra. Figura 11, (De la Vega, 2002).

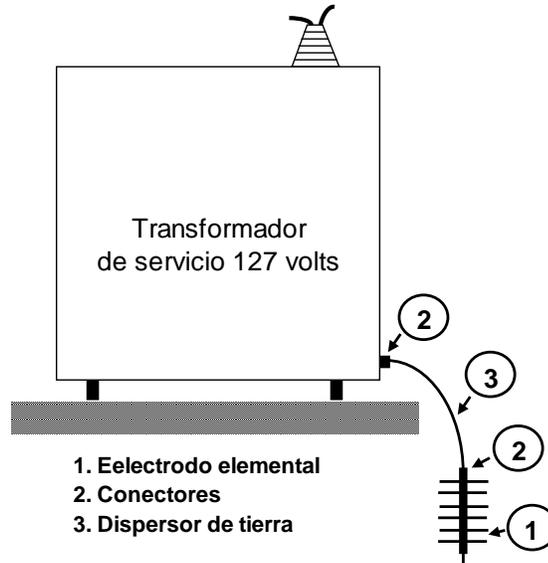


Figura 11. Puesta a Tierra elemental.

Una clasificación de los SPT por su complejidad, puede ser:

- 1) Instalación artificial de puesta a Tierra. Con elementos metálicos diseñados comercialmente para este fin: electrodos, bandas, anillos, placas.
- 2) Instalación natural de puesta a Tierra. Líneas de tuberías metálicas, cables de energía con cubierta conductora, cimientos de estructuras metálicas, de equipo eléctrico, vías de agua, nivel estático de un acuífero, etc.

Otra clasificación:

- 1) Instalación de puesta a tierra de servicio. Por ejemplo, la puesta a Tierra del punto estrella de un transformador de potencia, que suministra la energía eléctrica del servicio doméstico a los usuarios consumidores.
- 2) Sistema de Tierra de protección. Indispensable para asegurar el traspaso eficiente a tierra y que sus efectos no dañen fisiológicamente a los seres vivos que eventualmente estuviesen dentro del ámbito del sistema de tierra o en su proximidad en esos momentos, (Enríquez, 2000).

1.4.4. Dispersores a Tierra

Los electrodos o terminales a Tierra proporcionan el contacto a Tierra para dispersar las cargas electrostáticas y por esto se deben tener mediciones de resistividad con valores de un dígito para una impedancia ideal en la dispersión de descargas eléctricas.

Es el electrodo el elemento central de una instalación de puesta a Tierra y puede ser: fierro, acero inoxidable, cobre, aluminio, etc. Por medio del cual se introduce y dispersa la corriente en la Tierra. Los electrodos adoptan formas geométricas para tal fin y son: semiesferas, tubo, varilla, bastón, banda, conductor, placa y anillo. Son componentes importantes los conductores de Tierra que unen el sistema a proteger con el electrodo o conductores que unen varios electrodos para la operación en paralelo. En la figura 12 a y b son mallas rectangulares: c y d mallas cuadradas; y e malla circular concéntrica, (por ejemplo para una sala de procesamiento de datos, (De la Vega, 2002).

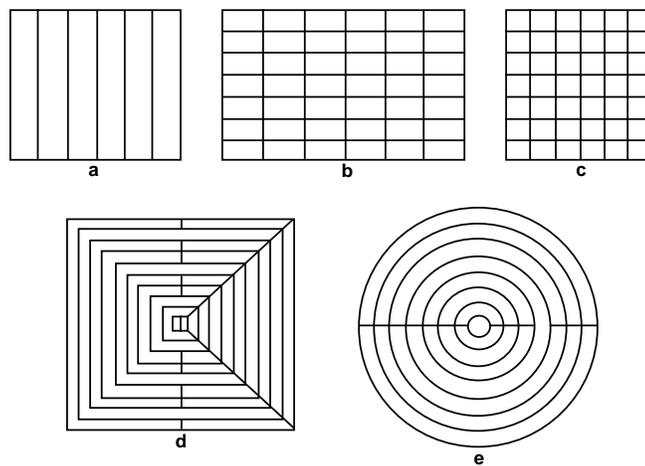


Figura 12. Electrodos de puesta a tierra múltiple.

Cuando la corriente a Tierra es elevada y todos los medios de servicio y elementos por conectar estén muy diseminados sobre una superficie, se necesita utilizar varios electrodos (siete, catorce, cuarenta y nueve, etc.) y conectarlos de manera que trabajen en paralelo integrados en un sistema compuesto o múltiple;

se integran así sistemas de electrodos con un único tipo de electrodos elementales.

Los problemas de diseño irán creciendo evidentemente conforme se va pasando de un sistema de Tierra a otro, combinando los elementos de la figura 21 en función de la conductividad o resistividad del suelo.

1.4.5. Tipos de sistema de puesta a Tierra

La NOM-001-SEDE-1999 establece que una trayectoria eléctrica de Tierra debe tener los siguientes atributos: ser permanente y continua; tener capacidad para conducir y disipar cualquier corriente de falla; tener una impedancia suficientemente baja para limitar el voltaje a Tierra y facilitar la operación de los dispositivos de protección en el circuito.

Comisión Federal de Electricidad, en una ponencia titulada “Una metodología para evaluar o modificar el sistema de tierras físicas frente a la incidencia de descargas atmosféricas”, plantea la importancia de la prospección geoelectrica aplicada en la puesta a Tierra de líneas de transmisión aéreas de 115 a 400 kV. Basada en investigaciones a nivel Internacional (IEEE), Nacional (IEE), Institucional (LAPEM) y la experiencia adquirida durante ocho años en los que el personal técnico del Departamento de Geofísica ha intervenido en la evaluación, modificación y diseño de la puesta a Tierra de líneas de transmisión (LT) aéreas de 115 a 400 kV, (CFE, 2007). La preocupación permanente para CFE, son las salidas de servicio debido a las descargas atmosféricas y establecen que éstas representan la principal causa de salidas de servicio no programadas y abarcan aproximadamente el 60% de fallas que incluyen LT de 400 -115 kV.

Por otro lado, si se considera la incidencia de las descargas atmosféricas en LT con cables de guarda, el fenómeno físico subsecuente depende de la geometría y parámetros de la línea y de los del rayo.

En figura 13 se muestran la importancia de la investigación con métodos geofísicos para cada suelo.

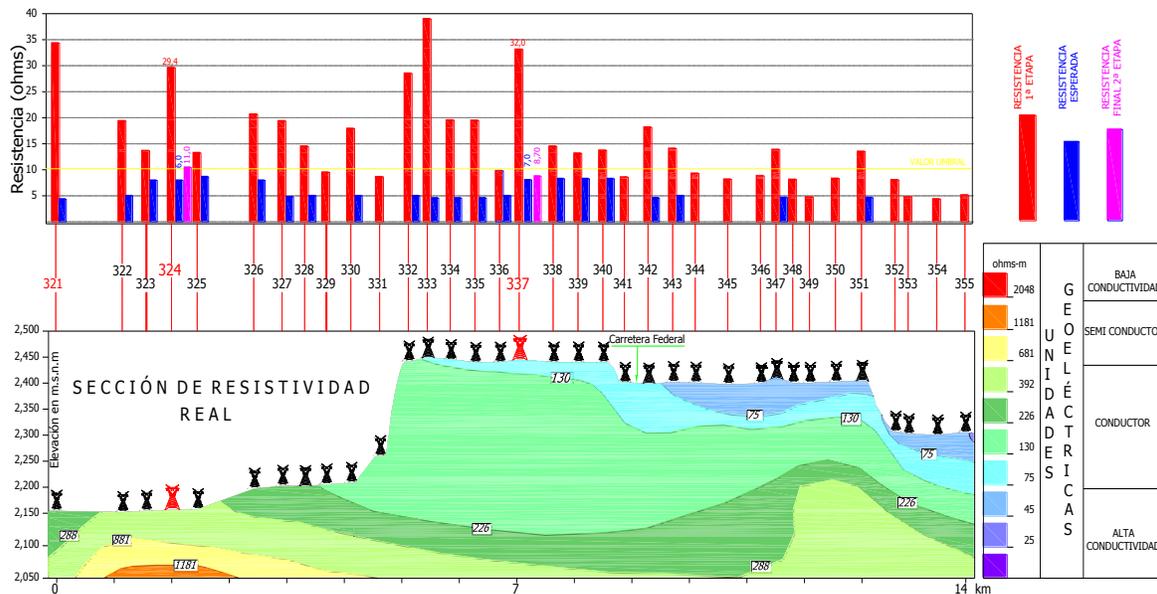


Figura 13. Estudios geofísicos con métodos de cc para limitar descargas atmosféricas en líneas de transmisión.(CFE, 2007)

Se han desarrollado varios métodos para estimar el índice de fallas o salidas, pero finalmente estos métodos son sólo aproximaciones a un problema de ingeniería que no está muy bien definido, debido a que por lo general, algunas constantes realmente no lo son y tampoco se conocen con precisión.

Proponen que un método para evaluar el desempeño de las LT debe tomar en consideración todas estas incertidumbres de manera que, si se hace una estimación con un método aproximado, puede resultar tan válida como una solución muy detallada.

Mencionan el efecto que pueden ejercer los niveles cerámicos en el trazo de una línea de transmisión, la secuela en cuanto a las etapas de estudios geofísicos de resistencia (SER) y resistividad (SEV) eléctrica, realizados en múltiples proyectos cuyos resultados se estima, han agregado valor a la cadena de acciones técnicas para que las LT encomendadas tengan un mejor desempeño, (CFE, 2007).

CAPITULO II. Marco teórico

2.1. Variación de la resistencia con la temperatura.

La temperatura tiene influencia en la resistencia del agua que se encuentra en los poros de las rocas. La dependencia de la resistencia de una solución de su

temperatura se expresa por la fórmula:
$$\rho_t = \frac{\rho_{18^0}}{1 + \alpha(t - 18^0)} \dots\dots(\text{Ec. 1})$$

En la que ρ_t es la resistencia de la solución a la temperatura t ; ρ_{18^0} es la resistencia de la solución a la temperatura de 18°C ; α es un coeficiente de temperatura de la conductividad eléctrica; igual en promedio a $0.025 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

2.1.1. Anisotropía en la zona no saturada

La figura 14 muestra dos gráficas (a) y (b) de resistividad azimutal Wenner con espaciamientos de $a = 1\text{m}$, 3m , 6m , 10m y 20m . La comparación de ambas muestra objetivamente: λ como el índice de anisotropía eléctrica de los estratos a profundidades $AB/3$.

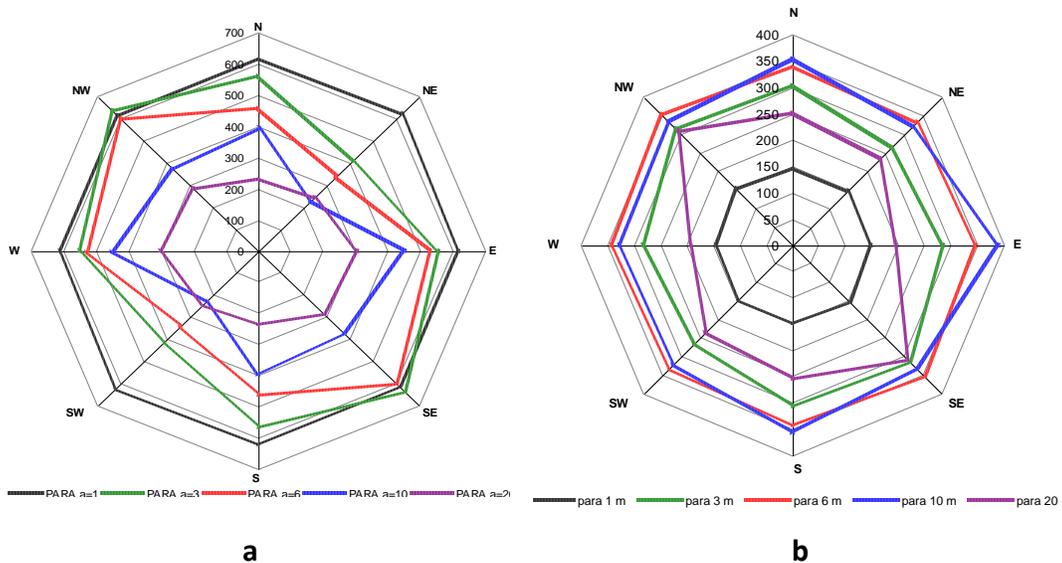


Figura 14. Gráficos de azimutales Wenner en zona vadosa, (Steinch, 1997).

El índice de anisotropía λ se define como la razón entre la resistividad aparente mayor y la más pequeña para cada valor de espaciamiento del sondeo:

$$\lambda = \frac{\rho_{a(\max)}}{\rho_{a(\min)}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2})$$

De esta forma λ es el índice de anisotropía que caracteriza la excentricidad de la curva con respecto a un círculo, para el cual el valor de λ sería 1 para un medio isótropo. Puesto que el espaciamiento es AB/3 es representativo de la profundidad de investigación. Para el caso de la figura 5(a) el índice de anisotropía es 1.95 a 20 m. En 5(b) es de 1.32 a 20 m, Niels (2000).

La raíz cuadrada de la relación de $\rho_{>}$ a $\rho_{<}$, tiene el nombre de *coeficiente de microanisotropía* y se designa por

$$\lambda_{\mu} = \sqrt{\frac{\rho_{>}}{\rho_{<}}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3})$$

Para las rocas el valor de este coeficiente varía entre 1 y 2 sólo en casos raros excede de esta magnitud, (González, 1980).

Este dato puede tener varias significaciones en la interpretación de las propiedades del subsuelo. Algunos trabajos en suelos de agregado granular muestran que la anisotropía eléctrica del medio se relaciona con la variación de la humedad, (Steinch, 1997).

2.1.2. Porosidad en la zona no saturada

Se puede usar la ley de Archie para estimar la porosidad del medio y valorar la disminución del grado de saturación, en donde el factor de formación y la porosidad se incrementa. El espacio de los poros que antiguamente contenían agua son remplazados por el aire decreciendo el nivel del agua disponible para transportar corriente eléctrica. El factor de formación depende de la resistividad del

suelo y el agua del poro, elementos que también son dependientes de la geometría interna del medio poroso.

Gorman y Kelly (1990) presentaron valores de a como una función de estas características, encontrando para su estudio $a = 2.15$. Calcularon valores de I para diferentes arenas y encontraron rangos entre 1.42 y 1.58, los últimos representativos para arenas finas.

El coeficiente m depende del dimensionamiento de los espacios de los poros y está relacionado con la dimensión fractal D como sigue:

$$m \approx \frac{(D-1)}{(2(3-D))} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4})$$

Krohn (1988) estudió la distribución fractal de diferentes arenas. Propuso un valor de 2.75 para la dimensión D de una arena de Arizona, el cual define a m un valor aproximado de 3.5.

2.2. Fundamentos teóricos de la exploración eléctrica

Ohm descubrió que la relación constante entre la diferencia de potencial en los extremos de un conductor metálico y la intensidad de corriente que fluye por él es una constante. A la constante de proporcionalidad se le llama resistencia eléctrica. Simbólicamente se le representa:

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots(\text{Ec. 5})$$

En unidades eléctricas: $1\text{Ohm} = \frac{1\text{volt}}{1\text{amp}}$

Esta ley es de importancia en los fenómenos eléctricos, la resistencia R es un valor absoluto, la resistividad es una respuesta de un medio que puede ser conductor o resistivo. Lo que Ohm descubrió fue que hay una relación constante entre la diferencia de potencial, en los extremos de un medio conductor y la

intensidad de la corriente que fluye por él es una constante que es la resistencia R.

2.2.1. Impedancia Z

Es la suma de las propiedades del medio que se oponen a la libre circulación de los electrones como corriente eléctrica debida a la diferencia de potencial, la sumatoria de estas propiedades es la *impedancia Z*.

$$Z = \sum [X_L + X_R + X_C] \dots\dots(\text{Ec. 6})$$

En donde X_L es la oposición a la corriente en un medio debido a efectos magnéticos, X_R es debida a la resistividad del medio conductor y X_C debida a otras propiedades capacitivas del medio que actúan como almacenadores de carga eléctrica en el medio. En un circuito eléctrico en donde se trabajan con conductores altamente eficientes no se considera la resistencia del conductor, se compensa por calibre en función de la distancia, no así en un medio rocoso heterogéneo, (Enríquez, 2002).

En geoelectrica el medio es el subsuelo y los elementos del medio conductor es suelo arcilla arena o roca (González, 1980).

2.2.2. Método de resistividad de corriente continua (CC)

De la ecuación 5 de la ley de Ohm para R $\frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A}$; entonces:

$$\rho = \frac{A \Delta V}{L I} \dots\dots(\text{Ec. 7})$$

Donde: R es la resistencia; L es la longitud del medio conductor; A es la superficie de la sección transversal; ρ es la resistividad del medio; ΔV es la diferencia de potencial; I es la corriente.

Para trabajar con el método de resistividad de CC se crea un campo eléctrico mediante dos tomas de tierras puntuales A y B. A través de estas dos tomas de Tierra, llamadas de emisión, se induce en el terreno una corriente eléctrica de intensidad I de cualquier fuente de corriente continua. Entre dos puntos del terreno y con ayuda de dos tomas de Tierra M y N de medición, con un voltímetro, se miden las diferencias de potencial ΔV , que surgen. La disposición relativa de las tomas de Tierra A, B, M y N que forman el dispositivo tetrapuntual, se determinan por el carácter del problema geológico que se quiere resolver, (Koefoed, 1979), (González, 1980).

La forma más general del dispositivo de cuatro puntos (con situación arbitraria de las tomas de Tierra de emisión y recepción) se tiene en la figura 15.

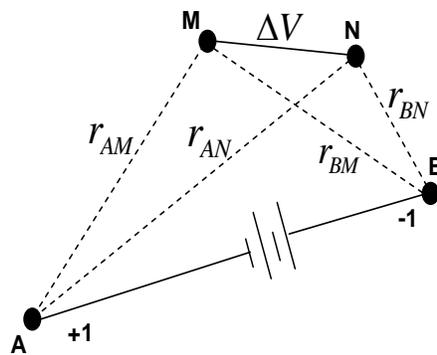


Figura 15. Dispositivo tetraelectródico para el trabajo por el método de resistividad.

Para encontrar la diferencia de potencial entre las tomas de Tierra M y N colocadas en el plano de la superficie del terreno de un semiespacio homogéneo ocupado por un medio de resistividad ρ .

Las tomas de Tierra A y B crean en el punto M una distancia que dista de ellos r_{AM} r_{BM} , un campo eléctrico con potenciales V_{MA} y V_{MB} que tienen los valores en la siguiente expresión:

El potencial total en el punto M
$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r} \dots\dots\dots(\text{Ec. 8})$$

$$V_{MA} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AM}} \quad V_{MB} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BM}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 9})$$

$$V_M = V_{MA} + V_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AM}} - \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BM}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) \dots\dots\dots(\text{Ec.10})$$

Análogamente el potencial del punto N es

$$V_{NA} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AN}}, \quad V_{NB} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BN}}, \dots\dots\dots(\text{Ec. 11})$$

$$V_n = V_{NA} + V_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \dots\dots\dots(\text{Ec. 12})$$

La diferencia de potenciales entre los puntos M y N será

$$\Delta V = V_M - V_n = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \dots\dots(\text{Ec. 13})$$

De aquí se obtiene la expresión de resistividad ρ en un medio homogéneo, en cuya superficie se encuentra un dispositivo tetrapuntual:

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \right] \frac{\Delta V}{I} \quad \text{o} \quad \rho = K \frac{\Delta V}{I} \dots\dots(\text{Ec. 14})$$

Siendo
$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 15})$$

La magnitud de K se determina por la distancia entre los electrodos del dispositivo y se denomina *coeficiente del dispositivo*. Según la ecuación 15, el coeficiente del dispositivo tiene las dimensiones de la longitud.

La ecuación 8 es obtenida para un medio homogéneo, se puede aplicar para la interpretación de los resultados de la medición con un dispositivo tetrapuntual situado en la superficie de un terreno heterogéneo; sin embargo, en este caso, en el resultado del cálculo tan sólo obtenemos una cierta magnitud arbitraria que tiene las dimensiones de una resistividad. A esta magnitud arbitraria se ha denominado *resistividad eléctrica aparente* y se designa por ρ_a .

Por consiguiente, en el caso general
$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots(\text{Ec. 16})$$

En el caso particular de un medio homogéneo, la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera: $\rho_a = \rho$

De la fórmula 16 se deduce que la ρ_a no depende de la intensidad de la corriente I que se envía al terreno, ya que la citada variación de la intensidad de corriente I origina otra variación proporcional de la diferencia de potencial ΔV . La magnitud de la resistencia aparente depende de la estructura del corte geoelectrico, de la distribución relativa de las tomas de Tierra en el dispositivo y de la situación de éste en la superficie del terreno.

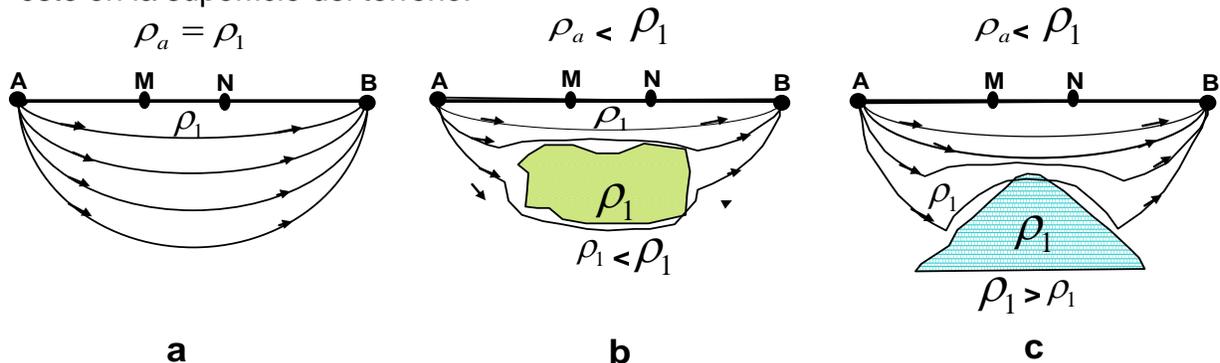


Figura 16. Dependencia de ρ_a del carácter del corte geoelectrico. Medio: homogéneo, b) cuerpo buen conductor, c) cuerpo mal conductor, (González 1980).

En la figura 16 está representado un dispositivo tetrapuntual situado: a) sobre un medio homogéneo; b) un cuerpo buen conductor y c) sobre un cuerpo mal conductor.

En a) la resistividad aparente será igual a la verdadera.

En b) la densidad de corriente se concentra en el cuerpo conductor; en el medio circundante de las tomas de medición disminuye, a causa de esto disminuye la diferencia de potencial entre estas tomas de Tierra. De la ecuación 16 se deduce que la disminución de ΔV lleva la disminución de ρ_a . En consecuencia, un medio buen conductor determina una disminución de ρ_a en comparación con su valor en un medio homogéneo.

En c) la corriente contornea el cuerpo de alta resistencia y se condensa en la zona de las tomas de Tierra de medición. Esto hace aumentar ΔV y en consecuencia aumenta ρ_a .

La resistividad aparente no es el valor promedio de las resistividades verdaderas de las rocas que se encuentran en el corte geológico. Se pueden presentar condiciones en que la resistividad aparente tome valores que salen fuera de los límites de variación de las resistividades verdaderas de las rocas de la estructura del corte.

En la relación entre la resistividad aparente y la estructura del corte geoelectrico está basada la posibilidad de aplicación del método de resistividad para la investigación geológica, (González, 1980).

2.2.3 Dispositivo Schlumberger

El dispositivo tetraelectrónico simétrico AMNB Schlumberger es el más utilizado para trabajar por el método de resistividad. En él, las tomas de Tierra de recepción están situadas en la recta que una las tomas de Tierra de emisión, de modo simétrico respecto al centro del segmento AB, es decir, este dispositivo pertenece a los rectilíneos (Fig 8a). La distancia entre las tomas de Tierra de recepción r_{MN} debe ser menor que un tercio de la distancia entre las tomas de Tierra de la emisión r_{AB} . Con esta condición, la relación $\Delta V/r_{MN}$ puede, con suficiente exactitud considerarse igual a la intensidad del campo en el centro del dispositivo, es decir,

considerarlo como dispositivo límite. Esto facilita la comparación de los resultados de las observaciones de campo con los teóricos dados de la intensidad del campo.

Para el dispositivo simétrico tetraelectrónico, como se ve en la figura 9 $r_{AM} = r_{BN}$, $r_{AN} = r_{BN}$ y, según la fórmula 15.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{2}{r_{AM}} - \frac{2}{r_{AN}}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 17})$$

Una presentación más compacta para el cálculo de esta fórmula se puede escribir así:

$$K = \frac{\pi r_{AM} r_{AN}}{r_{MN}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 18})$$

Al sustituir valores de a y b, correspondientes a las distancias en lugar de AM y MN, del dispositivo Schlumberger, encontramos los valores de la ecuación 19.

$$K = \frac{\pi(b^2 + ab)}{a} \dots\dots\dots(\text{Ec. 19})$$

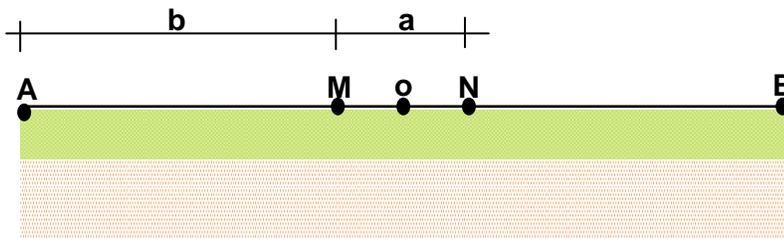


Figura 17. Dispositivo Schlumberger y su valor de K.

El dispositivo tetraelectrónico simétrico en el que $r_{AM} = r_{MN} = r_{NB}$ lleva el nombre de *dispositivo Wenner*.

Para este dispositivo $K = 2\pi a$ (Ec. 20)

Siendo $a = r_{MN}$

2.2.4. Sondeo eléctrico vertical (SEV)

Curvas teóricas de SEV. Supongamos que en la superficie del terreno se ha situado un dispositivo tetrapuntual simétrico AMNB. La magnitud de la resistencia aparente de este dispositivo depende de cómo estén distribuidas en el semiespacio inferior las rocas de diferentes resistividades y también de la posición relativa de las tomas de Tierra de emisión y recepción, así como de la profundidad de penetración de la corriente en el terreno, que depende directamente de la distancia entre las tomas de Tierra A y B. La mayor influencia del valor de ρ_a la tienen las rocas que se encuentran en el volumen del medio en que se distribuye la parte fundamental de la corriente.

Si se aumenta la distancia entre las tomas de Tierra de emisión sin variar la situación del terreno en el dispositivo, entonces la profundidad de penetración de la corriente en el terreno aumenta y como consecuencia de ello empiezan a ejercer influencia en el valor de ρ_a las rocas que se encuentran a mayor profundidad. Por consiguiente, la medición de ρ_a con un dispositivo en el que se varía la distancia entre las tomas de Tierra de emisión para una posición invariable de su centro nos permite estudiar la variación del corte geológico con la profundidad.

Los resultados de las observaciones de campo que se presentan en forma de curvas que relacionan ρ_α con la distancia AB/2 de la distancia A0 entre las tomas de Tierra de emisión y recepción para los diversos cortes geoeléctricos, son complejos.

El cálculo teórico de esta relación está basado en el cálculo de campo de una fuente puntual de corriente en un medio heterogéneo. La teoría del método, así como su utilización, se ha desarrollado especialmente para cortes de capas horizontales que se encuentran sobre todo en condiciones de plataforma.

La forma de las curvas del sondeo eléctrico vertical depende del número de capas horizontales que exista en el corte y de la relación entre sus resistividades y sus espesores. Se distinguen cortes de dos, tres, cuatro y más capas. Como se muestra en las figuras 18 y 19.

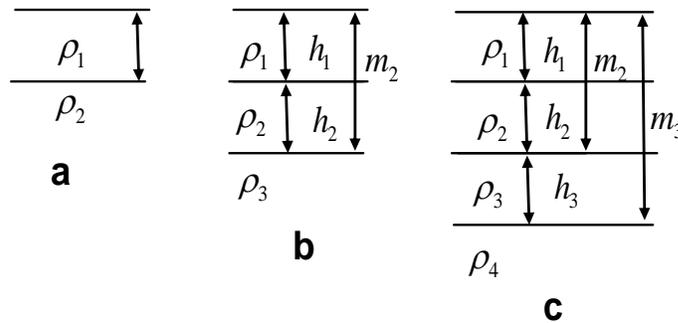


Figura 18. Cortes geoelectricos. a) de dos capas; b) de tres capas; c) de cuatro capas.

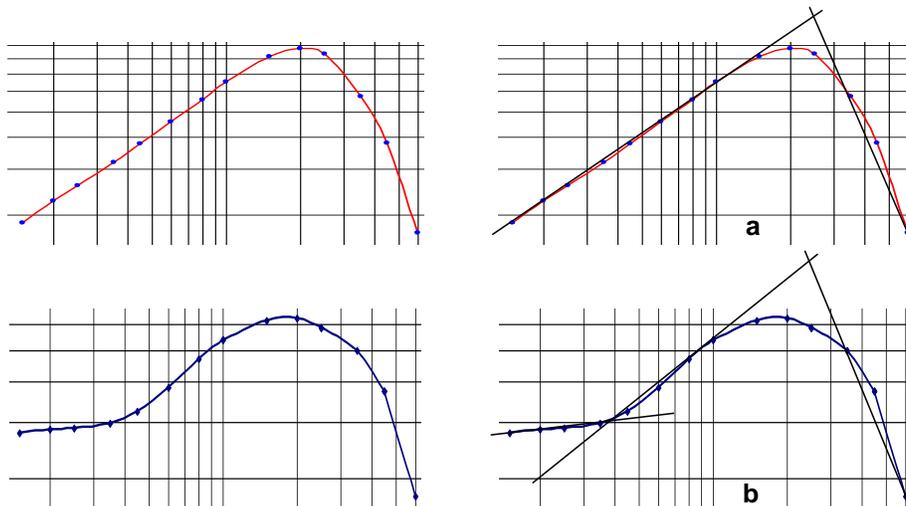


Figura 19. Curvas SEV. a) de dos capas; b) de tres capas.

En el caso general, las curvas SEV son función de los parámetros del corte y también de la semidistancia de los electrodos de emisión AB(o L/2), es decir,

$$\rho_a = f\left(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, h_1, h_2, h_3, \dots, \frac{AB}{2}\right) \dots\dots\dots(\text{Ec. 21})$$

Para obtener la ecuación de la curva que corresponde a un corte con un cierto número de capas, utilizamos la expresión de la intensidad de campo eléctrico de una fuente puntual:

$$E = -\frac{dU}{dr} = \frac{I\rho}{2\pi r^2}, \quad \text{De donde,} \quad \rho = \frac{E2\pi r^2}{I} \dots\dots\dots(\text{Ec. 22})$$

En caso de medición con el dispositivo AMNB, se tienen dos tomas de Tierra de emisión y la intensidad del campo se duplica, es decir,

$$\text{Por tanto,} \quad E = \frac{I\rho}{\pi r^2}, \quad \text{De donde} \quad \rho = \frac{E\pi r^2}{I} \dots\dots\dots(\text{Ec. 23})$$

Para un valor de la separación MN=1, suficientemente pequeño, la magnitud medida ΔU es prácticamente equivalente a E . Si el medio es homogéneo, entonces, midiendo con los dispositivos del método de resistividades, se halla el valor de la resistividad del medio. Para el mismo medio, pero heterogéneo, el valor de la resistividad aparente, es,

$$\rho_a = \frac{E\pi r^2}{I} \dots\dots\dots(\text{Ec. 24})$$

La expresión para E:
$$E_1 = -\frac{\partial U_1}{\partial r} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n r}{\left[(r^2 + 2ah_1)^2 \right]^{2/3}} \right\} \dots\dots\dots(\text{Ec. 25})$$

De la expresión anterior, la intensidad del campo en la superficie del terreno para un medio de dos capas, la llevamos a la fórmula 24, poniendo para ello l/2 en lugar de r (semidistancia entre los electrodos de emisión). La ecuación de

la curva de SEV de dos capas: $\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \left(\frac{L}{2}\right)^3}{\left[\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (2nh_1)^2\right]^{2/3}} \right\} \dots\dots(\text{Ec. 26})$

De modo análogo se puede hallar la ecuación de la curva de SEV de tres capas. La ecuación de la curva de tres capas en su forma final se muestra en la ecuación 27. (González, 1980)

$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n \left(\frac{L}{2h}\right)^3}{\left[\left(\frac{L}{2h}\right)^2 + (2n^2)^2\right]^{2/3}} \right\} \dots\dots\dots(\text{Ec. 27})$$

El factor q_n que está bajo el signo suma se denomina coeficiente de emisión y es función de los coeficientes de reflexión K_{12} y K_{23} , así como la relación de $h_2/h_1=v_1$.

Las expresiones de los coeficientes de reflexión pueden transformarse del modo siguiente:

$$K_{12} = \frac{\frac{\rho_2 - 1}{\rho_1}}{\frac{\rho_2 + 1}{\rho_1}} = \frac{\mu_1 - 1}{\mu_1 + 1} \dots\dots\dots(\text{Ec. 28})$$

$$K_{23} = \frac{\frac{\rho_3 - \mu_1 \rho_1}{\rho_3 + \mu_1 \rho_1}}{\frac{\rho_3 + \mu_1}{\rho_1}} = \frac{\frac{\rho_3 - \mu_1}{\rho_1}}{\frac{\rho_3 + \mu_1}{\rho_1}} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1}; \dots\dots\dots(\text{Ec. 29})$$

Siendo $\mu_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1}; \quad \mu_2 = \frac{\rho_3}{\rho_1} \dots\dots\dots(\text{Ec. 30})$

Las magnitudes μ_1 , μ_2 , llevan el nombre de módulos de corte. Puesto que el coeficiente de reflexión κ_{12} es función del módulo μ_1 y el coeficiente κ_{23} es función de los módulos μ_1 y μ_2 , las ecuaciones 28 y 29 para las curvas de SEV de dos y tres capas de pueden poner en una forma más general.

Es notoria la complicación del manejo de datos para lograr obtener resoluciones breves y confiables de los fundamentos teóricos expuestos de esta manera, obtener finalmente con fidelidad los estratos y resistividades de las secciones de los cortes geoelectrónicos, así como la autenticidad y exactitud de las determinaciones; se suelen realizar mediciones repetidas y calcular los errores cuadráticos medios. Los fundamentos teóricos tienen el mismo principio para el proceso de la información, (Koefoed, 1979). Con el potencial natural y el potencial inducido a la inyección de una corriente en el subsuelo proporciona los datos de resistividad que se procesan en programas computacionales para obtener las curvas de modelado (Molina, 2006), (Ballares, 1995).

Los sondeos eléctricos Wenner son rectilíneos o lineales. Los principios matemáticos teóricos son los mismos de un dispositivo tetraelectrónico simétrico en el que $r_{AM}=r_{MN}=r_{NB}$ su constante $K = 2\pi a$

2.2.5. Campo de fuente puntual en medio homogéneo

El campo de la toma de Tierra distribuida en la superficie plana de separación Tierra-aire, es el que más frecuentemente sirve como patrón con la condición de que el semiespacio inferior contenga un medio homogéneo e isótropo conductor, lo llamaremos en lo sucesivo *campo normal*.

Supongamos colocadas en la superficie del terreno dos tomas de Tierra A y B de forma semiesférica, medidas en el terreno hasta el plano ecuatorial. Figura 20, a y b).

El campo eléctrico de esta toma de tierra en cualquier punto del semiespacio inferior en particular en el punto M, será la suma de los campos creados por las tomas de Tierra A y B.

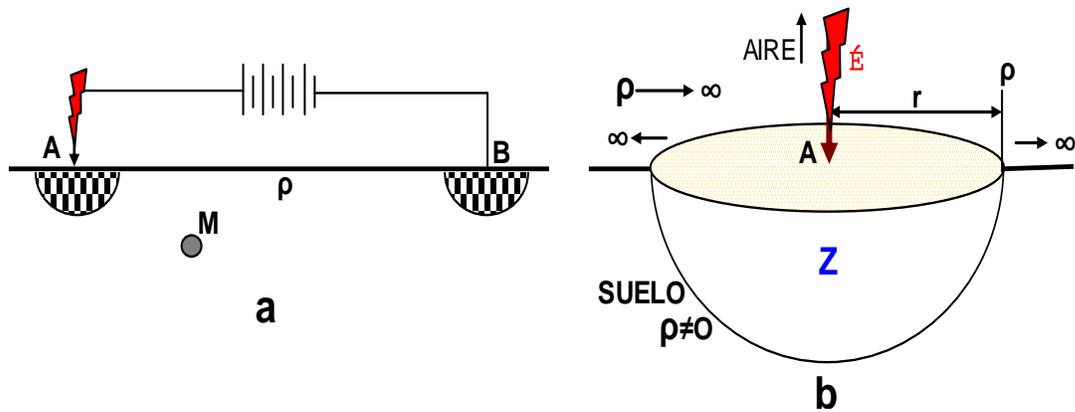


Figura 20. Circuito con dos electrodos semiesféricos M) campo normal de una Tierra puntual.

Si una de estas tomas de Tierra se separa una distancia suficientemente grande en comparación con la distancia entre la segunda toma de Tierra y el punto M, entonces el campo en este punto será creado prácticamente sólo por la toma de Tierra más próxima. El campo de esta toma M) de tierra se determina en función de la resistividad ρ del medio que ocupa el semiespacio inferior, de la posición del punto M y de la intensidad de la corriente I que entra en el terreno a través de las tomas de tierra semiesféricas. La distancia entre el punto A, en que se encuentra el centro de la toma de tierra semiesférica y el punto M se designa por r en la figura 20, (González, 1980).

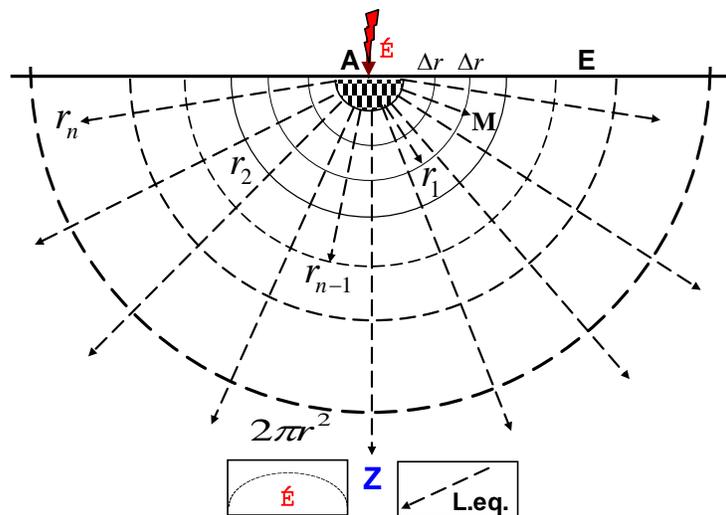


Figura 21. Campo de una tierra semiesférica. Líneas de corriente y líneas equipotenciales.

La solución del problema se simplifica si la corriente que entra en el semiespacio inferior a través de la toma de tierra en la figura 18; a causa de la homogeneidad del mismo, se extiende uniformemente en todas las direcciones. Las líneas de corriente en este caso coinciden con los radios que parten del centro de la toma semiesférica, y las superficies equipotenciales que deben ser perpendiculares a las líneas de corriente, forman un sistema de semiesferas concéntricas con centro en el punto A.

Fijamos un sistema de superficies equipotenciales en el que la primera pasa por el punto M, la segunda dista de la primera una distancia Δr , infinitamente pequeña en comparación con r , la tercera a la distancia $2\Delta r$ de la primera, la cuarta $3\Delta r$, etc. Evidentemente, de este modo obtenemos una serie de superficies semiesféricas de radios que aumenta de modo continuo:

$$r = r + \Delta r, \quad r_2 = r_1 + \Delta r, \quad r_3 = r_2 + \Delta r, \quad r_n = r_{n-1} + \Delta r \quad \text{etc.}$$

Al potencial en la superficie de radio r_n lo designamos por U_n . Se puede obtener la expresión de la diferencia de potencial ΔU entre dos superficies equipotenciales contiguas, considerando la capa semiesférica incluida entre ellas como un conductor lineal. Para ellos señalamos que la intensidad de corriente que fluye a través de la capa semiesférica es igual a I , es decir, a la intensidad de corriente que entra en el terreno a través de los electrodos.

Según la ley de Ohm, para conductores lineales

$$\Delta U_{r1} = U_{r1} - U_r = IR, \quad \text{Siendo } R \text{ la resistencia de la capa semiesférica.}$$

La magnitud R puede expresarse por la conocida fórmula de física del modo siguiente:

$$R = \frac{\rho l}{s} \quad \text{Siendo } \rho \text{ la resistividad del}$$

conductor; l su longitud; y s la sección transversal. En nuestro caso l es igual a r

y s es el valor medio de área de la sección transversal de la capa semiesférica incluida entre las superficies de radios r y $r + \Delta r$:

Por consiguiente,
$$s = 2\pi(r + \Delta r / 2)^2$$

$$R = \rho \Delta r / 2\pi(r + \Delta r + \Delta r / 2)^2$$

La última expresión también puede escribirse así: $R = (r_1 - r) / 2\pi(r^2 + r\Delta r + \Delta r^2 / 4)$

Teniendo en cuenta que Δr es mucho menor que r y por consiguiente que la magnitud $\Delta r^2/4$ es pequeña en comparación con los restantes miembros que están en paréntesis, se puede escribir

$$r = \rho \frac{r_1 - r}{2\pi r(r + \Delta r)} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{r_1 - r}{r_1 r} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right)$$

En consecuencia, la expresión de ΔU_{r_1} definitivamente tendrá la siguiente forma:

$$\Delta U_{r_1} = U_{r_1} - U_r = -\frac{\rho l}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$\Delta U_{r_2 r_3} = U_{r_3} - U_{r_2} = -\frac{\rho l}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right)$$

$$\Delta U_{r_{n-1} r_n} = U_{r_n} - U_{r_{n-1}} = -\frac{\rho l}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n} \right)$$

La causa del signo menos se explica aquí porque la corriente fluye de los puntos de potencial elevado a los puntos de bajo potencial, es decir, al aumentar r el potencial disminuye.

$$U_r - U_{r_n} = \frac{\rho l}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right)$$

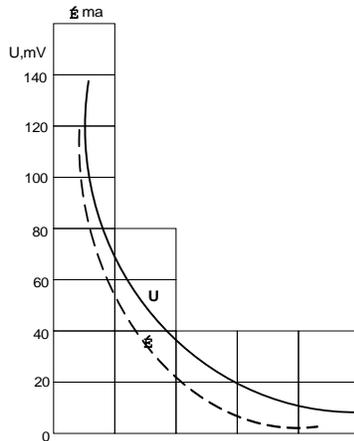


Figura 22. Gráfica del potencial U y de la intensidad E de una toma de tierra semiesférica.

2.2.6 El trazo y exposición de LT

La trayectoria de una línea de alguna manera influye indirectamente en la exposición a la acción de los rayos en la misma, el índice de atracción de rayos de las estructuras y los cables de guarda está influido por el valor de la resistencia al pie de la estructura, estando esta última en función del diseño del (STF) y de la resistividad del medio geológico donde se encuentre emplazada.

Cuando una LT está expuesta a descargas atmosféricas, entran en juego en forma directa las características orográficas y geográficas que influyen en la densidad de rayos a Tierra (N_g), para esto es conveniente disponer de mapas de densidad de rayos a Tierra o en su defecto de niveles cerámicos (DT), para poder determinar lo que posiblemente sucede cuando una línea pasa por zonas de distinta densidad de rayos a Tierra. Cuando no se dispone del valor de (N_g), figura 23 se puede estimar a partir del nivel cerámico de acuerdo con la expresión:

$N_g = 0.04DT^{1.25}$	La actividad atmosférica se clasifica en (DT):
Donde:	5 - 15 nivel bajo
N_g = Numero de rayos / Km^2 / año	15 - 30 nivel medio
DT= Nivel cerámico o número de días con tormenta eléctrica por año	30 - 90 nivel alto
	Mayor de 90 nivel muy alto

Figura 23. Estimación de la atracción de rayos en función de las características orográficas y geográficas.

Índice de atracción de rayos. La cantidad de rayos o descargas atmosféricas captadas por una LT está influenciada directamente por la altura de las estructuras, dicha cantidad de rayos atraída se puede estimar con la ecuación:

$N_s = N_g \left(\frac{28h^{0.60} + b}{10} \right)$	Donde: N_g = Numero de rayos / Km^2 / año h = Altura de la estructura en (m) b = Dist. Entre cables de guarda (m) N_s = Núm. De rayos/100Km/año
--	--

Figura 24. Índice de atracción de rayos en función de la altura de las LT.

En la figura 25 se muestra la isodensidad o distribución de las descargas atmosféricas en el territorio nacional. Pueden observarse también estas distribuciones en el territorio de cada estado. Fuente: CFE, 2007.

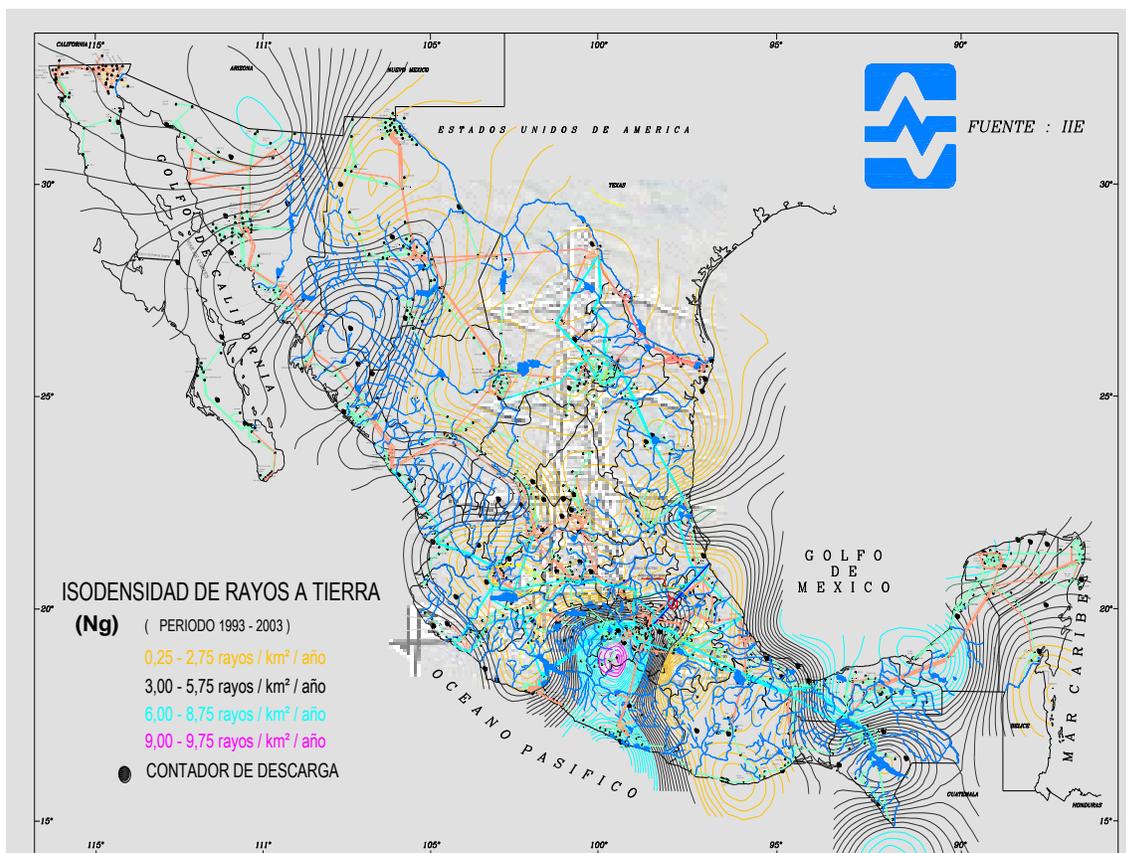


Figura 25. Isodensidad de descargas atmosféricas a tierra, (CFE, 2007).

2.2.7. La conexión a Tierra en LT

La sobretensión que se presenta en una estructura cuando la impacta una descarga atmosférica, así como la magnitud de las tensiones reflejadas por la misma, dependen directamente del valor de resistencia al pie de estas.

La tensión aplicada a las cadenas de aisladores es la diferencia entre la tensión de la estructura y la tensión instantánea de los conductores de fase, de manera que cuando la resistencia al pie de la torre es elevada, se puede dar el fenómeno de reflexión y superposición de ondas. Este valor de resistencia al pie de la torre está directamente relacionado con la forma de conexión a Tierra, puede ser con electrodos verticales, con contra antenas o una combinación de ambos; adicionalmente se puede requerir de agentes químicos para reducir el valor de resistencia al pie de la estructura.

Por otra parte, también influye directamente la resistividad del medio geológico y la sección del conductor de la contra antena o electrodo vertical.

El desempeño ante la acción de las descargas atmosféricas de una LT en su totalidad, está influida por el desempeño individual de cada una de las torres, por lo que normalmente sólo un número reducido de torres localizadas en zonas de alta resistividad del medio geológico, pueden degradar el desempeño total de la línea.

El desempeño compuesto de la línea se puede determinar a partir de la expresión mostrada en la figura 26.

$T = \frac{\sum T_n L_n}{\sum L_n}$	Donde:
	L_n = Longitud de la línea en la sección (n) con resistencia al pie de la torre semihomogénea.
	T_n = Proporción del número de salidas de servicio para la sección de la línea (n).

Figura 26. Desempeño de las líneas y torres en las descargas atmosféricas.

Cuando se observa un desempeño no satisfactorio, debido a un alto valor de resistencia al pie de la torre en una o más, se deben adoptar medidas adicionales para reducir este valor de resistencia al pie de la torre, o bien, recurrir al uso de apartarrayos de línea que representa una alternativa; empleados con éxito en LT que cruzan montañas con alto valor de resistividad y alta densidad de rayos.

2.2.8. La respuesta de resistividad

En este tema, la densidad de los problemas debe de abordarse de manera particular en función del medio y la respuesta de la resistividad del suelo cambiante en las condiciones de humedad, composición y disposición de los estratos, los principios y fundamentos no varían pero tampoco pueden ser una receta uniforme.

CAPÍTULO III. Metodología

3.1 Ubicación geográfica del estudio

Se presenta la ubicación geográfica del estudio en la figura 27 en foto aérea y en coordenadas GPS se muestra la ubicación de los 22 SEV en leyenda amarilla; SWA en azul con una letra A; Pozos en azul con una letra P y la ubicación de muestras de granulometría en naranja. El área de 56 hectáreas la limitan las coordenadas UTM; X=743056 y 742610; Y=1883093 y 1884350 y Z=1541 y 1531 determinan la pendiente de 0.8% de NW-N a SE-S.

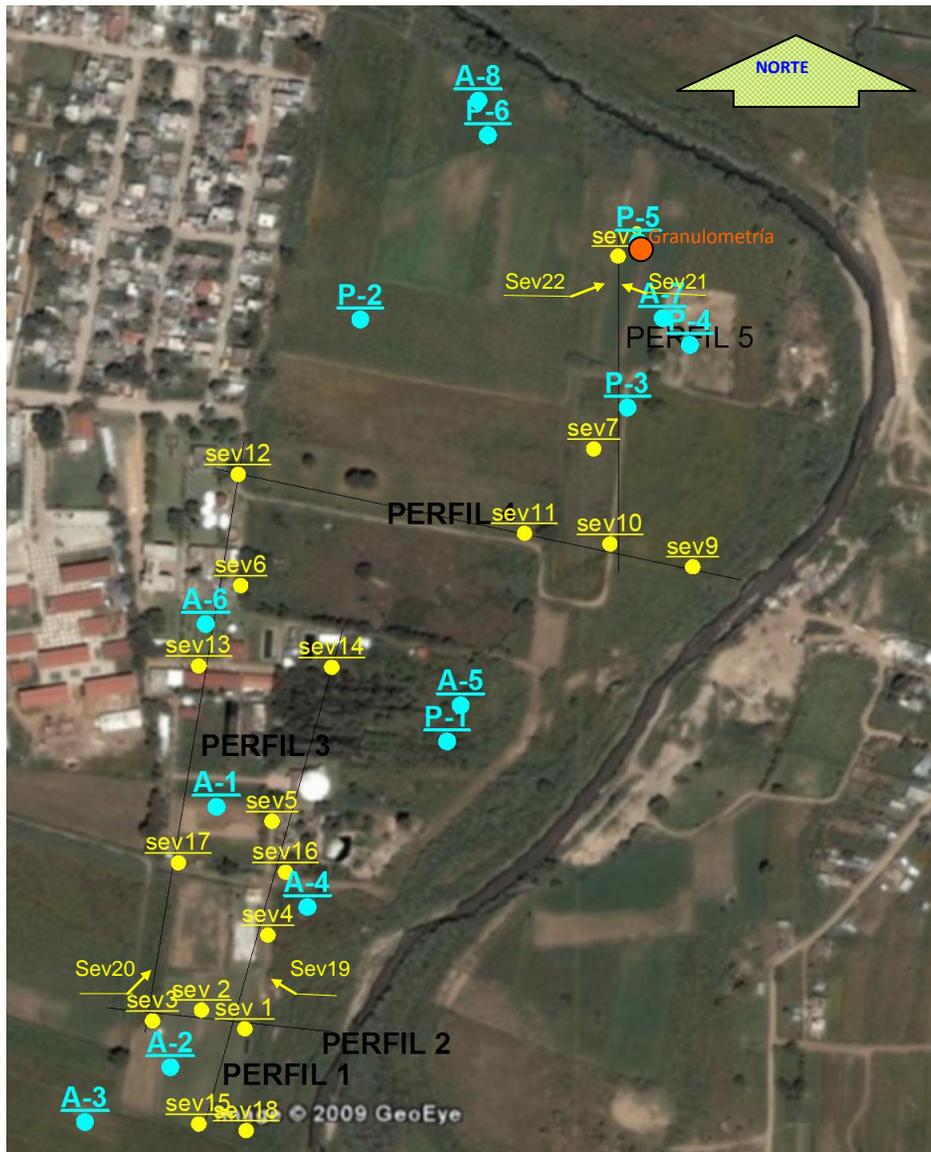


Figura 27. Ubicación de los puntos explorados en un terreno aluvial.

3.2. Desarrollo metodológico

El procedimiento metodológico se realizó en base al diagrama experimental desplegado en la figuras 28 y 29.



Figura 28. Desarrollo metodológico del proyecto en estiaje.

En estiaje se tomaron y procesaron los datos correspondientes de los métodos de CC sondeos eléctricos verticales SEVs; sondeos azimutales Wenner SAWs y piezometría; Cada método se describe unitariamente en su desarrollo y proceso hasta la obtención de los datos sus elementos procesándose los mismos.

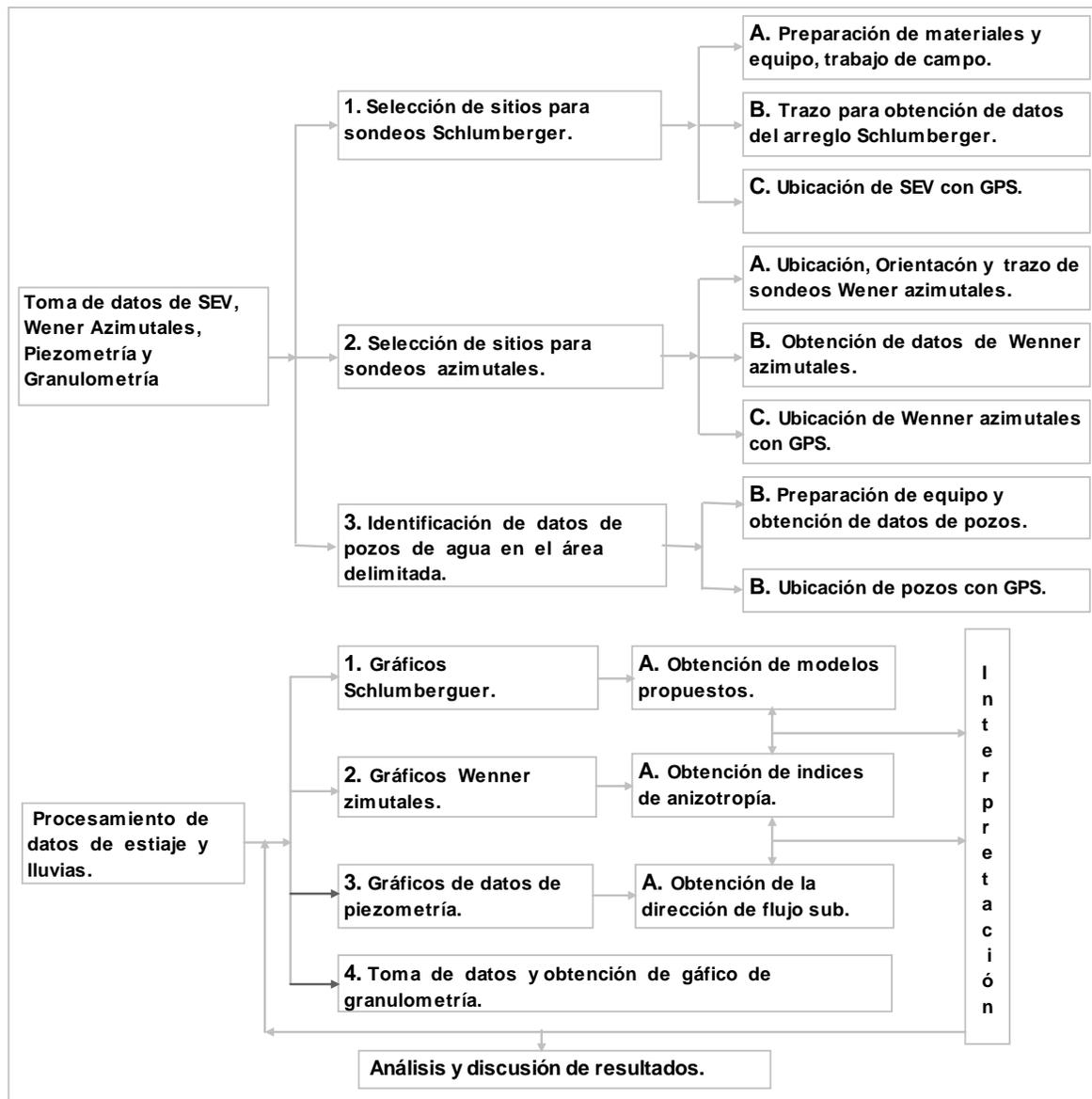


Figura 29. Desarrollo metodológico en lluvias.

En lluvia se tomaron y procesaron los datos correspondientes de los métodos de CC los SEVs en diferentes ubicaciones al estiaje. Los sondeos azimutales Wenner SAWs se repitieron en la misma ubicación para evaluar el contraste de una temporada a otra. En piezometría se midieron los datos en los mismos pozos de agua procesándose para la obtención de los gráficos. En lluvias se tomaron los datos de granulometría en la ubicación que marca la figura 29.

Los métodos geofísicos seleccionados para el estudio eléctrico del suelo aluvial fueron:

1. Método geoelectrico de CC en su variante sondeo eléctrico vertical tipo Schlumberger.
2. Método geoelectrico de CC tipo Wenner azimutal.
3. Piezometría en pozos.
4. Granulometría de mecánica de suelos.

Se eligieron estos métodos por la información teórica afín a los datos que este trabajo buscaba conocer, se tiene al alcance el equipo para la obtención de datos y accesibilidad a los paquetes computacionales para el procesamiento de gráficos y secciones representativas de las estructuras geológicas del subsuelo con sus propiedades eléctricas.

En los resultados obtenidos de ellos se podrá inferir y determinar la eficiencia o ineficiencia de la disipación en este suelo de corrientes de descargas atmosféricas o de falla además de conocer el porqué de la oscilación del voltaje del sistema eléctrico en los SPT.

En las figuras 28 y 29, son en temporada de estiaje y en lluvias. Los SEV, no coinciden en los mismos sitios en estiaje y lluvias. El objetivo, obtener más datos longitudinalmente en el área bajo estudio.

Los sondeos azimutales Wenner (SAW) fueron 16; 8 en estiaje y 8 en lluvias y son coincidentes en ubicación para contrastar las propiedades del subsuelo en ambas temporadas.

Los datos de piezometría se tomaron en los mismos pozos para comparar el abatimiento del nivel estático en ambas temporadas.

En temporada de lluvias se tomaron las muestras de granulometría para conocer en el subsuelo la distribución de sus partículas y sus tamaños correspondientes.

3.3. Desarrollo metodológico del Sondeo eléctrico vertical Schlumberger (SEV)

Con este método se buscó obtener el corte geoelectrico de los materiales que conforman el subsuelo bajo estudio para estimar las resistividades y espesor de los estratos en el área delimitada e interpretar su comportamiento en la disipación de corrientes de un SPT.

Se obtuvieron los datos de la intensidad de corriente para cada espaciamiento de AB/2 asociada a las rocas, se registro la diferencia entre el potencial natural y el inducido con el valor geométrico del arreglo se determino la respuesta de resistividad eléctrica para cada valor de variación de la distancia interelectrónica. Los datos de resistividad se procesaron para obtener el modelo propuesto con un error cuadrático medio menor al 10% para construir el perfil geoelectrico en el cual se infiere la solución al problema de las respuestas eléctricas en los datos esta la respuesta eléctrica al problema de disipación de corrientes en el subsuelo.

El parámetro que se obtuvo fue el valor de la resistividad aparente de los estratos del subsuelo; la presencia de humedad y temperatura entre otros, pueden identificarse estos valores a diferentes profundidades. Esta es la razón de tomar los datos en estiaje y lluvias.

Los materiales granulares de las rocas son minerales de tipo metálico por su contenido de metales y óxidos de los mismos que hacen que la proporción de ellos en el suelo sean más o menos conductores de electricidad y determinan la resistividad o conductividad, pudiendo ser conductores de la electricidad en mayor o menor grado dentro de la teoría electrónica. En base en esta teoría de la respuesta de resistividad o conductividad del suelo, se decidió el uso de (SEV, SAW), para determinar las causas-efectos que han ocasionado la perturbación en la disipación de corrientes de fallas atmosféricas o de falla.

3.3.1. Materiales y equipo

Para la obtención de los datos de la resistividad aparente se construyeron y utilizaron electrodos de acero inoxidable de 3/8"x40 cm de longitud para disminuir la polarización inducida del suelo; se utilizó un motogenerador de corriente alterna de 600 volts·amperes; se construyó para este trabajo un rectificador de corriente alterna a corriente directa.

Se utilizó un resistivímetro con voltímetro y amperímetro de alta impedancia de entrada (SISMR) integrados para tomar datos de la diferencia del potencial natural y el potencial inducido así como el dato de la corriente inyectada al suelo; también fueron necesarios juegos de cables para obtener los datos del voltaje en MN y carretes de cables en mayor longitud para los datos de corriente en AB que varían su distancia a cada medición; así como cables comerciales de interconexión del equipo de medición.

Dos cintas de 100 m cada una; marros de 4 libras; machetes para limpieza de maleza en el terreno; un paraguas con soporte la para protección del equipo de toma de datos. El equipo GPS postproceso se instaló con una estación de referencia y otra móvil para obtener la ubicación satelital de las coordenadas de SEV; SAW y pozos. Fueron necesarios elementos de protección personal para el trabajo de apoyo en la toma de datos, tales como: sombreros, bata, guantes, machetes, impermeables y botiquín con medicamentos para primeros auxilios en caso necesario.

3.3.2. Trabajo de campo

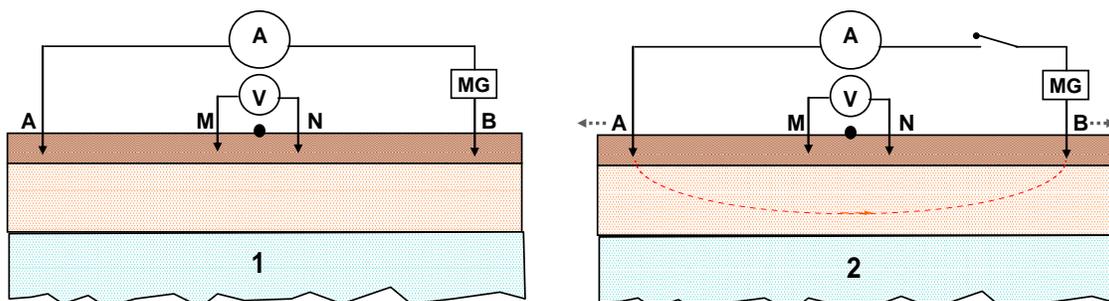


Figura 30. Dispositivo electrónico Schlumberger para (SEV).

En la figura 30 en (1) se muestra el arreglo electródico Schlumberger. A, M, N y B son cuatro electrodos de la configuración, en MN se mide el potencial natural; en (2), en los electrodos AB se inyecta la corriente rectificadora del motogenerador (MG) midiéndola en el miliamperímetro A también se mide el potencial inducido asociado a la corriente que se inyecta al subsuelo en MN.

El arreglo Schlumberger relaciona geoméricamente la resistividad aparente con la separación entre los electrodos de corriente AB relacionados en el factor K para obtener el dato de las resistividades aparentes de cada medición. De los datos de campo se obtiene una curva que es interpretada en la inversión de datos en términos de los parámetros de resistividad y dimensionamiento de los estratos que define el modelo usado para la interpretación.

3.3.3 Toma de datos de (SEV)

Ubicado el lugar del SEV, hecho el trazo preliminar con limpieza de maleza y obstáculos para la toma de datos; se colocan dos cintas alineadas de 100 m. y centro común en ceros. Se insertan con el marro electrodos de acero inoxidable en una línea recta predefinida a distancias de espaciamentos AB/2 y MN para un sondeo de 60 m de AB/2 mostrados en la Tabla 6.

Para este estudio se tomaron datos de 7 SEV en estiaje con valores de AB/2: (3 a 60 m.; 3 a 100 m.; uno a 200 m.). En lluvias 15 sondeos con valores de AB/2 de 60 m.

En la primera medición MN tiene un espaciamento de 0.40 m, el centro común 0.20 m. y AB 1.5 respectivamente a partir del centro; se registra el dato del potencial natural en la columna 4^a. Enseguida se energiza con la fuente externa de 5 a 10 segundos inyectando corriente al terreno figura 31 (2), estabilizadas las lecturas en el amperímetro y voltímetro se suspende la energización externa y se registran los datos de corriente y potencial inducido debido a la misma corriente en

su respectiva columna. Se cambian los caimanes de los cables del circuito correspondiente para la siguiente lectura. Ver la Tabla 6.

Tabla 6. Espaciamientos de AB/2 para 60 m con valores respectivos de MN, I , K y ρ_a

No. Progres.	AB/2	MN	Potencial natural	Potencial Inducido	Corriente I	Diferencia de potencial ΔV	K	$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mV	mA	mV	m	Ohm-m
1	1.5	0.4	16.3	953	67	936.70	17.6715	247.1
2	2	0.4	17.1	410	65	392.90	31.416	189.9
3	2.5	0.4	17.2	278	72	260.80	49.0875	177.8
4	3.5	0.4	17.4	125.1	68	107.70	96.2115	152.4
5	4.5	0.4	17.8	101	85	83.20	159.0435	155.7
6	6	0.4	17.9	54.7	57	36.80	282.744	182.5
7	8	0.4	18.2	43	57	24.80	502.656	218.7
8	10	0.4	17.9	37.1	58	19.20	785.4	260.0
9	10	1	15.6	54.9	57	39.30	314.16	216.6
10	15	1	15.1	40.4	67	25.30	706.86	266.9
11	20	1	14.8	33.1	81	18.30	1256.64	283.9
12	25	1	14.6	19.8	38	5.20	1963.5	268.7
13	25	2	94.1	103.4	37	9.30	981.75	246.8
14	35	2	93.9	97	35	3.10	1924.23	170.4
15	45	2	94.7	96.1	52	1.40	3180.87	85.6
16	45	4	138	140.7	52	2.70	1590.35	82.6
17	60	4	132.5	135.9	82	3.40	2827.44	117.2

Los incrementos de la distancia MN mostrados en la tabla 6; las lecturas de las fila 8-9, 12-13 y 15-16 se les llama empalmes (son la distancia entre las tomas de tierra de recepción r_{MN} y esta debe ser menor de 1/3 de la distancia entre las tomas de tierra de emisión de corriente r_{AB}). Con esta condición la relación $\Delta V/r_{MN}$ puede, con suficiente exactitud, considerarse igual a la intensidad del campo en el centro de dispositivo, es decir, considerarlo como dispositivo límite. Esto facilita la comparación de resultados de las observaciones de campo con los cálculos teóricos dados de la intensidad de campo.

El espacio que guardan entre AB/2 y MN no es proporcional, (Boyd, 1996). Menciona que al no ser equidistantes los electrodos de potencial y de corriente el espacio entre electrodos de potencial debe ser menor que 2/5 al valor de

separación de los electrodos de corriente al desplazarse hacia fuera, la diferencia de potencial llega a ser tan pequeña que el voltímetro no la podría leer y es necesario incrementar el valor en distancia de MN para incrementar la diferencia de potencial que se desea medir con precisión. Se calculan los valores de la resistividad aparente de los datos ΔV , I y K ; con los datos de campo obtenidos, se obtienen los gráficos de las curvas de resistividad aparente mostrada una de ellas en la figura 31.



Figura 31. Gráfica de resistividad aparente en Ωm contra $AB/2$ en metros.

Para obtener el modelo propuesto, se utilizó un programa de modelado directo (CICESE, 1995), en él se hacen coincidir a los datos de campo de la curva de resistividad aparente, los valores propuestos del número capas, espesores de las capas y resistividades del modelo que se propone; muestra el programa a cada valor de iteraciones las semejanzas y acercamientos entre las curvas hasta lograr un error cuadrático medio menor al 10%. Los valores obtenidos de espesores de

los estratos en metros y sus resistividades en Ωm correspondientes, se muestran en una gráfica en Excel para ejemplificar en la figura 32.

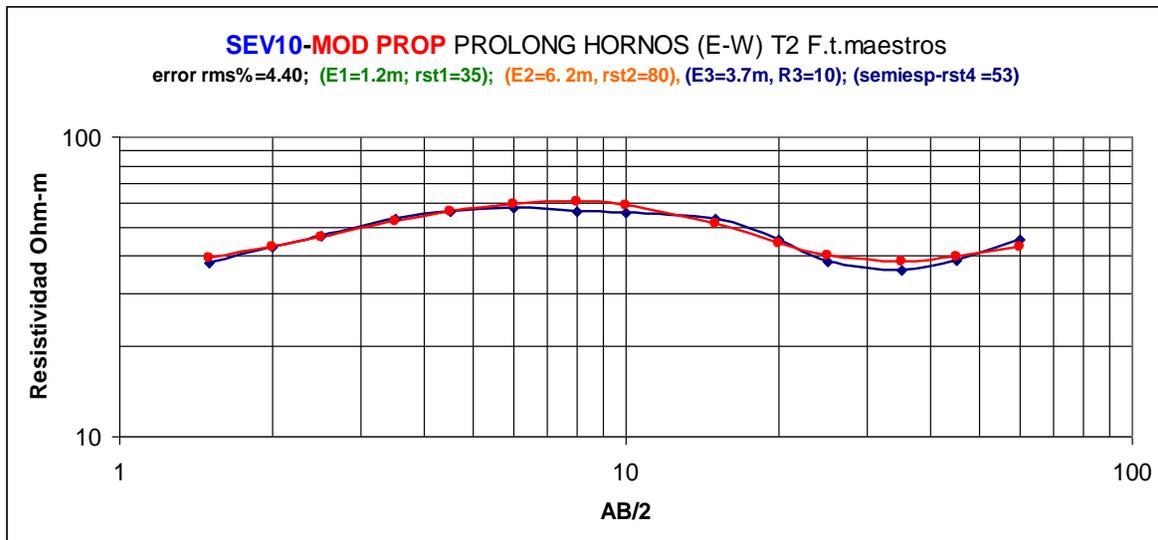


Figura 32. Gráfica de resistividad aparente y modelo propuesto en Ωm .

Con los datos de espesores y resistividades se genera el corte geoelectrico integrando los perfiles correspondientes de las secciones de interés predeterminadas. Estos son mostrados en el capítulo de resultados, para correlacionarlos a las causas-efecto que originan el problema que se investiga respecto a los SPT.

3.4. Sondeo Wenner Azimutal

Este método geoelectrico es de corriente continua, con este arreglo de electodos se pueden determinar la distribución de las propiedades físicas litológicas de origen sedimentario en los estratos de una área definida de suelo y las variaciones de resistividad aparente con la orientación.

El arreglo electródico es semejante al arreglo Schlumberger, la variación está en que la distancia entre ellos es: $AM=MN=NB=a$ como se muestra en la figura 33.

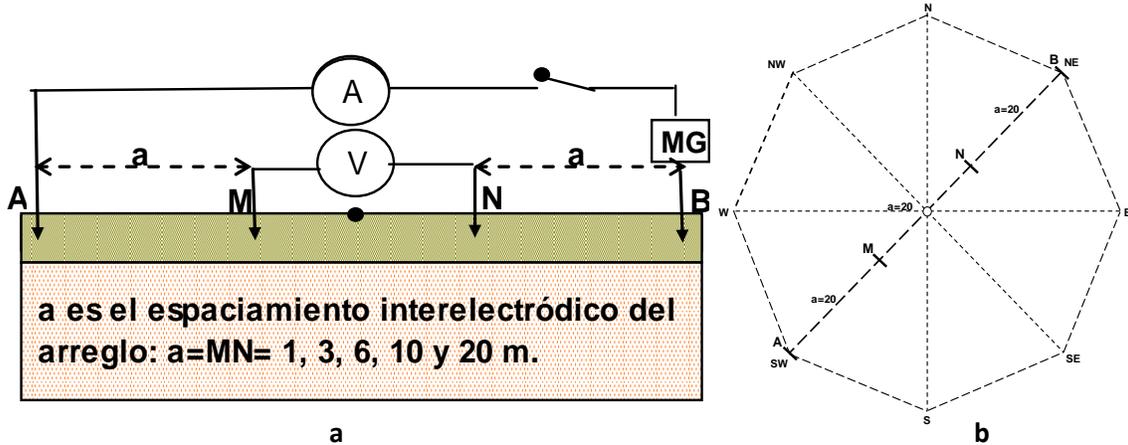


Figura 33. Dispositivo eléctrico Wenner azimutal y su emplazamiento.

En la figura 33 para este arreglo eléctrico se distribuyen los electrodos con los valores definidos para $a=1, 3, 6, 10$ y 20 m. con estos valores de a sobre cada rumbo azimutal figura b.

Se ubicaron ocho sitios apropiados para tomar datos en estiaje y lluvias, en total 16 sondeos azimutales Wenner. Cada sondeo requiere de un área que genere una circunferencia de 62 metros de diámetro factible de limpieza para el trazo, en la que se debe ubicar el centro de cada sondeo.

3.4.1. Materiales y equipo

En la toma de datos de estos sondeos se utiliza el mismo equipo de los SEV para obtener los valores de $\Delta V, I$ y K ;

Para agilizar el trazo y economizar recursos se construyó una herramienta para la toma de datos en forma precisa y ágil.

Con una placa metálica redonda de $\frac{1}{4} \times 3$ ", con un orificio de $\frac{5}{8}$ " al centro, y marcados los rumbos azimutales en el diámetro exterior se les soldaron argollas

metálicas de $\frac{3}{4}$ " de diámetro en las que se fijaron sólidamente ocho mecatres de $\frac{1}{2}$ " de material no elástico de treinta y un metros.

Un perno metálico de $\frac{1}{2}$ " x12" con punta en un extremo se entierra en donde corresponda el centro del azimutal, se ensarta la placa con las argollas soldadas en los ocho rumbos. Con dos cintas de 50 metros alineadas con centro común en ceros, se marcan las cuerdas con cinta de aislar de colores eligiendo un color de marca para cada valor de (a = 1, 3, 6, 10 y 20 m).

3.4.2. Trabajo de campo

Una vez realizado el trazo preliminar con la limpieza se coloca el perno en el centro del sondeo se inserta en él la placa construida como herramienta de trabajo. Instalado el teodolito se orientan los rumbos con sus proyecciones complementarias fijando los extremos de las cuerdas con los espaciamientos marcados; se clavan los electrodos de todos los rumbos en las marcas correspondientes, se instala la fuente de energización, el rectificador de corriente, el resistivímetro, los carretes de conductores para la medición del potencial y la corriente inyectada.

3.4.3. Toma de datos

Para el proceso de medición; se anotan los datos en el formato preparado con anterioridad. Primeramente se anota el dato del potencial inducido, estabilizado este dato se energiza con la fuente externa de 5 a 10 segundos corriente hacia el terreno, estabilizadas las lecturas en el amperímetro y voltímetro se suspende la energización externa y se anotan los datos del potencial inducido debido a la corriente inyectada, se anota el dato de la corriente para cada valor de a. Se cambian los caimanos del circuito correspondiente para la siguiente lectura, hasta tener la información completa del azimutal mostrado en la tabla 7.

Tabla 7. Datos de campo de azimutales Wenner.

SONDEO No:		Ubicación:			Fecha:		
SONDEO AZIMUTAL		Potencial natural	Potencial Inducido	Diferencia de potencial	Corriente	K	$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$
Lectura	<i>a</i>				<i>I</i>	$2\pi a$	
Dirección	m	mV	mV	mV	mA	m	Ohm-m
N - S	1	0.0009	3.6		0.031	6.2832	619
	3	0.61	1.42		0.27	18.8496	564
	6	0.05	0.62		0.49	37.6992	460
	10	-0.012	0.101		0.018	62.832	394
	20	-0.007	0.089		0.052	125.664	232
NE-SW	1	-0.0009	2.35		0.024	6.2832	617
	3	0.54	1.77		0.042	18.8496	553
	6	0.0227	0.584		0.04	37.6992	528
	10	-0.038	0.84		0.017	62.832	451
	20	0.019	0.092		0.03	125.664	305
E - W	1	0.0004	4,2		0.042	6.2832	627
	3	0.5	1.3		0.37	18.8496	408
	6	0.0016	0.5		0.055	37.6992	340
	10	-0.03	0.11		0.038	62.832	231
	20	0.0057	0.14		0.069	125.664	244
SE-NW	1	0.02	-4.58		0.047	6.2832	616
	3	-0.62	-1.56		0.028	18.8496	634
	6	-0.0087	0.0.4		0.070	37.6992	601
	10	0.0116	-0.2		0.036	62.832	369
	20	0.0259	0.15		0.077	125.664	286

Se toman los valores de la ubicación X, Y y Z del azimutal correspondiente con GPS.

Los datos obtenidos se procesan para cada valor de "a" en los cuatro rumbos, se agregan las extensiones complementarias de cada rumbo para obtener los gráficos azimutales.

Se determinan los índices de anisotropía λ que es el cociente entre la resistividad máxima y la resistividad mínima para valores de a=1, 3, 6, 10 y 20 para cada valor del azimutal correspondiente.

Los índices de anisotropía se graficaron para cada temporada estacional que los distribuye en el gráfico con los valores de las coordenadas de GPS para cada valor correspondiente de a , mostrando la distribución de λ y su variación a cada profundidad en el área de estudio. En los gráficos obtenidos contienen en si la distribución de las propiedades físicas y su variación en los estratos a través de las cuales puede inferirse el comportamiento del subsuelo y cómo influyen en la eficiencia o ineficiencia de los SPT.

3.5. Piezometría

Esta propiedad geohidrológica utiliza una serie histórica de datos a partir de indicadores numéricos que permiten la comparación cuantitativa de los valores hidrogeológicos como la influencia de la explotación, las variaciones de los niveles en las recargas naturales estacionales de almacenamiento, la cantidad, calidad, contaminación, cambio climático y situaciones de sequía del agua subterránea, entre otros.

El objetivo de usar la piezometría fue obtener el informe de los datos representativos del acuífero que posibilite las comparaciones de la humedad incidente en la variación de la resistividad de los estratos en dos temporadas, lluvias y estiaje.

3.5.1. Materiales y equipo

Se ubicaron siete pozos en el área de interés en los cuales se tomaran los datos en estiaje y lluvias. Estos pozos son:

1. Pozo profundo de la Universidad La Salle.
2. Pozo profundo del CIIDIR IPN-U Oaxaca.

3. Pozo del Colegio Vista del Valle.
4. Pozo con anillos desplomados en un terreno baldío.
5. Pozo particular anillado con una planta de maracuyá en un terreno baldío.
6. Pozo anillado en el banco de arena.
7. Pozo anillado cercano al vado del fraccionamiento ampliación INDECO.

Los equipos usados en este método fueron:

1. Sonda con sensor eléctrico de sonido al contacto del agua.
2. Equipo GPS postproceso
3. Cinta métrica de 100 m.

3.5.2. Trabajo de campo y toma de datos

Se toman los datos con el equipo GPS de las coordenadas X, Y, Z que determinan la ubicación de cada pozo en temporada de estiaje y lluvias. Así mismo el valor del nivel estático que es la altura entre el nivel del agua y el nivel del suelo.

En algún caso para medir la profundidad del pozo es necesaria una referencia que puede ser el brocal del pozo, la dimensión de referencia se debe restar o sumar en su caso al dato de la profundidad medida para obtener el dato real del nivel estático.

El nivel piezométrico es el valor del nivel estático referido al nivel del mar. Se obtiene restando el valor del nivel estático a la coordenada Z.

Se obtuvieron los gráficos de la dirección preferencial del flujo del agua subterránea, así como los perfiles del nivel freático los cuales son útiles para la correlación con los datos de los otros métodos indirectos.

3.6. Granulometría

Para una adecuada comprensión de las propiedades del medio granular se usó el método empleado en mecánica de suelos que determina con el procedimiento de la técnica de cribado conocer las agrupaciones de las partículas del suelo en un mayor número de tamaños, sobre todo la proporción de los agregados finos y la técnica de análisis de suspensiones. Comúnmente la representación gráfica de la distribución granulométrica es más usada, las ordenadas se refieren a porcentaje en peso. Las abscisas en escala logarítmica definen los diferentes tamaños de los agregados.

La prueba de límites Atterberg designa límite líquido, límite elástico y límite plástico e índice de contracción lineal en función de los contenidos de arcilla.

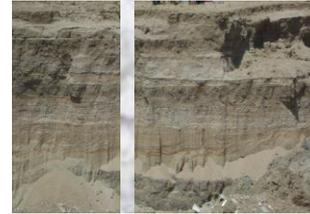
3.6.1. Materiales y equipo

Del Laboratorio de Construcción del CIIDIR IPN se utilizaron los utensilios, herramientas y equipos mostrados en la figura 34. Como balanzas granatarias de precisión; estufas eléctricas de secado; estufa de gas LP; charolas, recipientes, vidrios de reloj, matraces, porcelanas charolas y dispositivo de Atterberg. Se utilizaron los tamices de la malla 4 a la 200 para el cribado granulométrico. La muestra de trabajo se secó y homogenizó en el patio del mismo laboratorio.

En esta fotografía se muestra el sitio de obtención de la muestra, es un banco de extracción de arena y grava, el estrato superficial es una mezcla de limo y arcilla. La profundidad promedio del banco es de 6.00m. Se extraen los agregados pétreos para su venta en obras en construcción.



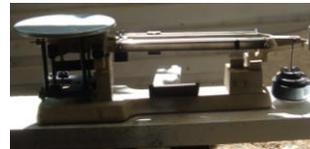
La muestra se obtiene de un corte longitudinal de una sección de 0.10x0.10 m. cuidando que no se mezcle ni desperdicie. Esto es para tener la distribución granulométrica homogénea del corte completo.



La fotografía muestra el proceso de secado en el sol de la muestra del suelo en el que elimina el contenido de agua. Se ca la muestra se mezcla perfectamente para homogenizarla medio de una pala generando un cono que se secciona en cuatro partes iguales.



Se obtiene el peso volumétrico en un recipiente y en la báscula se pesa y se separa la grava mas gruesa de la muestra que no paso en la malla # 4 para obtener la granulometría gruesa.



El material tamizado de gravillas y arenas bien graduadas con gránulos finos. Se toman 200 gramos y se lavan bien hasta obtener agua limpia para determinar la granulometría fina.



El material tamizado que paso en la malla # 4 es la nueva muestra que bien lavada, secada en estufa y pesada se tamiza minuciosamente en los tamices #10, 20, 40, 60, 100 y 200 pesando el material granular que pasa en cada tamiz evitando la pérdida de partículas granulares por pequeñas que sean para obtener de los datos el gráfico de la muestra de granulometría.



En la foto aparentemente es poco plástica la depositación de limos y arenas muy finas, polvo de roca, con arenas limoarcillosas. Sin embargo en la toma de muestras se observa que esta depositación no es de arrastre del mismo río, es depositación independiente de lluvias de los lomeríos adjuntos al río.

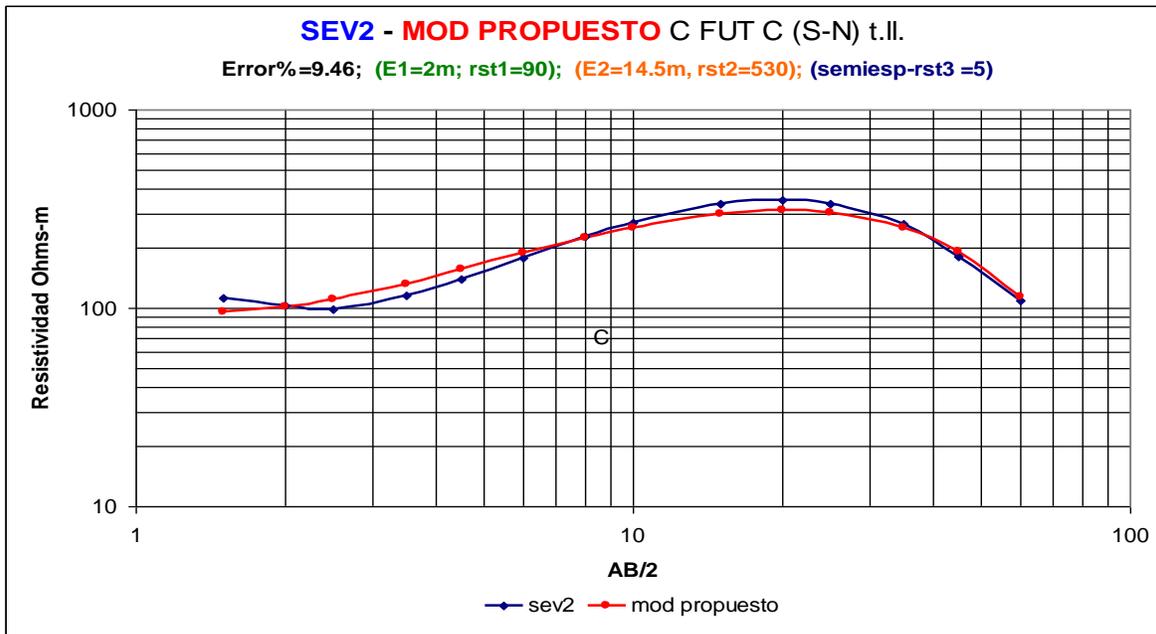
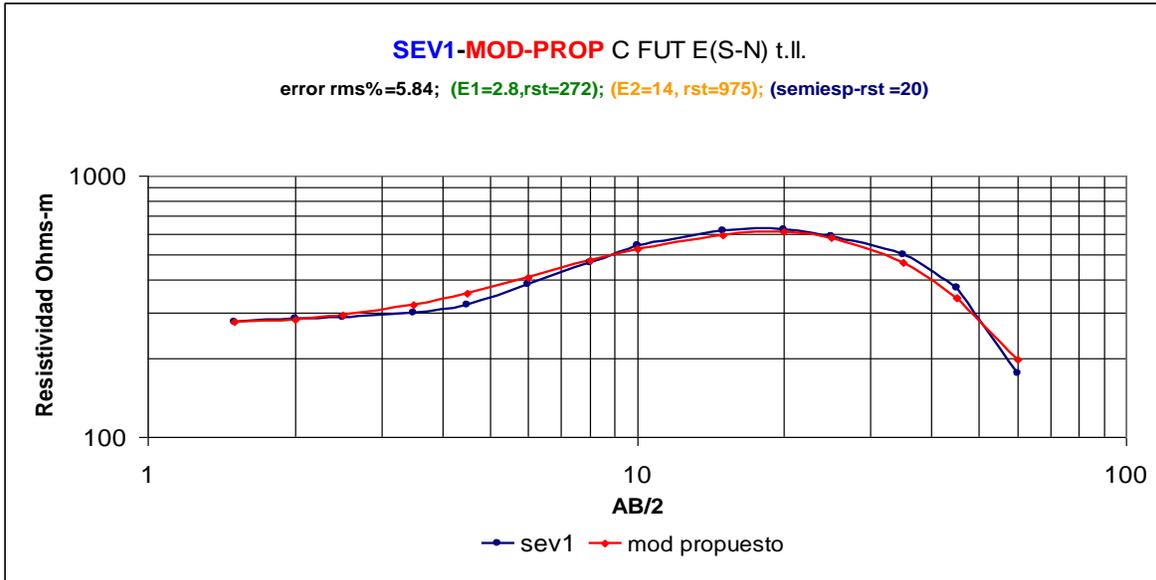


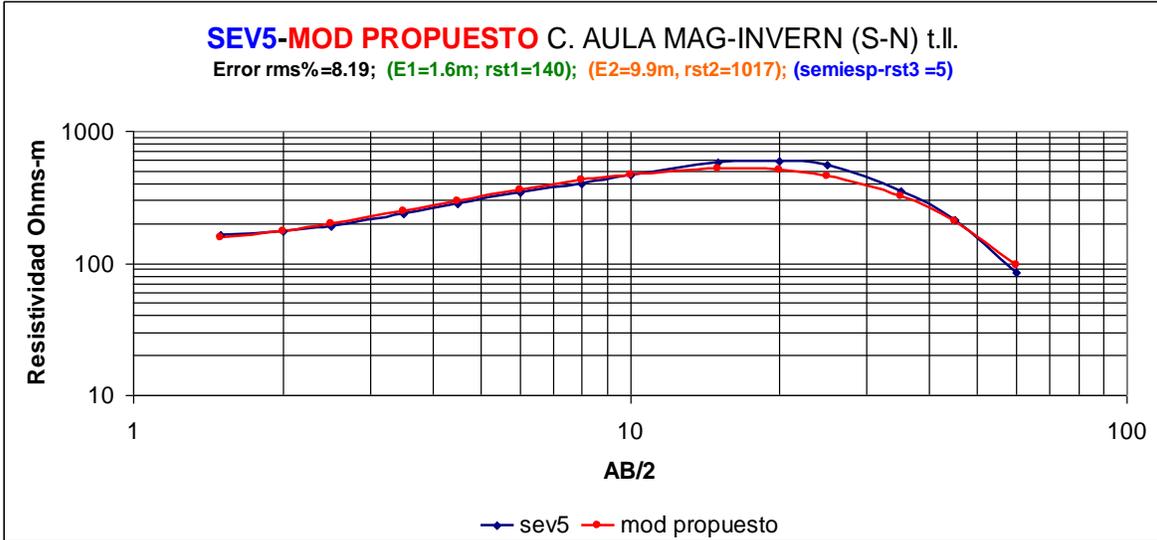
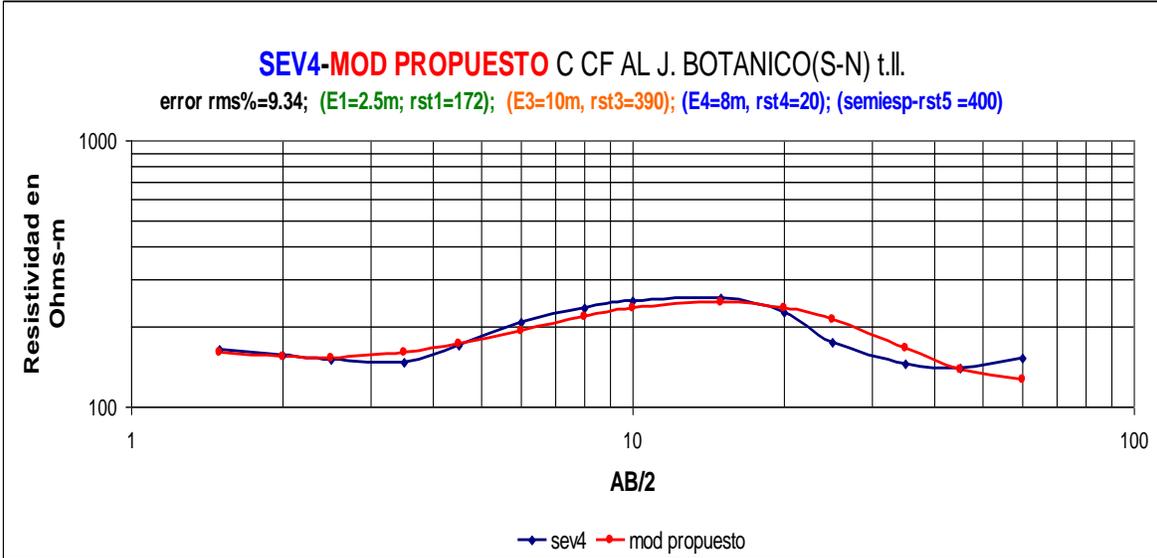
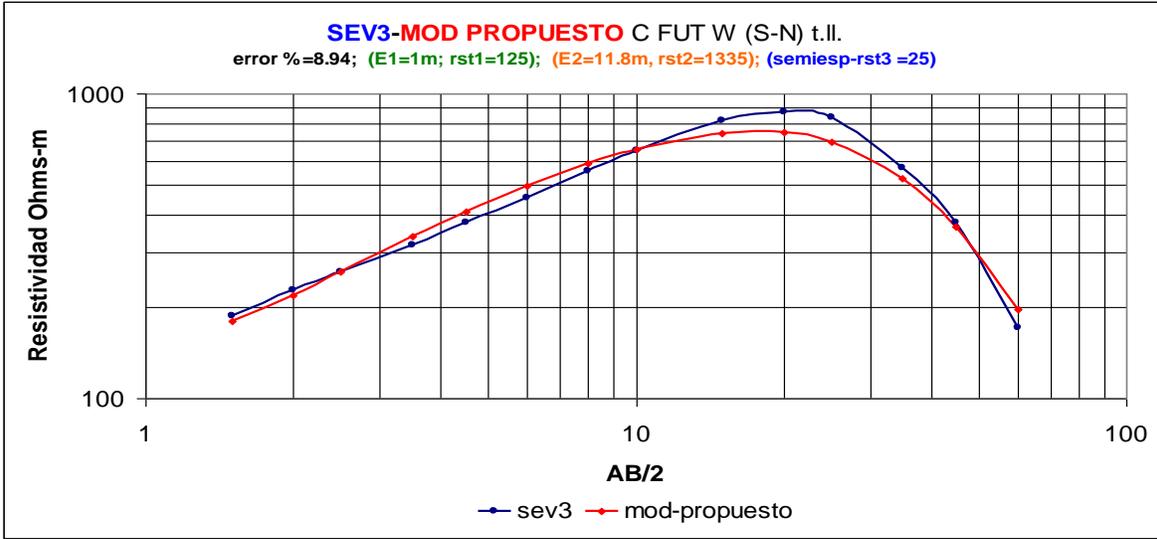
Figura 34. Secuencia metodológica para obtención de los datos de granulometría y los equipos usados.

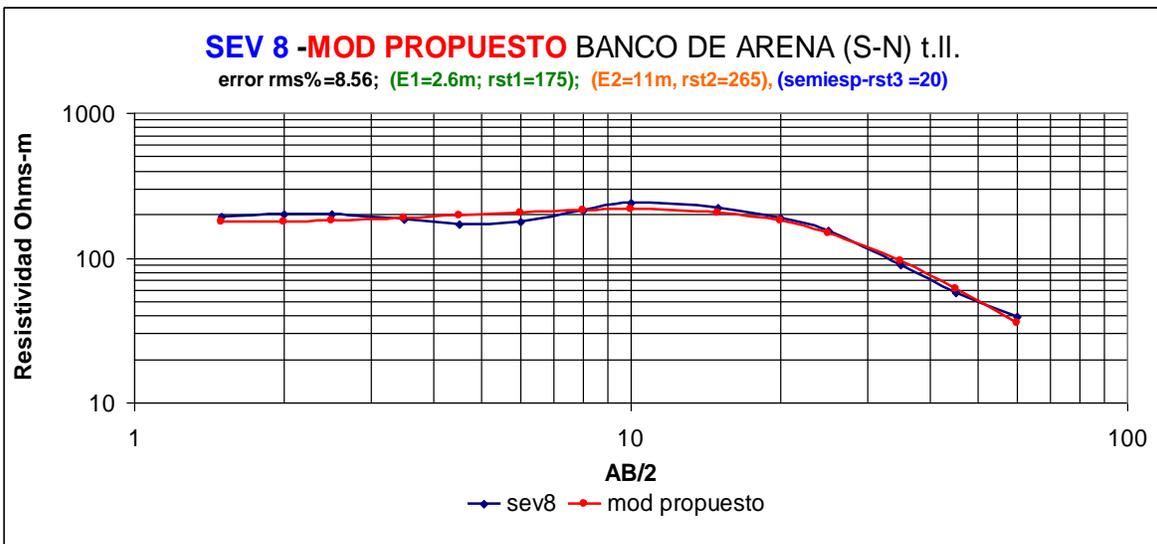
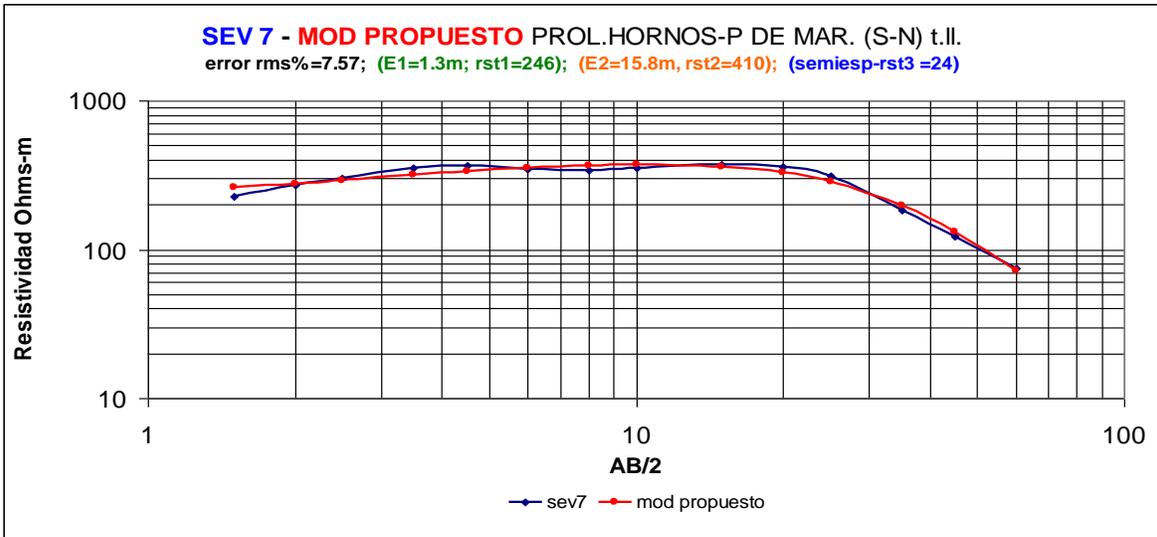
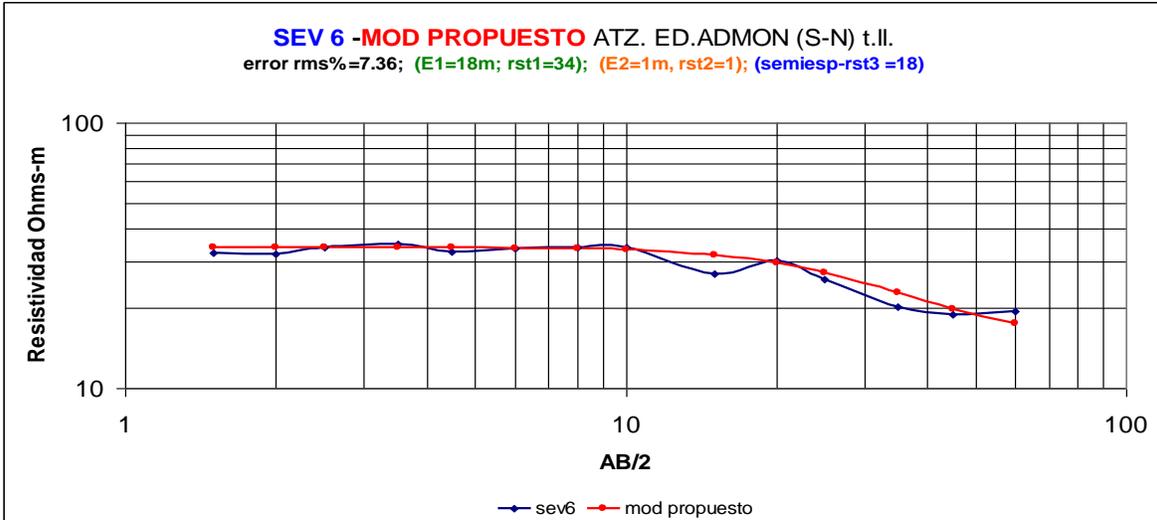
CAPÍTULO IV. Resultados y discusión

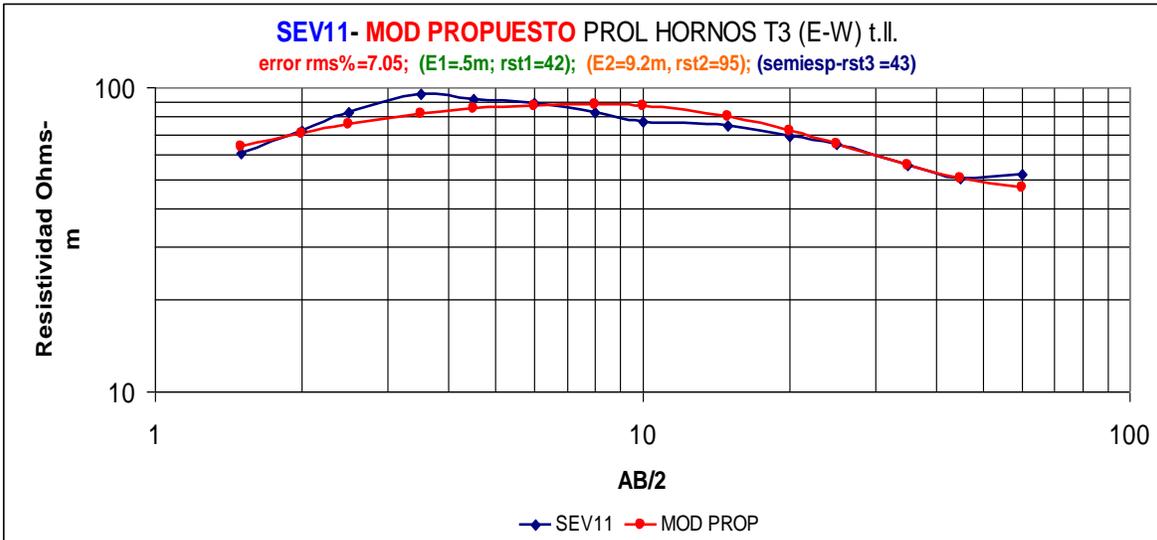
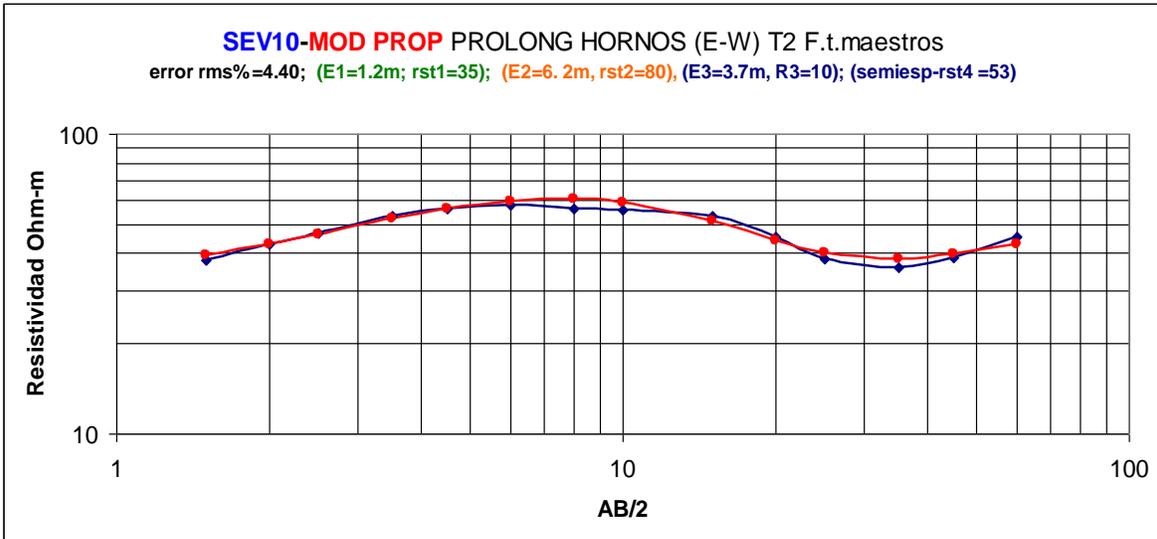
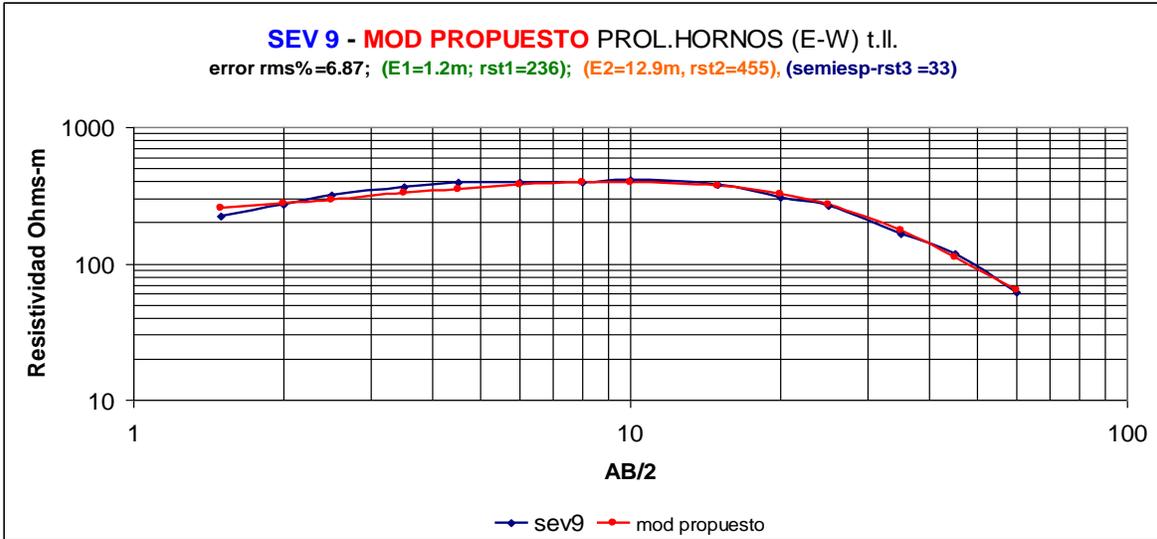
4.1 Gráficos de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

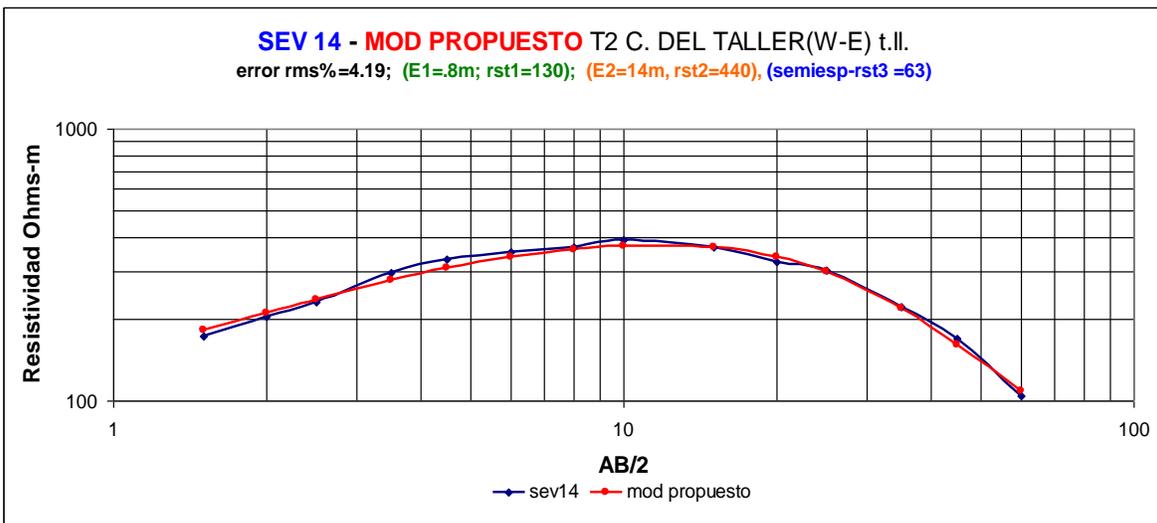
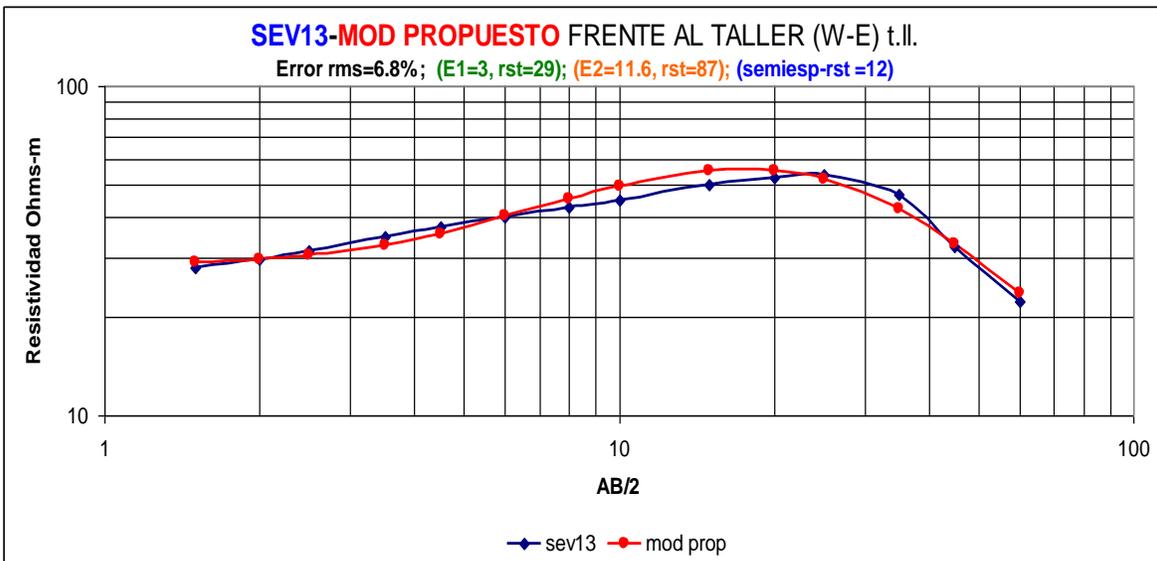
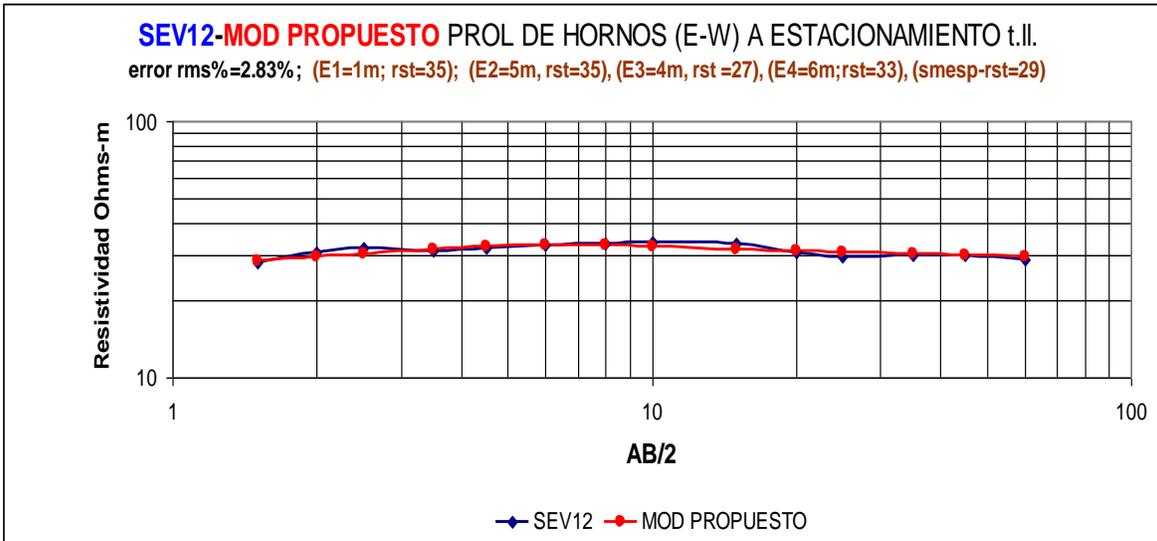
Los gráficos de los datos de campo están en color azul y el gráfico del modelo propuesto en rojo. Se incluye el dato del error cuadrático medio para cada gráfico, en verde los valores del primer estrato en metros y la resistividad en $\Omega\cdot m$, en color naranja los datos de la arena seca; en azul los datos de la zona saturada.

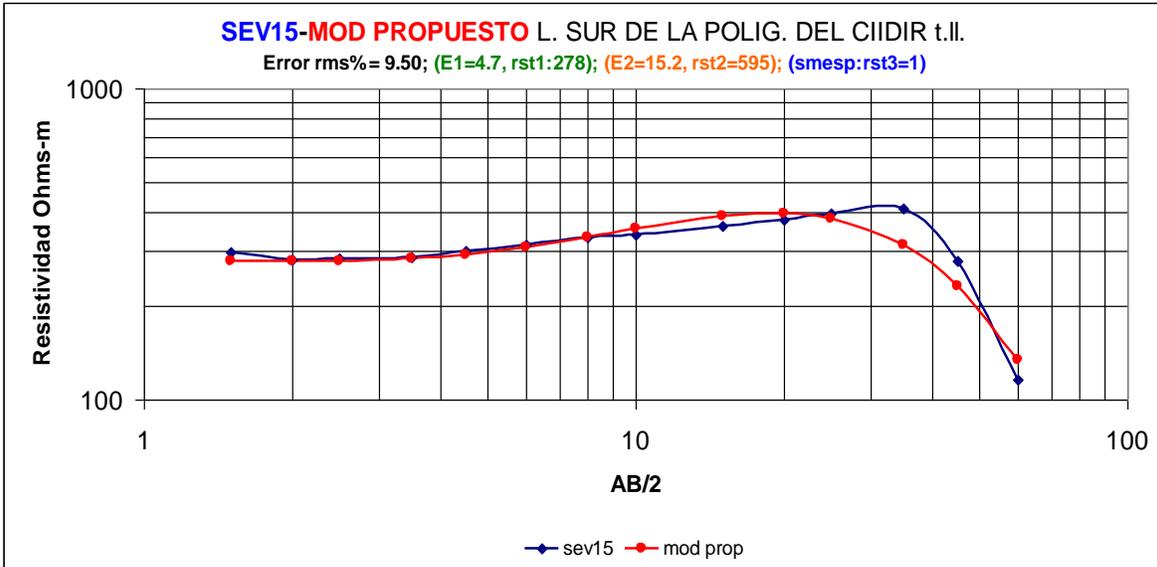




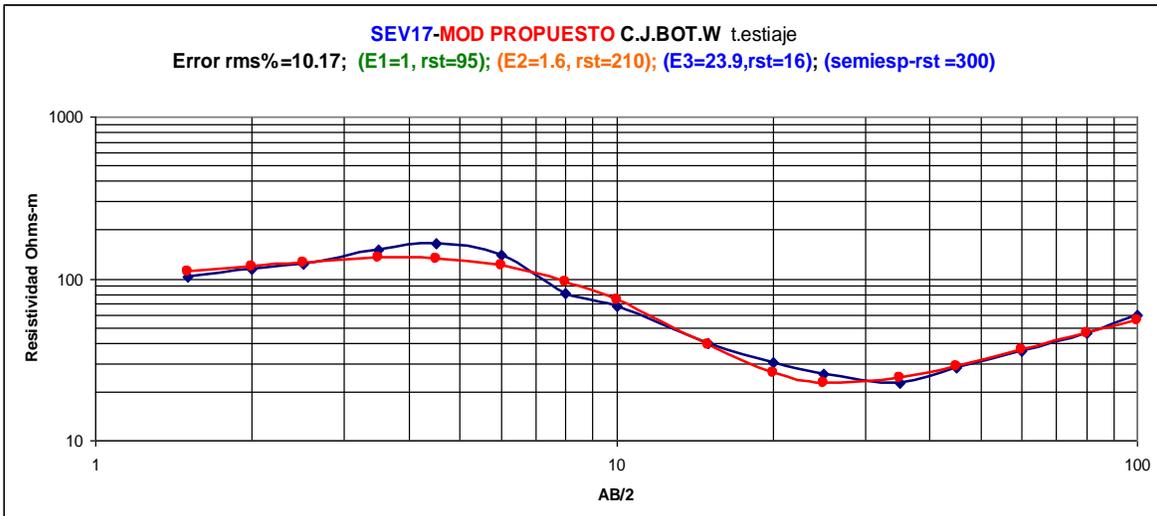
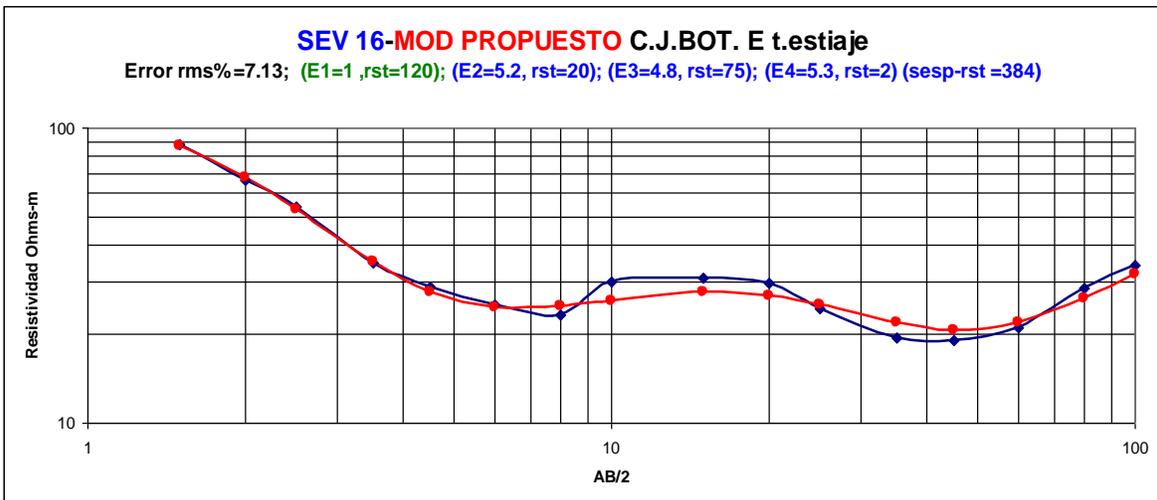


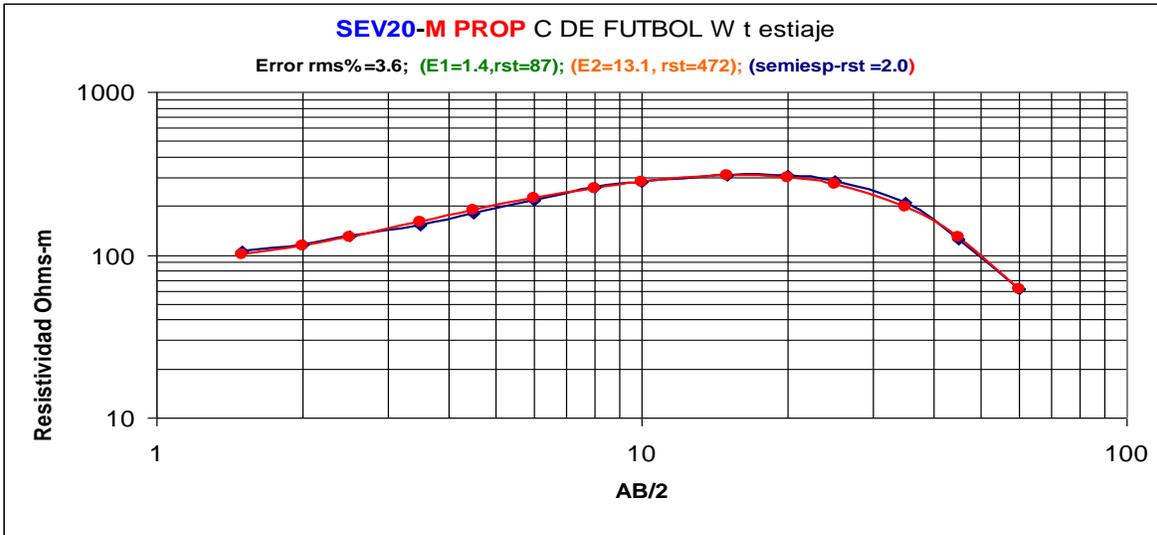
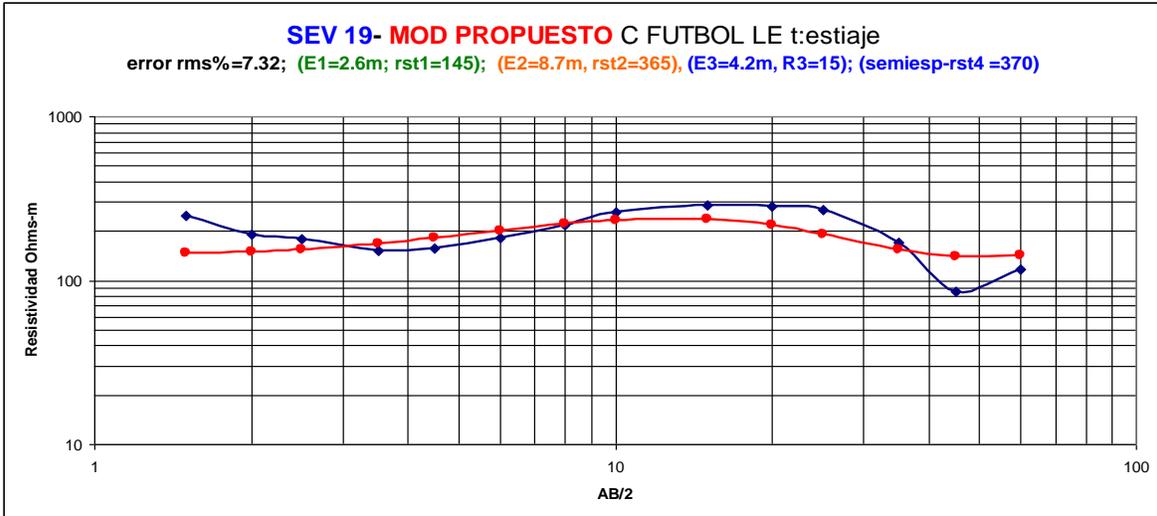
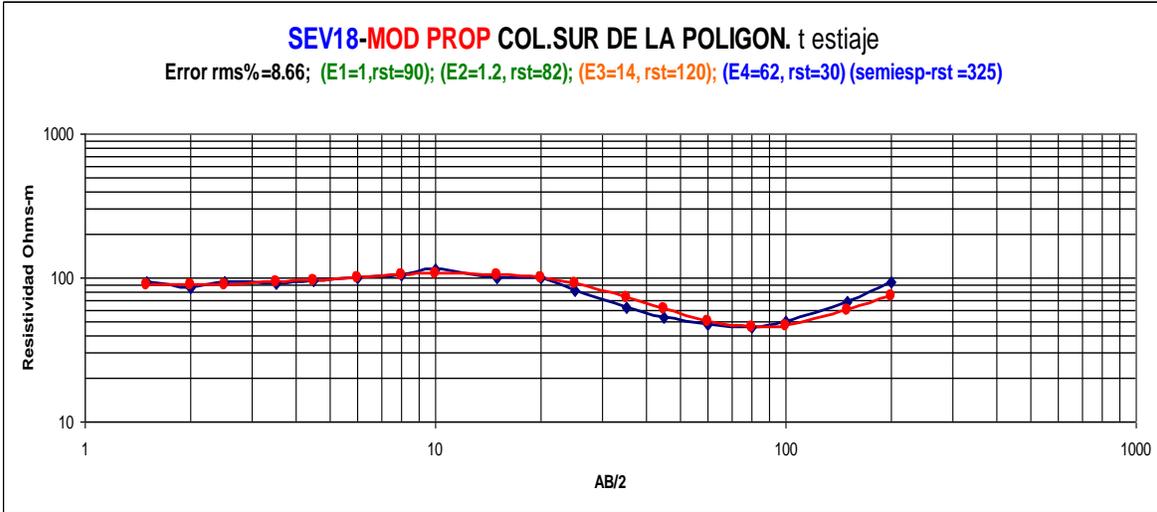


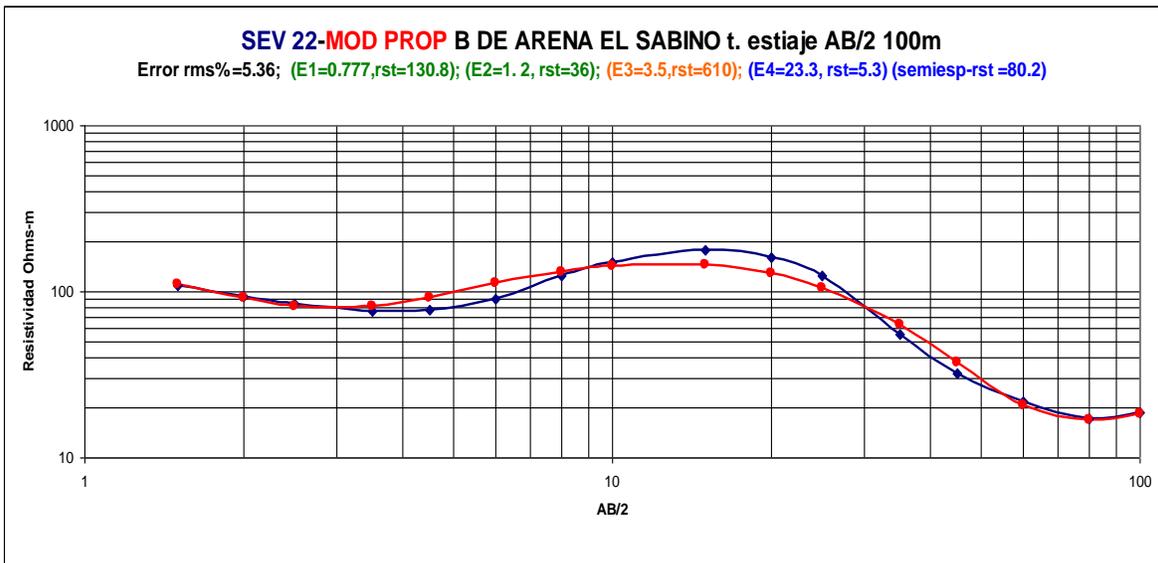
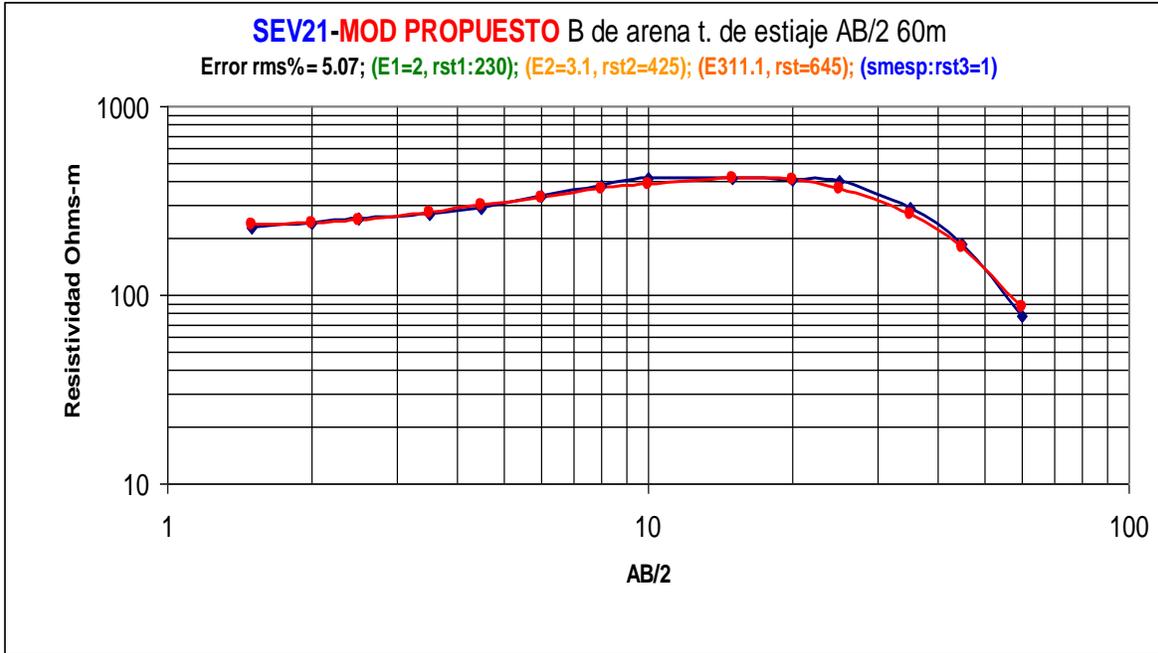




SEV en temporada de estiaje







1. Los sondeos 6, 8, 10, 11, 12, y 13 se modificaron de su estratificación original. Los estratos y resistividades no corresponden a la conformación aluvial de origen. Los agregados pétreos originales fueron extraídos y sustituidos por materiales de relleno de diferente origen modificando las propiedades. Para los promedios comunes a estratos originales estos sondeos no se consideraron.

2. Para cada sondeo la profundidad a la zona saturada fue variable al cambiar la altura sobre el nivel del mar HSNM, el nivel piezométrico y la dirección del flujo subterráneo. Sin embargo con los datos de cada sondeo se pudo obtener el promedio de profundidad a la zona saturada para generar un gráfico promedio general del medio.
3. Los sondeos de 60 m de AB/2 en lluvias alcanzan una profundidad promedio de 14.82 m. a la zona saturada; El SEV 4 de S a N encuentra roca basal (basamento geohidrológico). El SEV 10 en la prolongación de Hornos en la zona saturada sube la resistividad de 10 a 53 Ohm-m no es roca, puede tratarse de un cuerpo arcilloso dentro del medio granular saturado.

Los SEV's 16 al 22 se hicieron en temporada de estiaje; el 19, 20 y 21 son de AB/2=60; el 16, 17 y 22 son de AB/2=100 m.; el SEV 18 es de AB/2=200 m.

Los SEV's del 1 al 15 son de temporada de lluvias y de abertura AB/2=60 m.

Los 22 gráficos mostrados se procesaron en Excel. El modelado de los datos se hizo a través del modelado directo (CICESE, 1995). En él se obtienen modelos propuestos en iteraciones estadísticas para obtener un modelado con error cuadrático medio menor al 10% en la inversión de los datos de campo. El promedio de error es de 7% en los 22 modelos propuestos.

La terraza de estudio se ubica al Oeste del río Atoyac y Este del Fraccionamiento INDECO Ampliación del municipio de Santa Cruz Xoxocotlán. La distancia desde la calle que divide la Universidad La Salle con el tequio al vado del río en el Fraccionamiento INDECO Ampliación es: 1118.74 m de longitud y 9.79 m es la diferencia de nivel por lo tanto la pendiente de inclinación de la superficie estudiada es de: $9.79/1118.74 = 0.0087\%$ (que corresponde a un ángulo de inclinación menor a 5°), datos obtenidos con GPS postproceso.

Con los datos obtenidos en campo y los modelos propuestos contenidos en los gráficos se presentan como resultado cinco perfiles estratigráficos en las figuras

36 a la 40 caracterizando en los cortes los estratos de arcilla y limo; arenas y gravas de baja graduación; la zona saturada; las dimensiones de cada estrato y las propiedades de resistividad.

4.2. Perfiles de los cortes geoelectricos

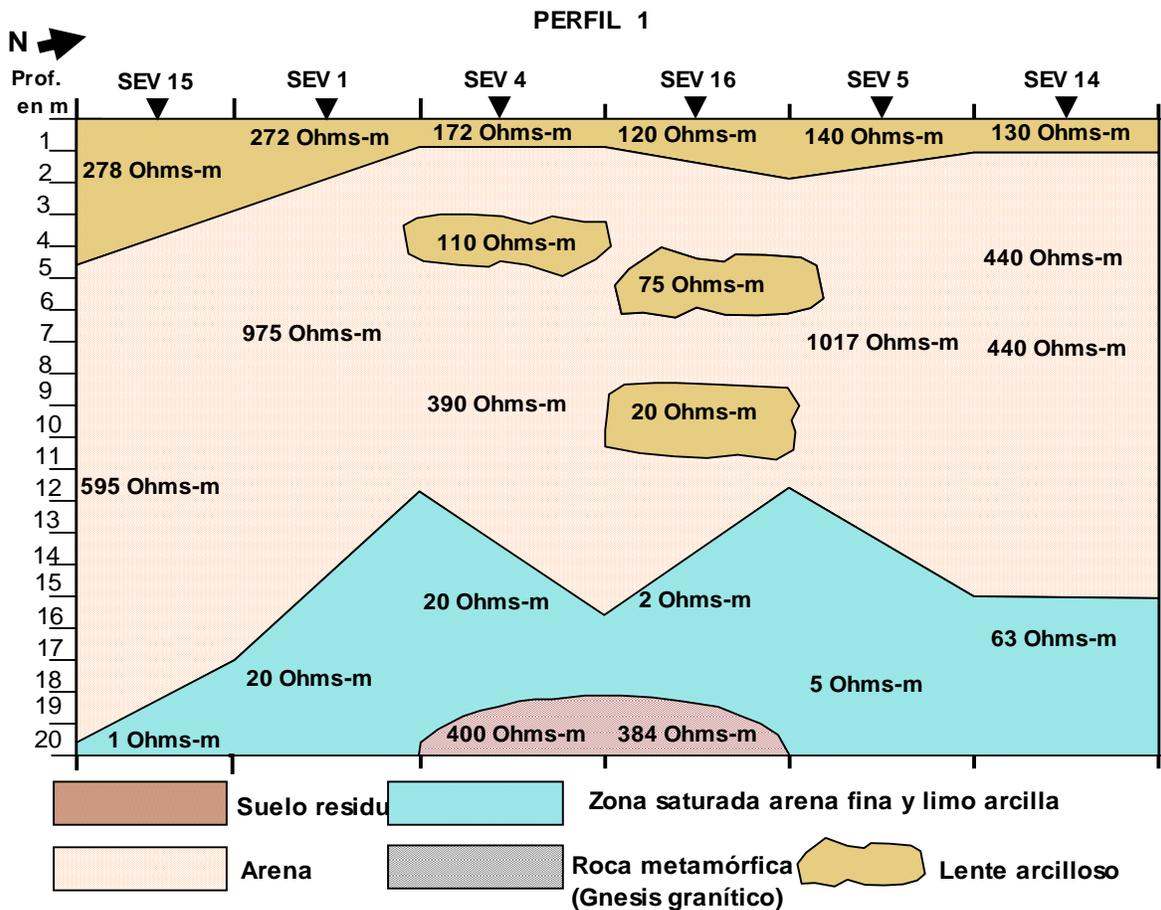


Figura 35. Perfil geoelectrico realizado con los SEV's: 15, 1, 4, 16, 5 y 14.

En el perfil de la figura 35 el estrato superficial es arcilla y limo corresponden las resistividades a las arcillas. El grosor de 4.7 metros de espesor corresponde al SEV 15 y al SEV 14 el grosor de 0.8, metros en este perfil.

Este estrato de arcilla y limo es la cubierta superficial del suelo bajo estudio que se formo por erosión de arrastre de lluvias (propiedad de tixotropía de arcillas)

transportándola en solución coloidal de las colinas de Monte Albán, San Javier, San Pedro Ixtlahuaca, Arrazola y lomeríos cercanos depositándose lentamente en las Riveras del río Atoyac, (Domínguez, 1992).

Las arcillas en sus comportamientos hidráulico y mecánico derivados de la cantidad de agua absorbida determina propiedades de plasticidad o tixotropía teniendo ambas propiedades efectos colaterales sobre la resistividad en la arena, (Juárez, 1985).

En el corte geoelectrico 2 y 3 de las figuras 35 y 36 es notable la distribución homogénea del material de origen no alterado.

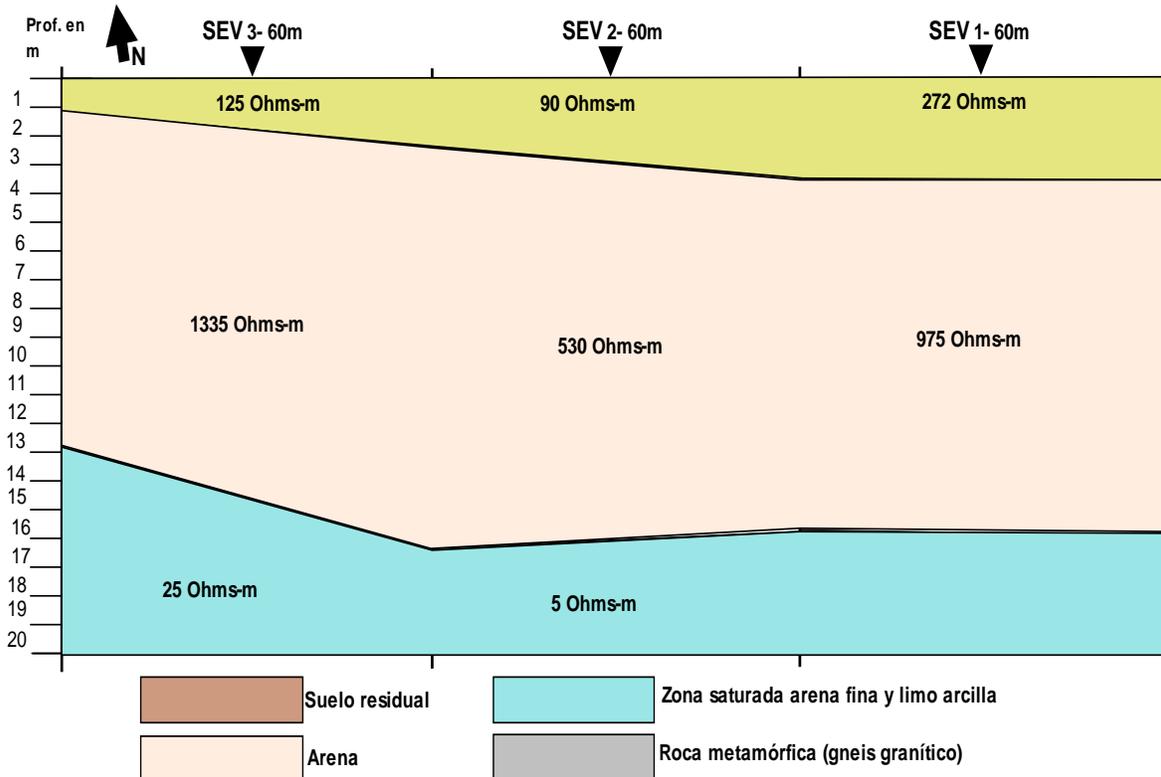


Figura 36. Perfil geoelectrico realizado con los SEV's: 3, 2 y 1.

Los tres primeros estratos de la figura 37 son fundamentales en la disipación de corrientes de descargas atmosféricas y de falla en los SPT. La arcilla no dispersa corrientes eficientemente, se nota en el estrato de arena ausencia de humedad

que lo hace aislante con una resistividad de 1335 Ωm . de cuatro dígitos y una profundidad de 13.00 m. a la zona saturada para el SEV 3.

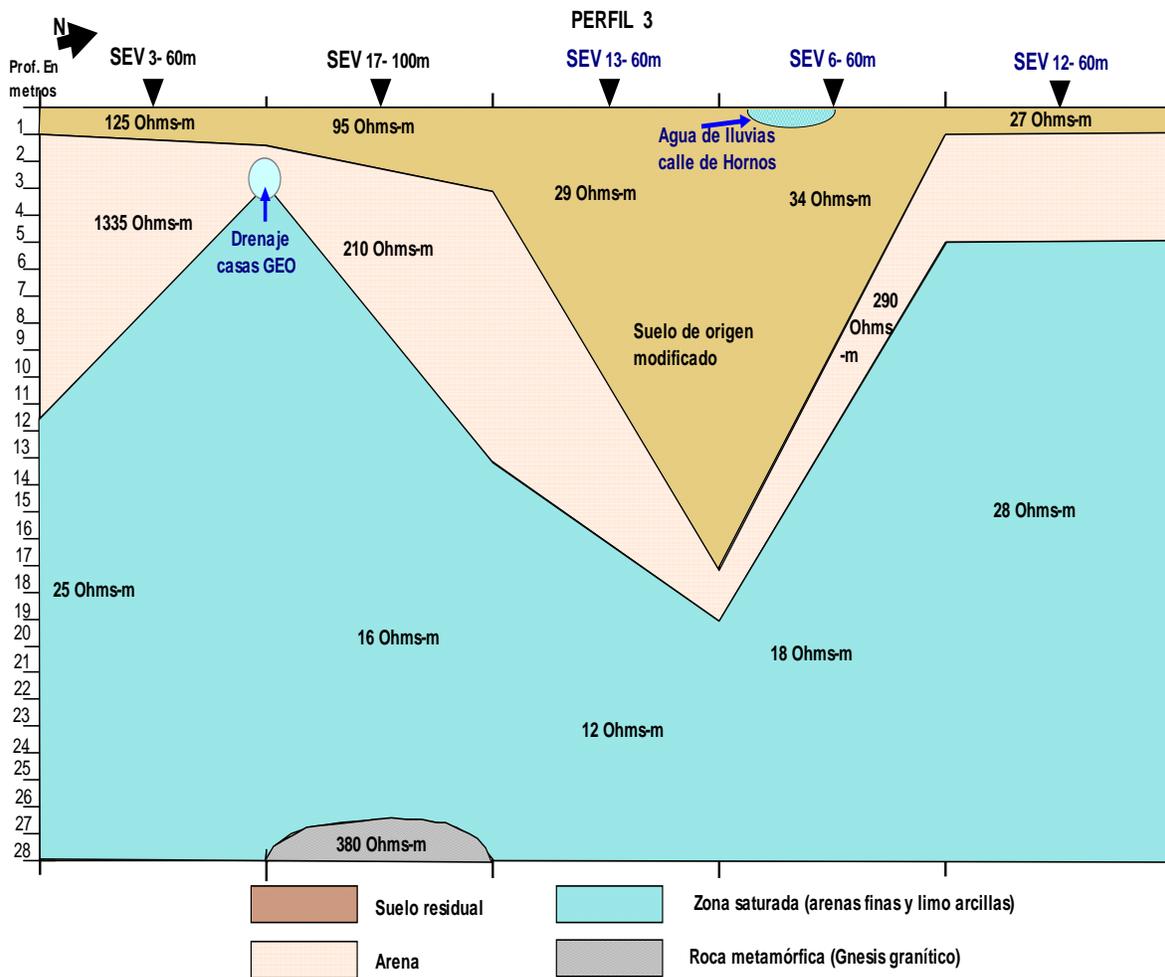


Figura 37. Perfil geoelectrico realizado con los SEV's: 3, 17, 13, 6 y 12.

En la figura 37 los sondeos 3, 17, 13, 6 y 12 han sido modificados por la extracción de materiales pétreos del subsuelo. El primer estrato es relleno de escombros y con propiedades permeables diferentes a la arcilla. Las resistividades no corresponden al material original. La descarga del drenaje en el SEV 3 y 17 manifiestan infiltración del drenaje de casas GEO al subsuelo y la descarga del agua pluvial en la calle hornos alteran las propiedades de resistividad.

Similarmente en el perfil geoelectrico 4 de la figura 38. La descarga del agua de lluvia en el SEV 12 es suelo modificado de origen. Estos sondeos se tomaron en la

calle prolongación de Hornos; del río al estacionamiento del CIIDIR IPN U: Oaxaca; el único sondeo de material original es el (SEV) 9, la determinación del nivel freático es engañoso por el cambio de materiales sustitutos del material granular original que cambio las propiedades de resistividad del medio.

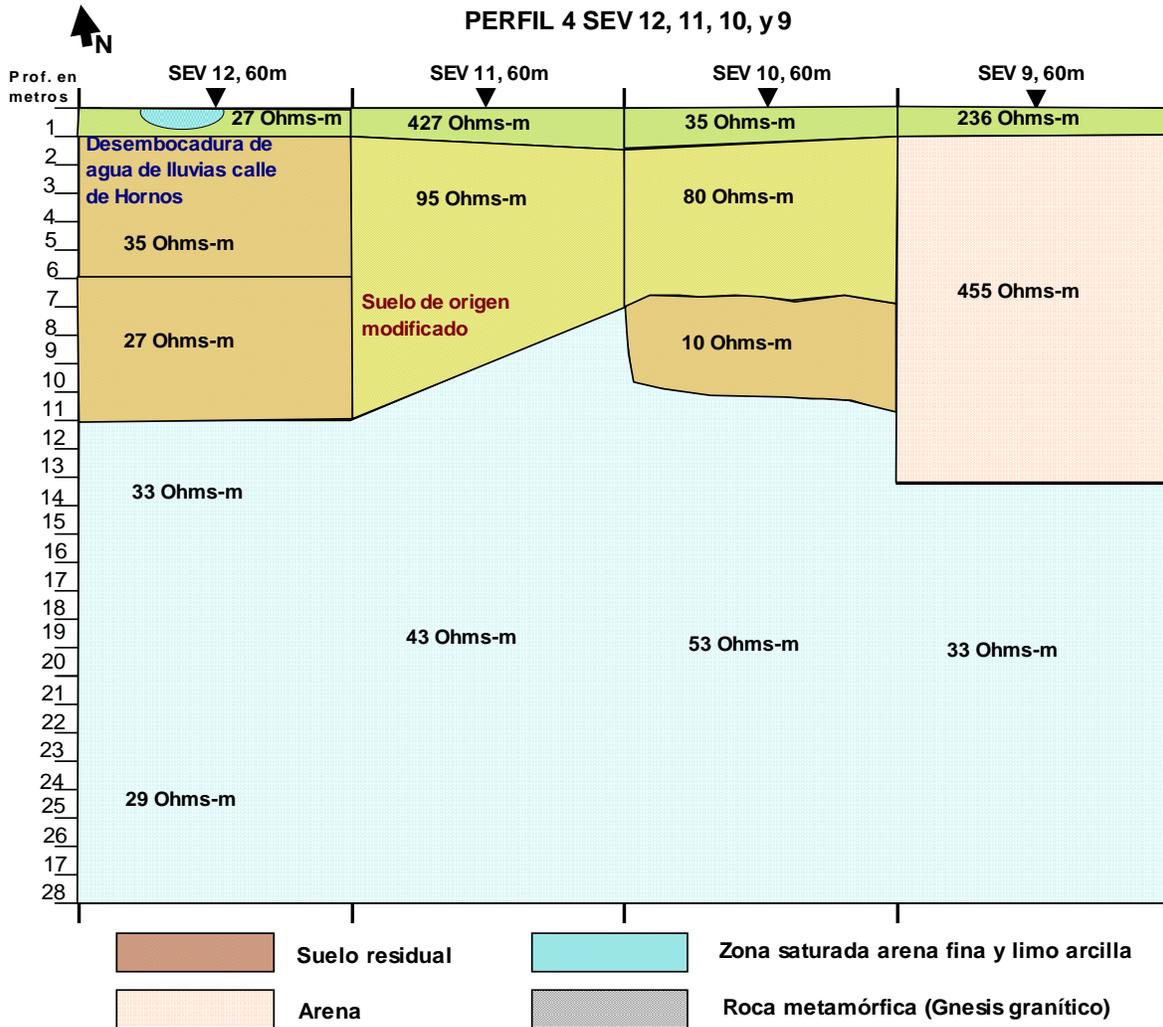


Figura. 38 Perfil geoelectrico realizado con los SEV's 4: SEV: 12, 11 10 y 9.

En el perfil 5 de la figura 39. El sondeo 10 inicia en la parte media de la calle de Prolongación de Hornos hacia el norte y termina en el río Atoyac. En el sondeo 22 se observa la sustitución del material granular por escombros cercanos al río, la correlación del perfil del método de resistividad y lo que físicamente se observa en

el lugar se corresponden al 100%. En este espacio está el banco de arena en donde se tomó el muestreo de granulometría.

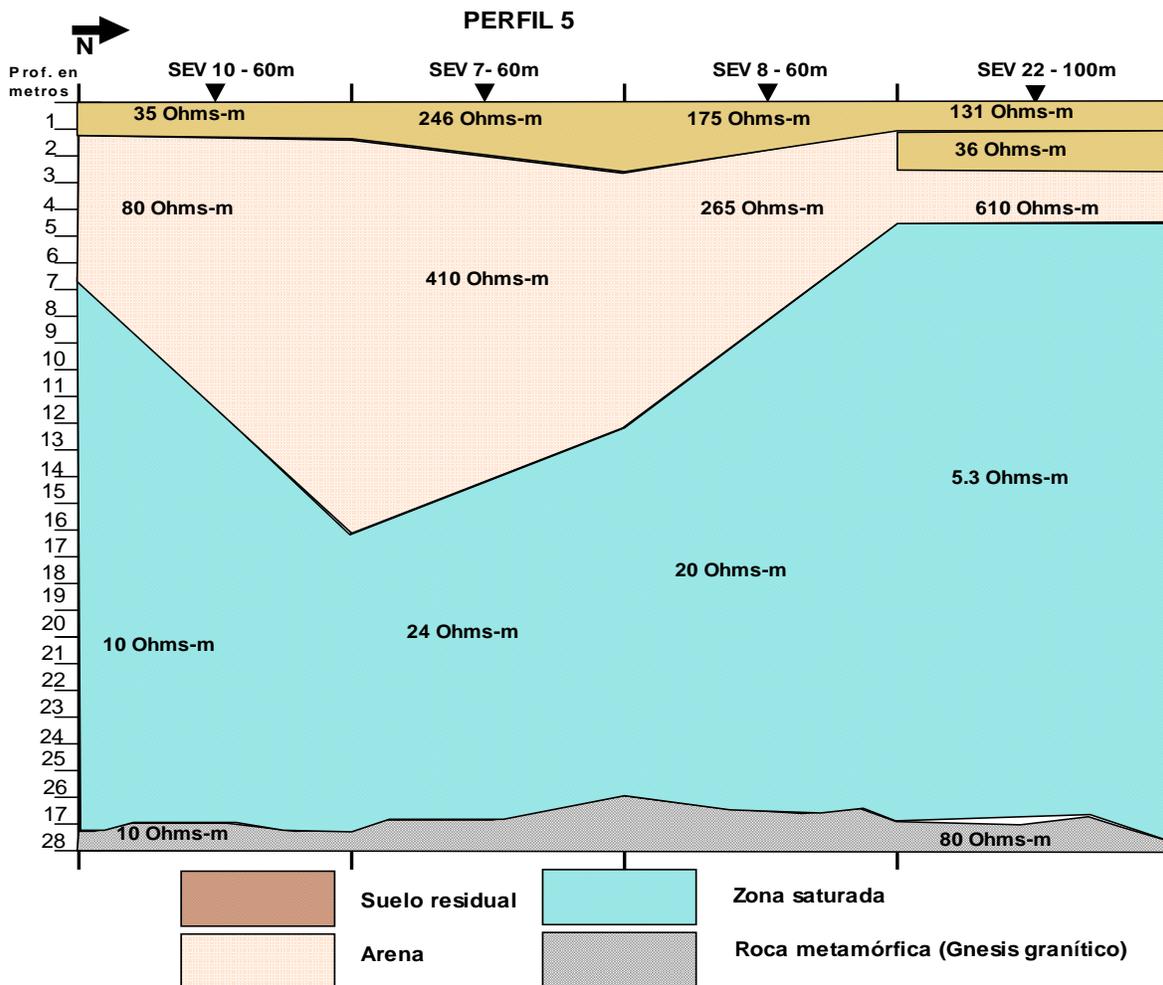


Figura 39. Perfil geoelectrico realizado con los SEV's 5: 10, 7, 8 y 22.

Los cortes geoelectricos de las figuras 37, 38 y 39 los materiales de origen han sido sustituidos con materiales de propiedades diferentes.

Los estratos modificados detectados en los 22 SEV realizados son: el 6 (posterior al edificio de administracion en el CIIDIR); el 8 en el banco de arena; el 10, 11 y 12 tomados desde el rio Atoyac sobre la calle Prolongacion de Hornos al

estacionamiento del CIIDIR; y el 13 en el andador entre el huerto de limones y el taller.

El SEV 7 completo de la figura 39 no ha sido modificado. El SEV 8 al lado del banco de arena no ha sido modificado, recibe humedad por infiltración al quedar expuesto el estrato poroso de arena en temporada de lluvias. El SEV 10 no ha sido modificado, absorbe la humedad de inundación de lluvia de la calle de hornos a los SEV 6, 11 y 12 que han sido modificados con relleno de escombros y son permeables. El 22 no ha sido modificado colinda con el río Atoyac, denota la zona saturada a 5 m de profundidad.

4.2.1 Discusión (SEV)

Las arcillas son partículas de rocas de tamaños entre (2×10^{-4} y 6×10^{-4} mm). Se aglutinan en forma de placas interlaminares y se atraen iónicamente. El agua en contacto con la arcilla disocia sus moléculas de H_2O en H^+ y OH^- neutralizándose con los iones de la arcilla que la absorbe en sus capas interlaminares en más de una tercera parte la relación agua arcilla en su estado plástico.

Cuando la arcilla se ha saturado de agua hasta su límite líquido, sólo podrá incrementar más contenido de agua con acción mecánica violenta para hacerse solución coloidal en estado líquido (tixotropía), así podría fluir la arcilla en los poros del estrato de arena para incrementar la conductividad y disminuir la resistividad en la arena. Esto no sucede en forma natural entre los dos estratos.

Por lo tanto la arena aún en temporada de lluvias continúa seca y es muy alta su resistividad. En estas condiciones no disipara corrientes atmosféricas y tampoco podrá comportarse eficientemente el SPT por las propiedades de los estratos de arcilla-arena como puede verse en la figura 40 obtenida de los promedios de los SEV's no modificados.

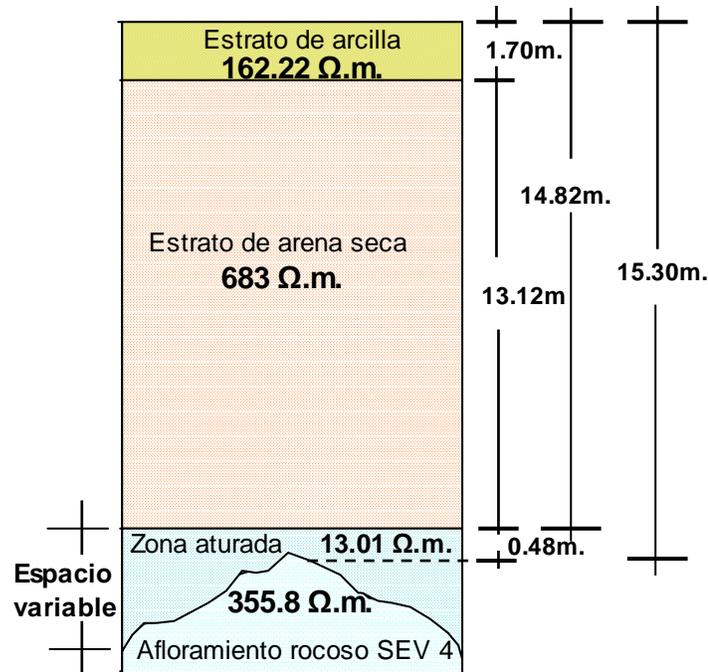


Figura 40. Promedios de resistividades y espesores de suelos no modificados.

En el corte geoelectrico promedio en la figura 40 los estratos del subsuelo son: el estrato superficial de arcilla y limo de 1.70 m de espesor y resistividad de 162.22 Ωm ; el segundo estrato es arena de baja graduación granulométrica de 13.12 m de espesor y resistividad de 683 Ωm ; el tercer estrato es arena saturada de agua con una resistividad promedio de 13.01 Ωm ; el lecho rocoso aparece a 16.30 m de profundidad y resistividad de 355.8 Ωm visto en el SEV 4.

De los SEV's no modificados se obtiene un promedio de resistividades y profundidades de estratos para inferir el comportamiento de los SPT y su comportamiento bajo condiciones de descargas atmosféricas y fallas de aislamiento en la figura 41.

En el corte geoelectrico de las figuras 35 y 36 representativo del suelo de origen se discute el comportamiento de la respuesta del suelo a la incidencia de una descarga atmosférica en la figura 41.

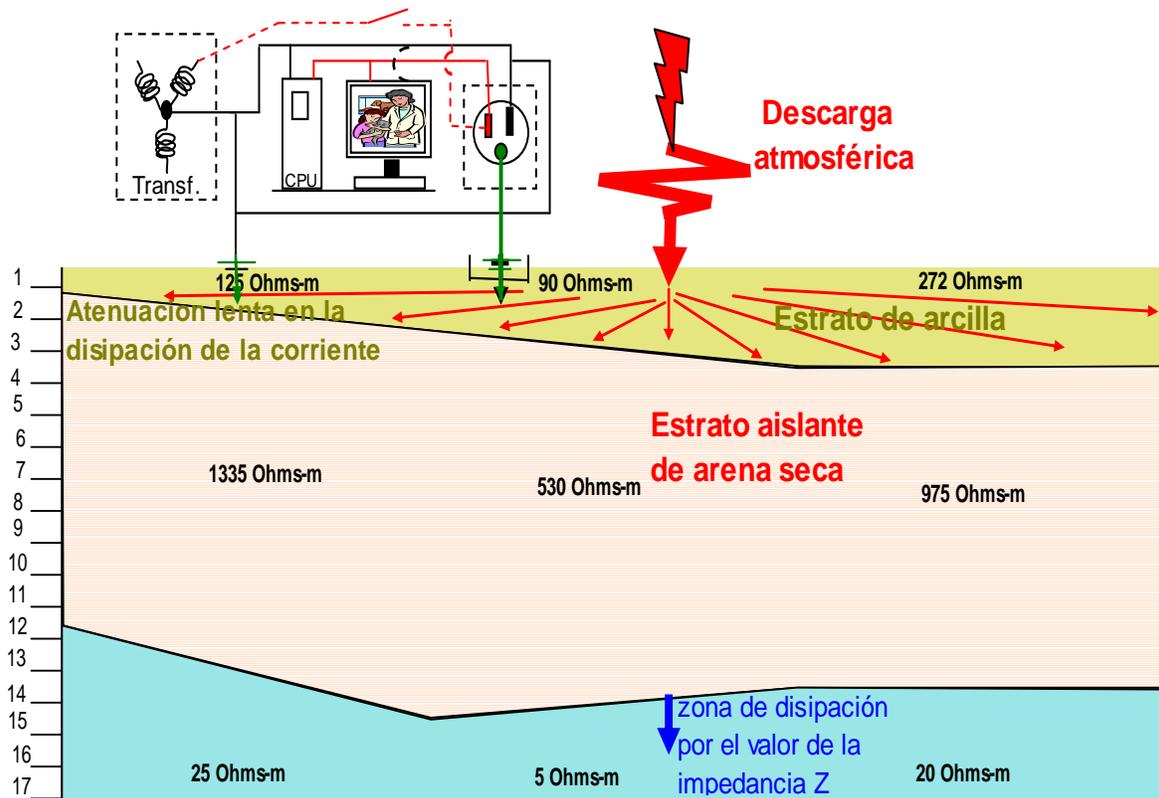


Figura 41. Efecto de una descarga atmosférica y comportamiento de los estratos.

Si incidiera una descarga atmosférica cercana a equipo eléctrico y si no se tuviera un medio conductor de baja impedancia para dispersar la corriente, antes de atenuarse afectaría el equipo eléctrico cercano a la incidencia.

En la descarga el estrato de arena seca impide el paso a la corriente de alto voltaje y elevadas frecuencias, la corriente se esparcirá en el estrato de arcilla dependiendo del contenido de humedad y se atenuaría lentamente.

La excesiva energía contenida en la descarga se dispersa en el estrato de arcilla, en donde el neutro del transformador en estrella del sistema eléctrico está en contacto efectivo con la conexión a Tierra en los electrodos en verde de los registros eléctricos. Igual que la Tierra física y el neutro del transformador en el contacto toma corriente donde está conectado el CPU y monitor si no hay una

disipación efectiva y rápida de la descarga atmosférica, el CPU y equipos cercanos recibirán el efecto del potencial y altas frecuencias de la descarga, afectando los componentes de los equipos electrónicos antes de atenuarse en el tiempo la corriente de la descarga, al no tener un camino de baja impedancia o conductor para una disipación rápida de la energía.

Si el SPT estuviera en contacto efectivo con la zona saturada que tiene una impedancia de $5 \Omega\text{m}$ se dispararía inmediatamente la corriente de la descarga atmosférica. El valor ideal recomendado es de un digito y protegería al equipo y a las personas como se establece en la NOM-001-SEDE-1999.

4.3. Resultados de los sondeos Wenner azimutales

Los gráficos de 8 sondeos azimutales Wenner en temporada de estiaje y los 8 de lluvias tomados en las mismas coordenadas de ubicación para su contraste en ambas temporadas se encuentran en el anexo 3.

En los datos representados en gráficos son objetivos los contrastes de las propiedades del subsuelo en los estratos a las profundidades que manifiestan los datos de resistividad.

Los espaciamientos de: $a = 1, 3, 6, 10$ y 20 m; son también la profundidad aproximada en metros que se obtiene de la conformación del suelo y sus propiedades físicas de porosidad, humedad, permeabilidad que vienen implícitas en la resistividad. Los gráficos muestran los cambios con la orientación lateral en los estratos respectivos.

4.3.1. Índices de anisotropía

Las tablas 8 y 9 representan los índices de anisotropía λ que son el cociente de la resistividad mayor y la resistividad menor para cada valor obtenido de $a = 1, 3, 6, 10$ y 20 m respectivamente de los 8 azimutales en lluvias y los 8 de estiaje.

Tabla 8. Valores de λ en temporadas de lluvias obtenidas en el valle aluvial.

ÍNDICES DE ANISOTROPÍA EN LLUVIAS						
COORDENADAS		ÍNDICES				
X_m	Y_m	a=1.00 m	a=3.00 m.	a=6.00 m.	a=10.00 m.	a=20.00 m.
742707	1883847	1.51	1.25	1.51	1.69	3.2
742673	1883652	1.1	1.31	1.1	1.13	1.02
742610	1883611	1.1	1.07	1.1	1.16	2.1
742774	1883772	1.16	1.07	1.16	1.04	2.13
742887	1883923	1.06	1.2	1.06	1.21	1.32
742699	1883984	1.13	1.2	1.13	1.19	1.57
743036	1884213	1.12	1.07	1.12	1.1	1.14
742900	1884376	1.17	1.09	1.17	1.41	1.96

Tabla 9. Valores de λ en temporada de estiaje obtenidas en el valle aluvial.

ÍNDICES DE ANISOTROPÍA EN ESTIAJE						
COORDENADAS		ÍNDICES				
X_m	Y_m	a=1.00 m	a=3.00 m.	a=6.00 m.	a=10.00 m.	a=20.00 m.
742707	1883847	1.03	1.13	1.08	1.07	1.41
742673	1883652	1.44	1.27	1.54	1.2	1.38
742610	1883611	1.12	1.59	2.9	1.35	1.42
742774	1883772	1.34	1.11	1.37	1.64	2.25
742887	1883923	1.01	1.55	1.76	1.95	1.31
742699	1883984	1.08	1.19	1.35	1.12	2.5
743036	1884213	1.03	1.11	1.21	4.52	1.2
742900	1884376	1.13	1.07	1.25	1.68	3.64

Los datos de las tablas muestran en los gráficos de superficie la distribución de los índices de anisotropía en función de las resistividades obtenidas para cada valor de a de la orientación azimutal y la profundidad del estrato que corresponde también a un valor de a . La distribución se muestra separada para lluvias y estiaje. En los gráficos, las variaciones de las propiedades del medio se hacen evidentes partiendo de los datos de las resistividades. Los colores crecen de amarillo a rojo.

4.3.2 Distribución de índices de anisotropía

En los gráficos mostrados en las figuras 42; 43; 44; 45 y 46, están distribuidos los índices de anisotropía λ , estos son datos contenidos en las barras de la derecha la escala corresponde a cada gráfica en particular distribuidos en programa Surfer. La superficie de distribución esta a la izquierda de cada gráfico la cual es limitada por las coordenadas de ubicación por estratos correspondientes a los valores de $a = 1, 3, 6, 10$ y 20 . Cada grafico corresponde en el mismo lugar de ubicación a estiaje y lluvias, respectivamente. El círculo azul es el pozo del CIIDIR como datos de referencia los valores de anisotropía son de 1.44 en estiaje y 1.6 en lluvias.

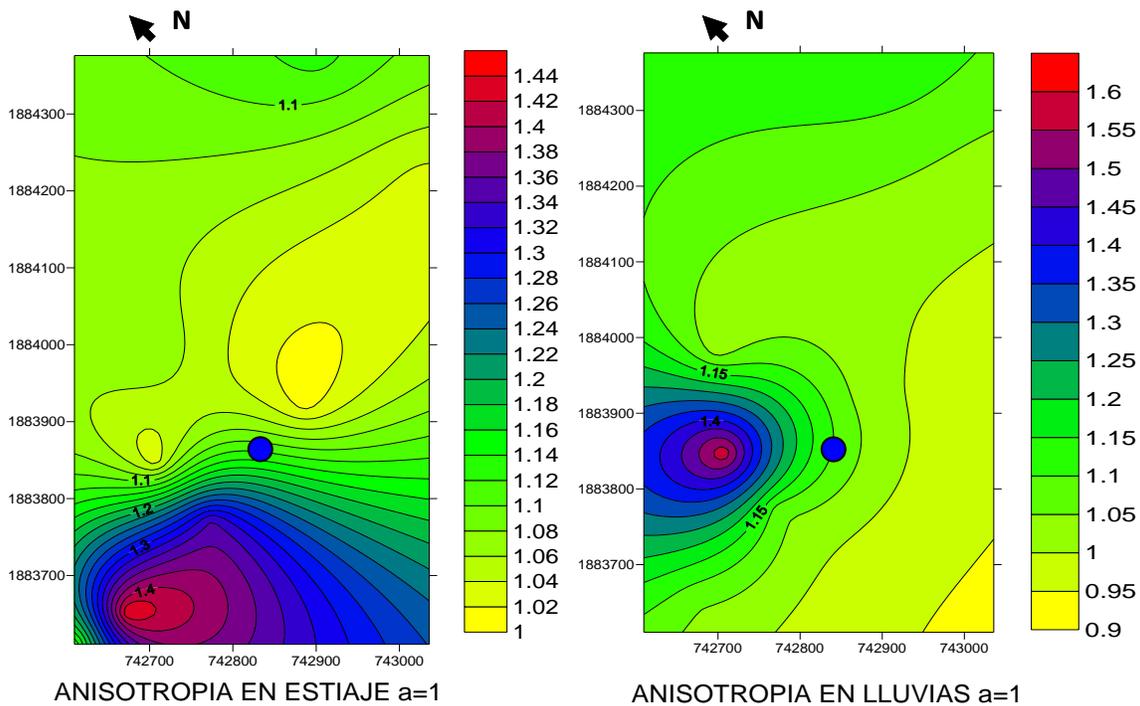


Figura 42. Distribución de índices de anisotropía para $a = 1$

En la figura 43 se muestran los gráficos para $a = 1$. El efecto de la ausencia de humedad se ubica entre las coordenadas 1883650 y 742675 ubicada más abajo que en lluvias; esto manifiesta el cambio de propiedades del suelo en cuanto a su compactación y propiedades en su relación con el agua como la porosidad o permeabilidad. La anisotropía en estiaje es de 1.54 y en lluvias 1.28

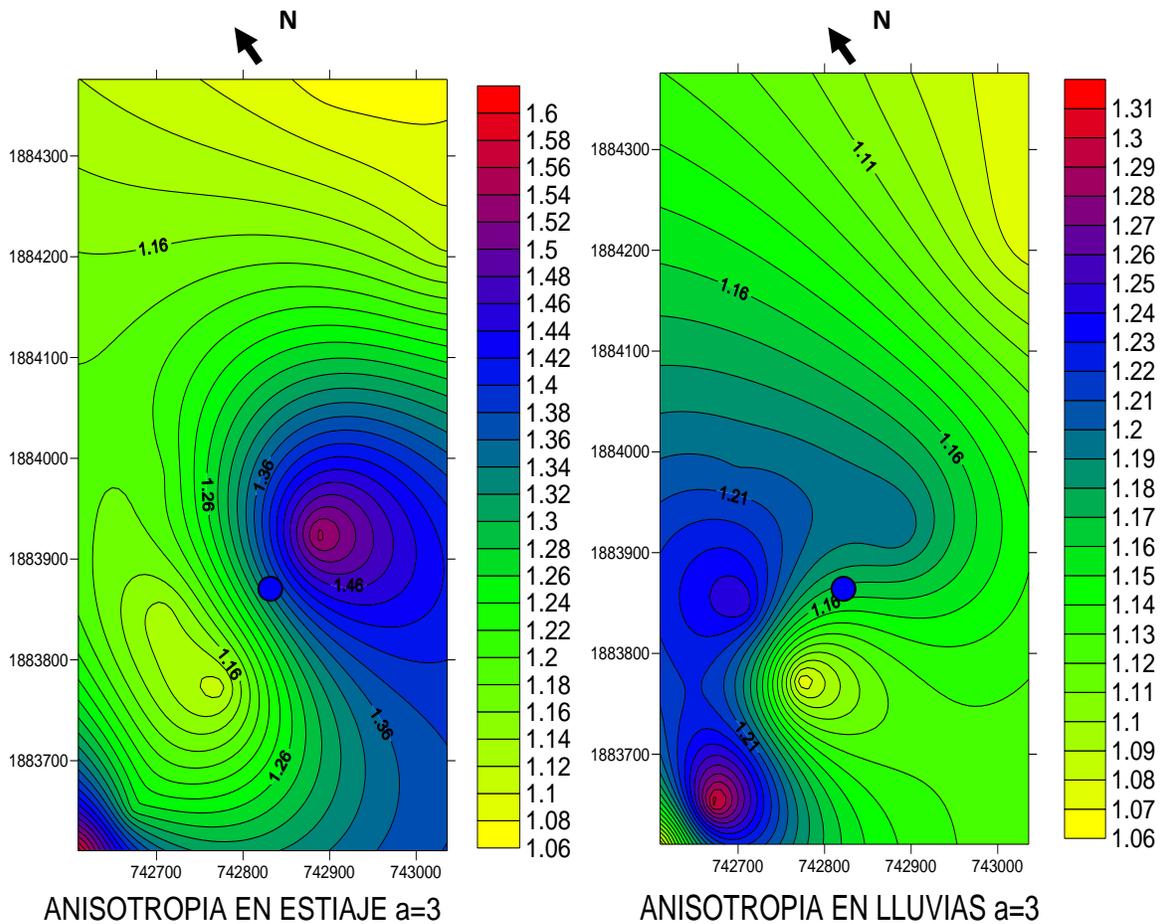


Figura 43. Distribución de índices de anisotropía para $a = 3$

En valores de $a = 3$. Se observan cambios de la distribución de la anisotropía, se incrementa el valor de la profundidad a tres metros y las propiedades del subsuelo son diferentes en su textura ubicación en relación con el contenido de humedad y su relación con el agua reflejados en valores de la resistividad a esta profundidad. Las propiedades de resistividad de la arenas son de 1.6 en estiaje y en lluvias a 1.31

En la figura 44 el valor de anisotropía en estiaje es de 3 y 1.5 en lluvias la profundidad del sondeo azimuthal que se alcanza es de 6.00 metros es notorio el incrementos de de los valores crecientes de la anisotropía estos valores nos indican que con la profundidad la humedad o presencia de agua es más sensible.

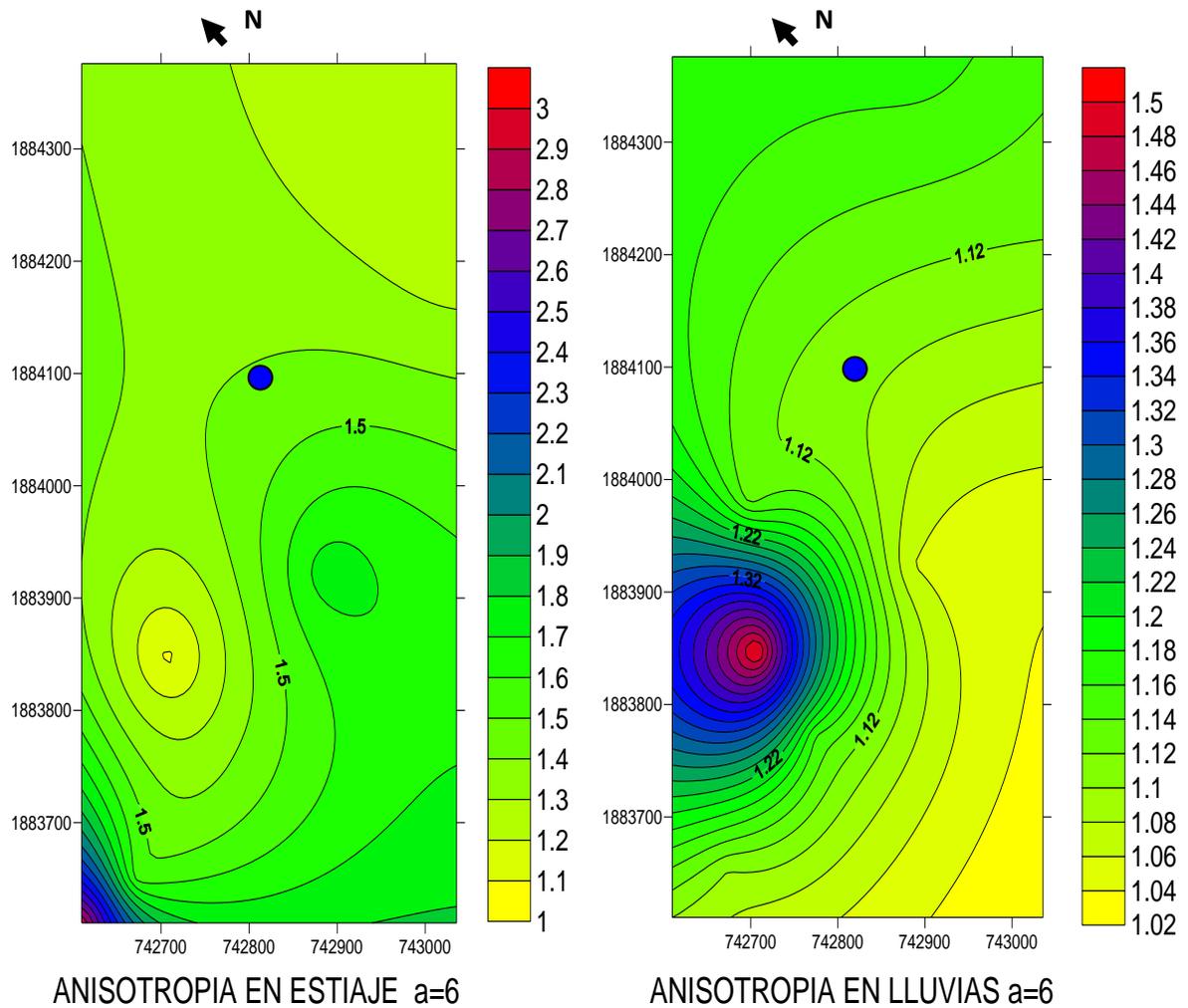


Figura 44. Distribución de índices de anisotropía para a = 6

Es importante observar la resistividad como una propiedad del suelo se incrementa con la temperatura y la ausencia de humedad en estiaje.

En la figura 45 el valor máximo de la anisotropía es 4.6 en estiaje y 1.6 en lluvias se nota el incremento creciente de su aumento con la profundidad y como estos cambian con la profundidad. Este desplazamiento del valor de la anisotropía indica ausencia de humedad en función de la porosidad y tamaños de agregados no consolidados su porosidad y permeabilidad.

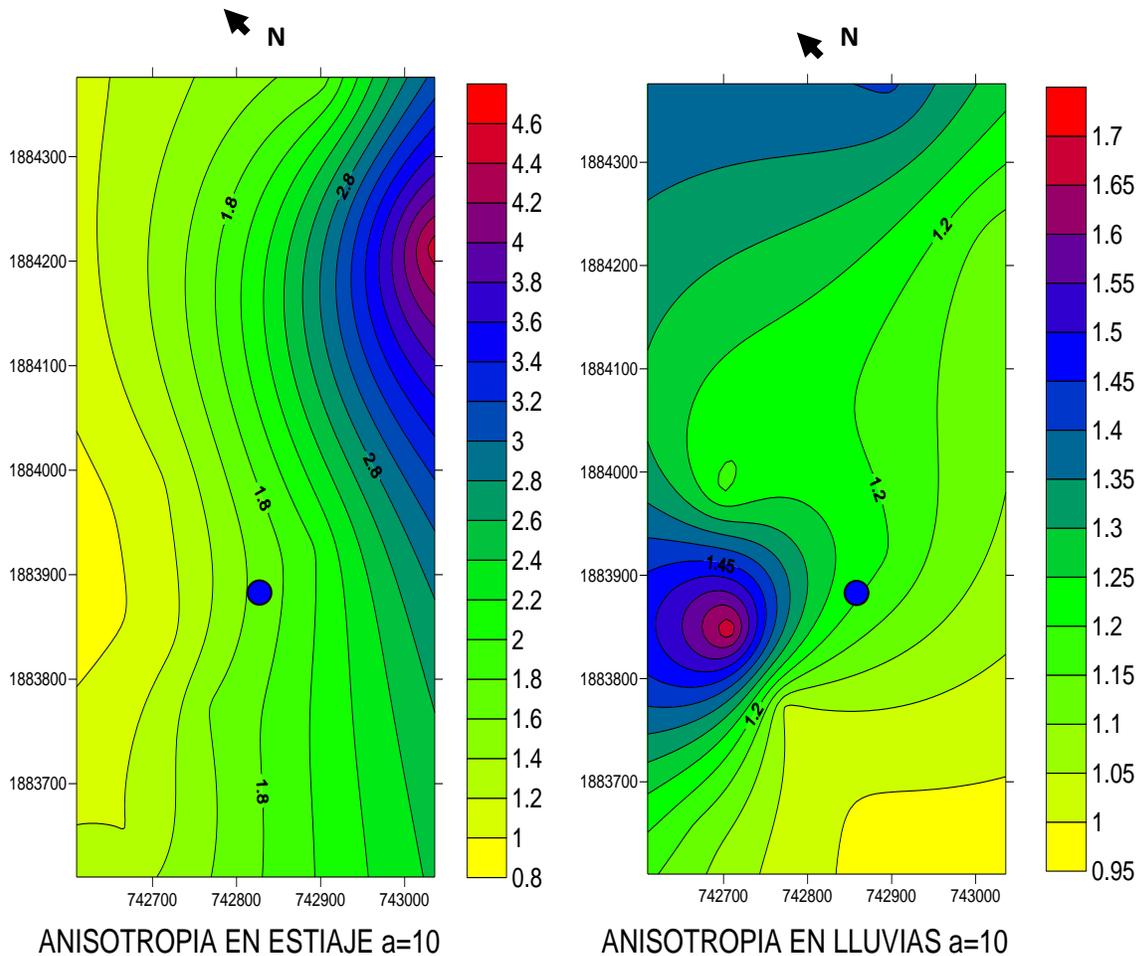


Figura 45. Distribución de índices de anisotropía para $a = 10$

Estas características muestran como fue el transporte y depositación de estos materiales aluviales en función de la pendiente del río y la energía de la corriente de de arrastre.

En la figura 46, los valores de los índices de anisotropía disminuyen al acercarse la profundidad de 20 metros que corresponde al valor de $a = 20$ m en donde se

empieza a manifestar la humedad de la zona saturada del acuífero. En estiaje los valores de mayor anisotropía están desplazados al norte, esto indica ausencia de agua en el río, este efecto se correlaciona con la dirección del flujo subterráneo de piezometría en la figura 51.

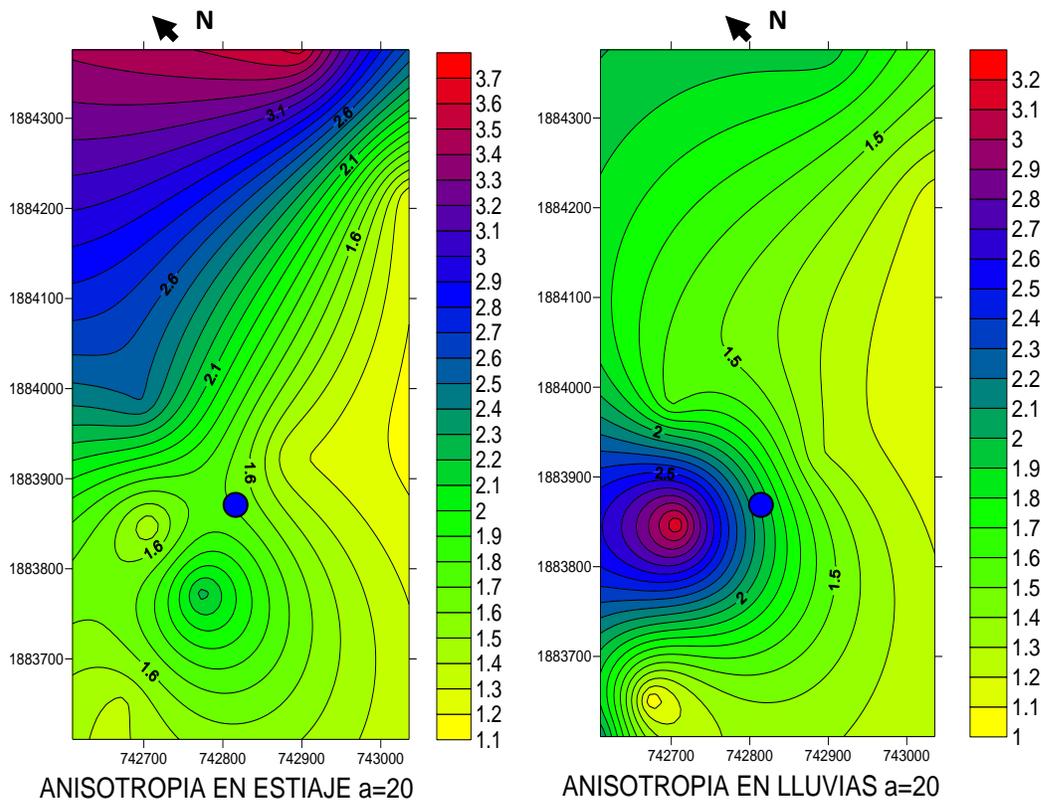


Figura 46. Distribución de índices de anisotropía para $a = 20$

En estiaje los datos de λ se van incrementando a medida que se profundiza en profundidad hacia los estratos del subsuelo en gráficos y en valores de λ : $[(a = 1; \lambda = 1.44); (a = 3; \lambda = 1.6); (a = 6; \lambda = 3); (a = 10; \lambda = 4.6)(a = 20; \lambda = 3.7)]$ este dato es indicador de la extracción masiva y extensiva en los pozos de agua cercanos al río Atoyac. En lluvias los valores de λ en los valores del incrementan en menor proporción: $[(a = 1; 1.6); (a = 3; 1.31); (a = 6; 1.5); (a = 10; 1.7)(a = 20; 3.2)]$. En las figuras 43 y 48 se muestran en perspectiva la distribución de λ en estiaje y lluvias.

4.3.3. Distribución de los Índices de Anisotropía en perspectiva

DISTRIBUCIÓN DE INDICES DE ANISOTROPIA EN T. DE ESTIAJE

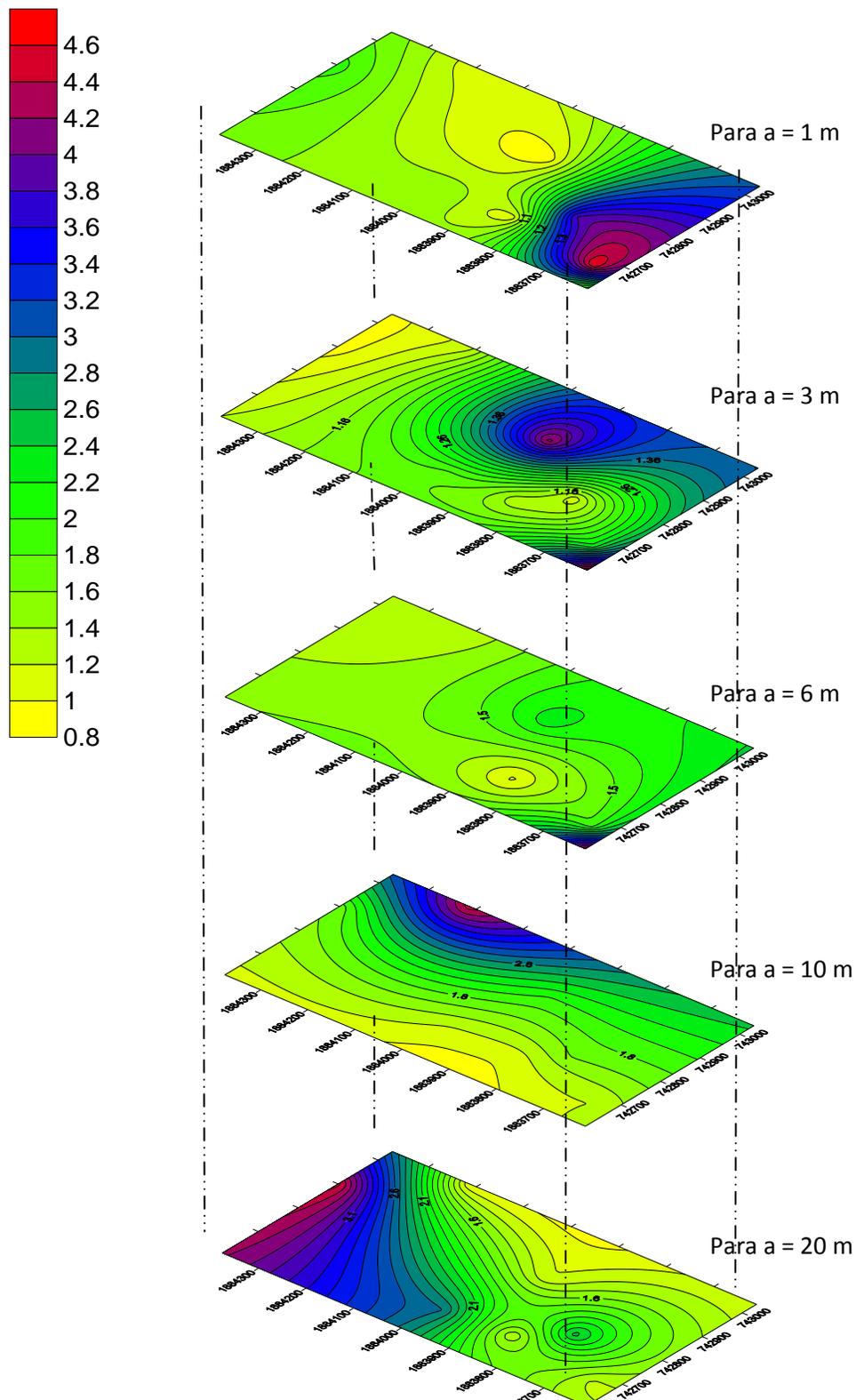


Figura 47. Perspectiva de estratos y distribución lateral de la anisotropía en estiaje.

DISTRIBUCIÓN ÍNDICES DE ANISOTROPÍA TEMPORADA DE LLUVIAS

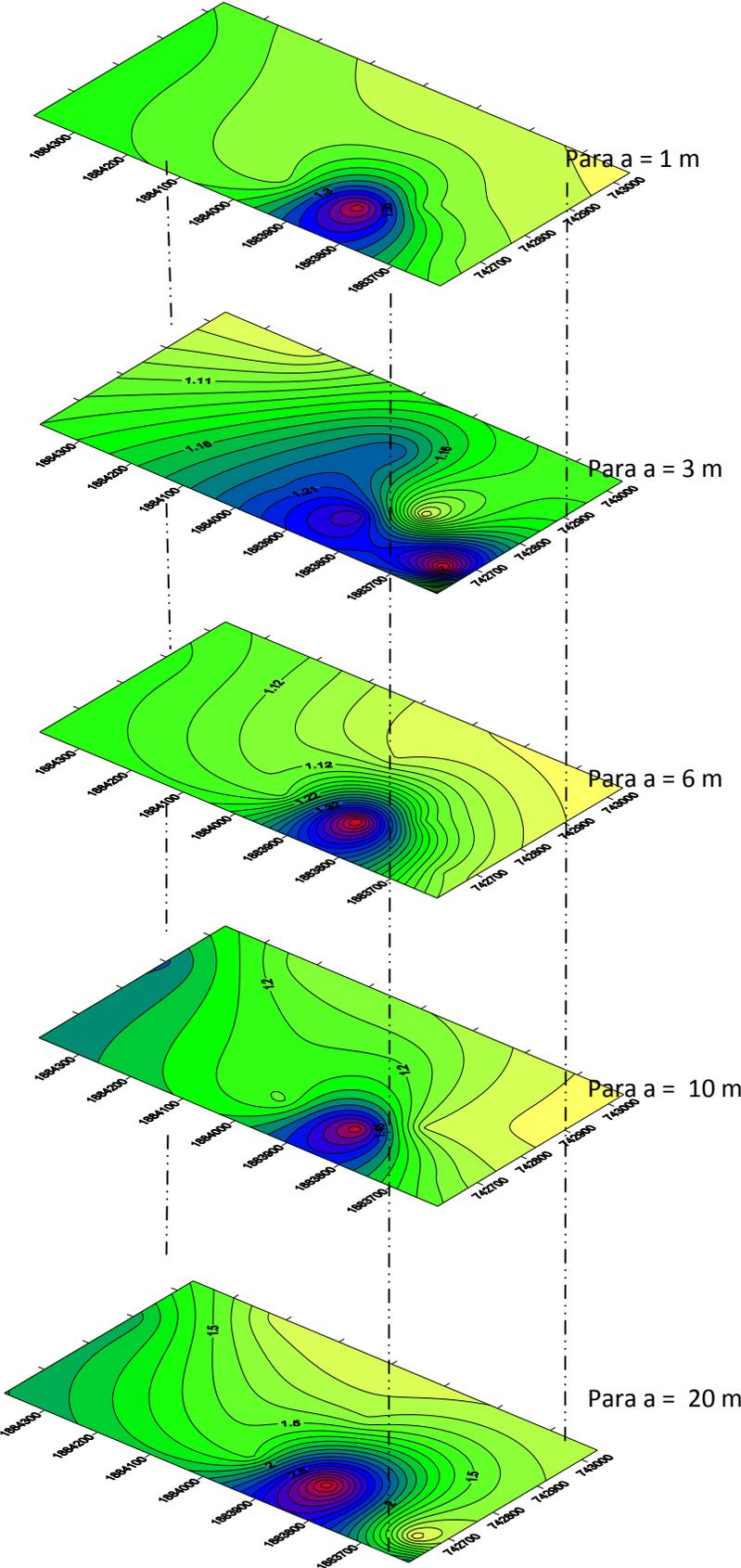


Figura 48. Perspectiva de estratos y distribución lateral de la anisotropía en lluvias.

4.3.4. Discusión de resultados de los sondeos Wenner azimutales

La tendencia de las resistividades a medida que se profundiza se incrementan al incrementarse los valores de (a) detectando ausencia de humedad en la arena. Al llegar a la zona saturada disminuye la resistividad por la humedad del acuífero este efecto se denota con flechas rojas discontinuas.

En el Anexo 3 (pág. 142 “Gráficos de sondeos azimutales Wenner”), las gráficas 1 y 6 muestran propiedades diferentes; la 1 es más granular. La 6 es el huerto de limones y denota la sustitución del material de origen, además del riego por aspersión periódico para conservación del césped. Este efecto se corresponde con los SEV y piezometría.

Tabla 10. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 1

Sondeo Wenner azimutal 1 Aula Magna W									
Temporada de lluvias					Temporada de Estiaje				
Prof. = a	Rst. Myr Ω.m	Orientación	Rst. Mnr Ω.m	Orientación	Prof. = a	Rst. mayr Ω.m	Orientación	Rst. mnr Ω.m	Orientación
a=1 m	195	SE-NW	125	N-S	a=1 m	280	NE-SW	180	E-W
a=3 m	→ 160	E-W	→ 130	N-S	a=3 m	→ 140	E-W	→ 120	SE-NW
a=6 m	180	E-W	70	SE-NW	a=6 m	160	SE-NW	145	E-W
a=10 m	250 ↓	N-S	170	E-W	a=10 m	170 ↓	E-W	155	N-S
a=20 m	490	N-S	150	E-W	a=20 m	160	NE-SW	90	N-S

Tabla 11. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 2

Sondeo Wenner azimutal 2 interior del campo de futbol									
Temporada de lluvias					Temporada de Estiaje				
Prof. = a	Rst. Myr Ω.m	Orientación	Rst. Mnr Ω.m	Orientación	Prof. = a	Rst. mayr Ω.m	Orientación	Rst. mnr Ω.m	Orientación
a=1 m	90	NE-SW	80	E-W	a=1 m	280	NE-SW	100	E-W
a=3 m	250	NE-SW	70	E-W	a=3 m	400	SE-NW	320	E-W
a=6 m	315	NE-SW	280	NE-SW	a=6 m	650	SE-NW	420	E-W
a=10 m	365 ↓	SE-NW	340 ↓	NE-SW	a=10	510 ↓	N-S	410 ↓	E-W
a=20 m	325	NE-SW	220	E-W	a=20	320	SE-NW	240	E-W

Tabla 12. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 3

Sondeo Wenner azimuthal 3 Exterior SW al campo de futbol									
Temporada de Lluvias					Temporada de Estiaje				
Prof. = a	Rst. Myr Ω.m	Orientación	Rst. Mnr Ω.m	Orientación	Prof. = a	Rst. mayr Ω.m	Orientación	Rst. mnr Ω.m	Orientación
a=1 m	110	N-S	100	E-W	a=1 m	110	E-W	50	SE-NW
a=3 m	200	SE-NW	190	NE-SW	a=3 m	245	E-W	155	NE-SW
a=6 m	300	N-S	280	SE-NW	a=6 m	> 330	N-S	> 160	SE-NW
a=10 m	355	N-S	312	E-W	a=10 m	365	NE-SW	278	SE-NW
a=20 m	225	N-S	200	E-W	a=20 m	220	N-S	155	NE-SW

Tabla 13. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 4

Sondeo Wenner azimuthal 4 Jardin botánico y agronomía									
Temporada de Lluvias					Temporada de Estiaje				
Prof. = a	Rst. Myr Ω.m	Orientación	Rst. Mnr Ω.m	Orientación	Prof. = a	Rst. mayr Ω.m	Orientación	Rst. mnr Ω.m	Orientación
a=1 m	108	NE-SW	100	SE-NW	a=1 m	345	SE-NW	255	E-W
a=3 m	212	E-W	200	NE-SW	a=3 m	675	SE-NW	600	N-S
a=6 m	295	E-W	260	NE-SW	a=6 m	690	E-W	400	SE-NW
a=10 m	285	N-S	275	E-W	a=10 m	460	NE-SW	280	E-W
a=20 m	250	NE-SW	110	SE-NW	a=20 m	220	N-S	105	SE-NW

Tabla 14. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 5

Sondeo Wenner azimuthal 5 Pozo profundo CIIDIR									
Temporada de Lluvias					Temporada de Estiaje				
Prof. = a	Rst. Myr Ω.m	Orientación	Rst. Mnr Ω.m	Orientación	Prof. = a	Rst. mayr Ω.m	Orientación	Rst. mnr Ω.m	Orientación
a=1 m	150	UNIFORME	150	UNIFORME	a=1 m	620	UNIFORME	620	UNIFORME
a=3 m	315	SE-NW	260	NE-SW	a=3 m	640	SE-NW	420	NE-SW
a=6 m	350	SE-NW	335	NE-SW	a=6 m	600	SE-NW	350	NE-SW
a=10 m	350	N-S	325	NE-SW	a=10 m	450	E-W	240	NE-SW
a=20 m	305	SE-NW	200	E-W	a=20 m	305	E-W	240	N-S

Tabla 15. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 6

Sondeo Wenner azimuthal 6 Huerto de limones									
Temporada de lluvias					Temporada de Estiaje				
Prof. = a	Rst. Myr $\Omega.m$	Orientación	Rst. Mnr $\Omega.m$	Orientación	Prof. = a	Rst. mayr $\Omega.m$	Orientación	Rst. mnr $\Omega.m$	Orientación
a=1 m	30	SE-NW	29	N-S	a=1 m	40	SE-NW	37	NE-SW
a=3 m	32	SE-NW	25	N-S	a=3 m	32	NE-SW	28	SE-NW
a=6 m	47	SE-NW	42	NE-SW	a=6 m	56	SE-NW	41	NE-SW
a=10 m	53	NE-SW	54	N-S	a=10 m	55	SE-NW	49	NE-SW
a=20 m	53	SE-NW	40	N-S	a=20 m	50	SE-NW	20	E-W

Tabla 16. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 7

Sondeo Wenner azimuthal 7 Banco de arena									
Temporada de lluvias					Temporada de Estiaje				
Prof. = a	Rst. Myr $\Omega.m$	Orientación	Rst. Mnr $\Omega.m$	Orientación	Prof. = a	Rst. mayr $\Omega.m$	Orientación	Rst. mnr $\Omega.m$	Orientación
a=1 m	38	UNIFORME	38	UNIFORME	a=1 m	62	N-S	60	SE-NW
a=3 m	47	SE-NW	44	N-S	a=3 m	68	E-W	62	N-S
a=6 m	64	E-W	56	N-S	a=6 m	96	NE-SW	79	E-W
a=10 m	74	E-W	67	N-S	a=10 m	115	SE-NW	26	N-S
a=20 m	72	SE-NW	63	NE-SW	a=20 m	75	N-S	62	E-W

Tabla 17. Resistividades en lluvias y estiaje para SAW. Gs 8

Sondeo Wenner azimuthal 8 Junto al vado INDECO									
Temporada de lluvias					Temporada de Estiaje				
Prof. = a	Rst. Myr $\Omega.m$	Orientación	Rst. Mnr $\Omega.m$	Orientación	Prof. = a	Rst. mayr $\Omega.m$	Orientación	Rst. mnr $\Omega.m$	Orientación
a=1 m	112	N-S	100	NE-SW	a=1 m	127	E-W	115	NE-SW
a=3 m	135	E-W	108	NE-SW	a=3 m	112	SE-NW	102	N-S
a=6 m	140	NE-SW	120	SE-NW	a=6 m	156	E-W	130	SE-NW
a=10 m	168	NE-SW	120	E-W	a=10 m	170	NE-NW	100	E-W
a=20 m	92	NE-SW	47	N-S	a=20 m	195	N-S	55	E-W

4.4. Resultados de piezometría

Los datos piezométricos en temporada estiaje y lluvias de los pozos en el área de estudio se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Datos piezométricos del área de estudio (Valle aluvial de Santa Cruz, Xoxocotlán).

PIEZOMETRIA TEMPORADA DE ESTIAJE						
Coordenadas de ubicación			Datos del pozo		Nombre del pozo	
X(m)	Y(m)	Z(m)	Nivel estático	N piezométrico		
742760	1883093	1531	11.55	1519.45	1. P. U. Lasalle	
742877	1883896	1540	11.81	1528.19	2. P. profundo CIIDIR	
742813	1884212	1541	9.67	1531.33	3. P. C. vista del valle	
743010	1884146	1534	9.24	1524.76	4. P. anill.desplomado	
743056	1884193	1537	7.03	1529.97	5. P. Maracuya	
743018	1884270	1535	2.25	1532.75	6. P. banco de arena	
742907	1884350	1537	5.98	1531.02	7. P. vado r. Indeco	

PIEZOMETRÍA TEMPORADA DE LLUVIAS						
Coordenadas de ubicación			Datos del pozo		Nombre del pozo	
X(m)	Y(m)	Z(m)	Nivel estático	N piezométrico		
742760	1883093	1531	12.7	1518.51	1. P. U. Lasalle	
742877	1883896	1540	10.04	1529.96	2. P. profundo CIIDIR	
742813	1884212	1541	9.44	1531.56	3. P. C. vista del valle	
743010	1884146	1534	9.51	1524.49	4. P. anill.desplomado	
743056	1884193	1537	7.83	1529.17	5. P. Maracuya	
743018	1884270	1535	2.25	1532.75	6. P. banco de arena	
742907	1884350	1537	5.95	1531.05	7. P. vado r. Indeco	

La mayor distancia del pozo de la universidad La Salle al pozo del vado en INDECO es de 1257 m y la diferencia de nivel entre ambos pozos es de 10.00 m ($10/1257=0.0078\%$); equivale a que por cada metro de distancia hacia el N-NE sube 7.8 mm que corresponde a un ángulo de inclinación menor a 5° . Datos obtenido con GPS postproceso.

Por esta razón, en los gráficos de piezometría mostrados en las figuras 50 y 51 de piezometría en estiaje y lluvias, respectivamente solamente se usa la escala de profundidad omitiendo la distancia como escala entre pozos se denota con una

línea imaginaria la cota entre los pozos entre los pozos extremos 1 y 7 mencionados, los pozos 2; 4; 5 y 6 se desplazan hacia el Este con pendiente descendente y a diferente distancia; el pozo 3 se encuentra al Oeste a mayor altura.

4.4.1. Distribución de niveles piezométricos.

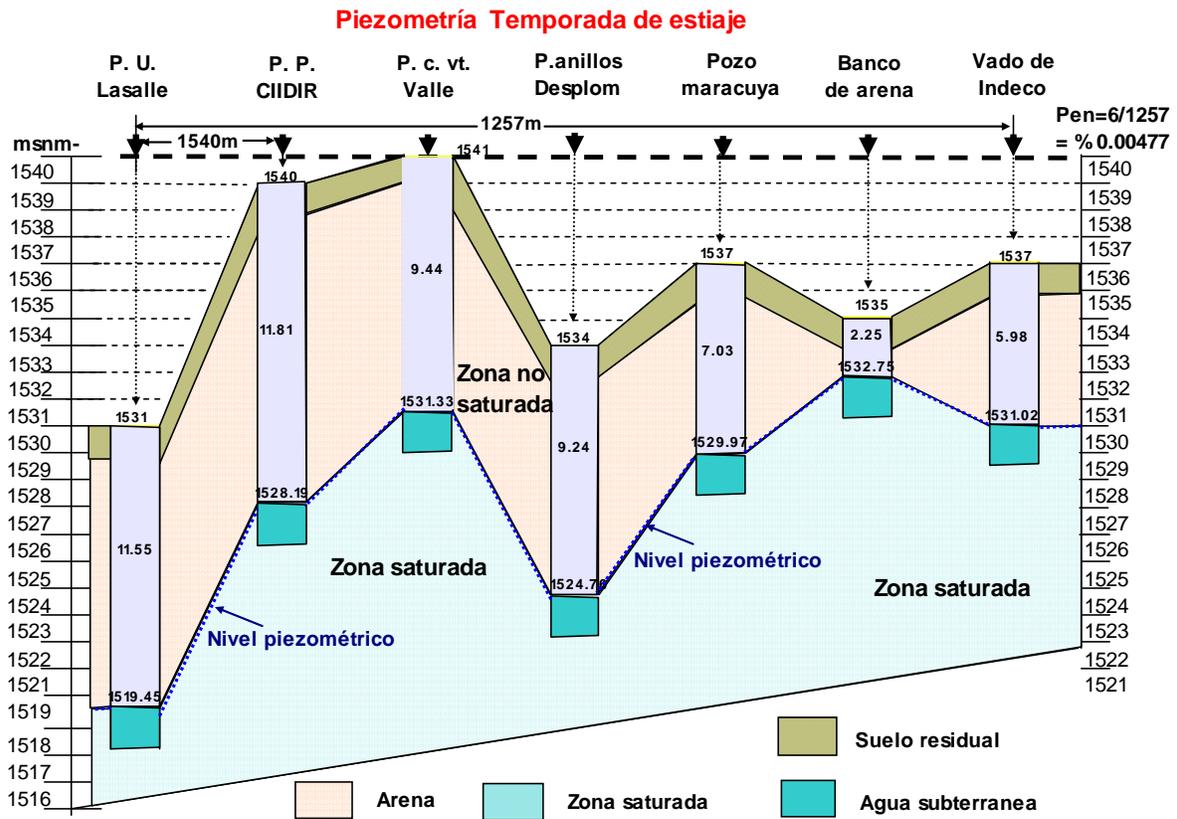


Figura 49. Distribución de niveles piezométricos en estiaje.

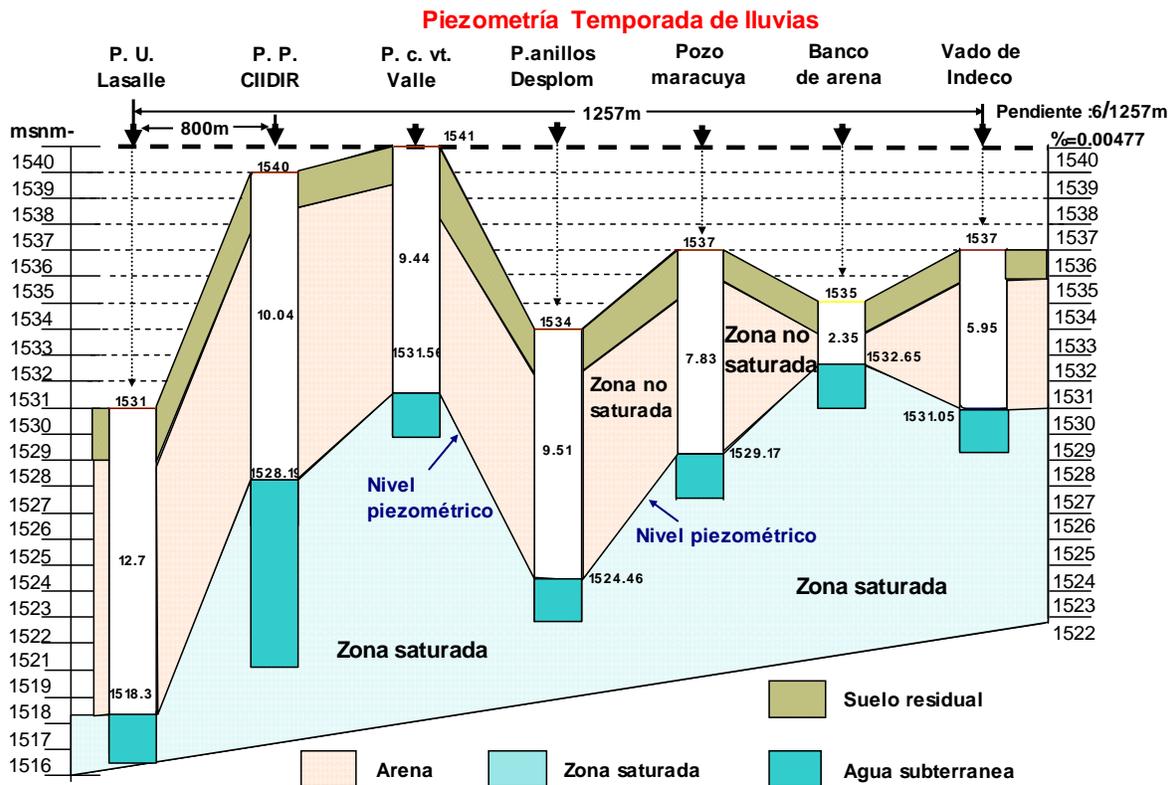


Figura 50. Distribución de niveles piezométricos en temporada de lluvias.

4.4.2. Variación de niveles piezométricos

En la tabla 19 se observa el comportamiento de los pozos en lluvias y estiaje. El pozo número 7 no se recuperó.

Tabla 19. Variación del nivel piezométrico de lluvias a estiaje.

VARIACIÓN DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO			
POZO	LLUVIAS	ESTIAJE	DIFERENCIA
1. P profundo Lasalle	12.7	11.55	1.15 m
2. P. profundo CIIDIR	10.04	11.81	1.77 m
3. P. C. vista del valle	9.44	9.44	0
4. P. anill.desplomado	9.51	9.24	0.27 m
5. P. Maracuya	7.83	7.03	0.8 m
6. P. banco de arena	2.35	2.25	0.01 m
7. P. vado r. Indeco	5.95	5.98	-0.03

Los datos de la tabla 19 muestran que el acuífero no se recarga rápidamente en lluvias, y sube lentamente su nivel piezométrico en estiaje.

En la figura 51 se muestra la ubicación de los pozos en a), la dirección del flujo subterráneo en lluvias en b) y en c) la dirección del flujo subterráneo en estiaje.

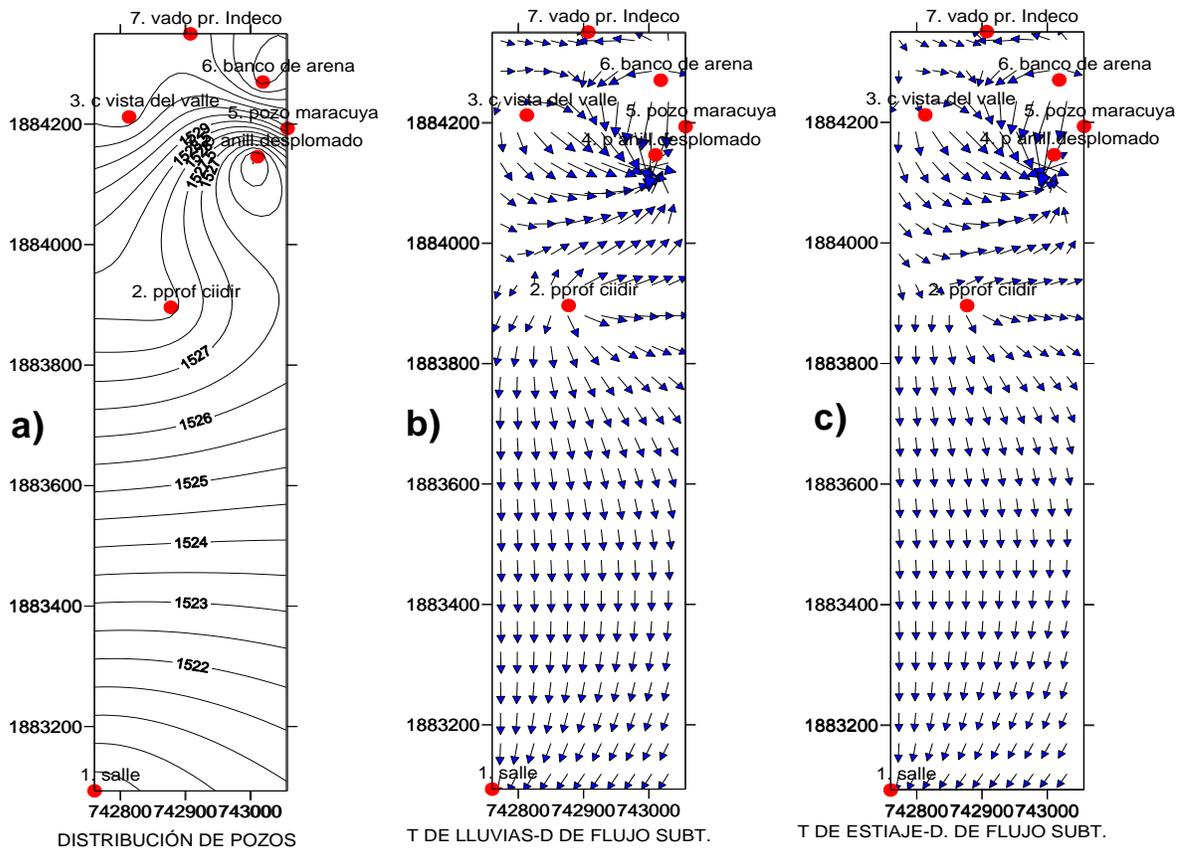


Figura 51. a) Mapa piezométrico del área de estudio, b) dirección del flujo subterráneo en estiaje y c) en época de lluvias.

La distribución de los niveles piezométrico son las curvas generadas en el primer gráfico de la izquierda y perpendiculares indican la dirección preferencial del flujo subterráneo del agua en el acuífero y no acusan cambios significativos de una temporada a la otra, como se puede observar en la tabla 19.

4.4.3. Discusión de piezometría

Este efecto en los datos de la tabla 19 de piezometría es manifestación de las arcillas que mezcladas en arenas y gravas disminuyen su propiedad tixotrópica y hacen el lecho del río poco permeable, influye la escasa pendiente de escurrimiento. En las raíces de carrizales y plantas que crecen en ambas riveras del río le sirven a la arcilla y el limo de estructura para no ser erosionada y absorber el agua haciendo los taludes de contención poco permeables. Este efecto podría ser la causa de la poca infiltración de agua al acuífero.

Los pozos más explotados en extracción de agua son el pozo profundo de la Universidad La Salle y el pozo profundo del CIIDIR, estos manifiestan los valores más altos de los niveles piezométrico en lluvias y estiaje en la tabla 19.

No hay contribución de recarga de agua al acuífero en el estrato superficial si consideramos las propiedades de la arcilla.

En las lluvias del cambio estacional, el estrato arcilloso absorbe el agua hasta su límite plástico reteniéndola ionizada en los espacios interlaminares de la arcilla, atrapada el agua por la atracción eléctrica, no se infiltra ni por gravedad al estrato de arena, este efecto hace de este estrato de arcilla y limo un impermeable que limita la recarga del acuífero.

Si la precipitación anual es baja, el sol de cada día evapora el agua absorbida en la arcilla y no hay, o es mínima, la recarga del estrato superficial. Esto podría indicar que la recarga se hace en zonas permeables donde la estratigrafía se compone de materiales con poco o nula presencia de arcilla.

4.5. Resultados y discusión de granulometría

La figura 52 muestra los resultados de granulometría del medio aluvial. Con la técnica de mecánica de suelos de (Juárez, 1985). En la cual permite observar la

distribución granular de la muestra de un talud en corte perpendicular a la superficie cortando una sección de 10x10 cm igual a la longitud de la profundidad del talud. La gráfica muestra los resultados de esta muestra.

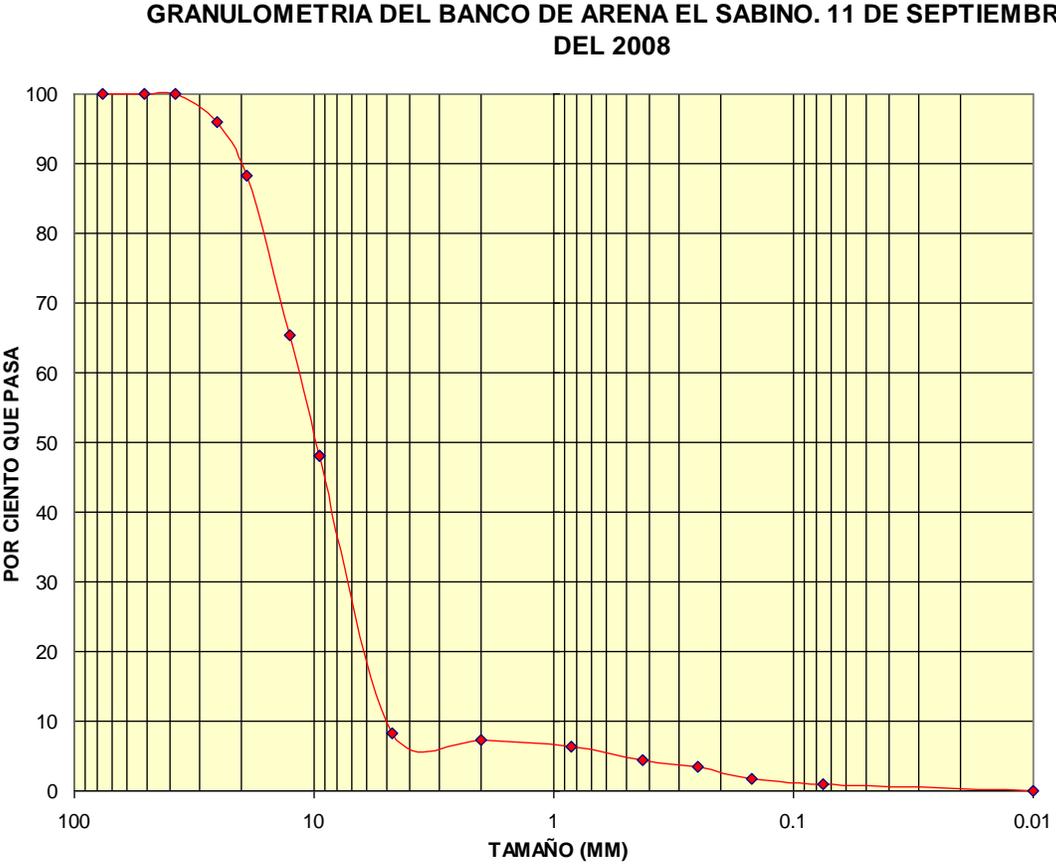


Figura 52. Curva de distribución de granulometría del medio.

Las arcillas y el limo son partículas granulares distribuidas en la parte superficial del medio aluvial y son agregados de depositación de arrastre de lluvia en toda la rivera y en el lecho mismo del río.

Las arenas son las partículas granulares que hacen el mayor volumen de la zona vadosa y forman parte del acuífero. Una parte de los gránulos finos han sido arrastrados en el bombeo masivo reflejados en los datos de la gráfica. La progresiva profundidad al agua por la excavación de pozos profundos, aunado a la

escasez de lluvia, aumenta la porosidad disminuyendo la humedad en el estrato de arena y se elevan progresivamente los valores de resistividad del estrato de arena mostrados en los cortes geoelectricos y en el gráfico de granulometría.

No se encontraron boleos y las gravas gruesas no son mayores a 100 mm. La grava cribada oscila de 4 a 40 mm y es en proporción un 1/3 de un volumen a granel de arena.

Los datos de granulometría y plasticidad determinan un suelo arenoso, totalmente poroso y permeable aislado en sus contornos por la arcilla en el estrato superficial que se deposita en la parte superficial del bordo del río y en los taludes del mismo. La arcilla es retenida entre las raíces de plantas, carrizales y en el lecho del arroyo del río; estas arcillas se mezclan con arena, piedras y la escasa pendiente impide su circulación y también la filtración del agua al estrato de arena. Las arcillas por la pendiente menor a 5° , se decantan en cuanto disminuye la agitación mecánica de la corriente. El escurrimiento de arcilla diluida en el agua en solución, provienen de las colinas próximas y son las que se depositan en el estrato superficial incrementando el volumen de arcilla y limo lentamente en el tiempo, (Fetter 2001).

4.6. Discusión de correlación

Los SEV's en los perfiles geoelectricos; los sondeos azimutales Wenner a profundidades mayores a 10 y en el intervalo con 20 m de profundidad; los índices de anisotropía y la piezometría en el nivel estático se corresponden a la misma profundidad.

Los registros eléctricos de las instalaciones se inundan de agua en época de lluvias al estar insertados en el estrato de arcilla y no se drenan al estrato granular de arena, quedando los amarres de conexión eléctrica en contacto con el agua en temporada de lluvias. La consecuencia de esto, los amarres quedan dentro del agua provocando cortos circuitos y tienen que drenarse estos registros para evitar

este problema que se debe a la impermeabilización del estrato que impide la filtración del agua a la arena.

El estrato de arena de 13.12 m a la zona saturada y resistividad de 683 Ω m promedio en estratos de origen aluvial no modificado. Es un medio poroso parte del acuífero aluvial de recarga del río Atoyac del que se ha extraído intensamente el agua de pozos en todo el valle de Oaxaca. Esto ha propiciado el aumento progresivo de la profundidad del nivel piezométrico del agua originando la excavación de pozos profundos que aunado a la escasez de lluvia por el calentamiento global se ha profundizado cada vez más la profundidad del nivel estático del acuífero aumentando la resistividad del estrato de arena.

Este efecto se manifiesta en las elevadas resistividades del estrato de arena seca en los cortes geoelectrónicos haciendo de ella un aislante eléctrico entre el estrato arcilloso y la zona saturada que es donde se encuentran los valores ideales de baja impedancia para el contacto efectivo de los SPT que diseminan y dispersan eficientemente las corrientes de falla o atmosféricas.

Partiendo de los datos obtenidos en los cuatro métodos de investigación utilizados así como de la información de las propiedades de resistividad en sus profundidades respectivas en los estratos, en forma gráfica en la figura 54, se esboza esquemáticamente la propuesta de solución al problema de los SPT en el valle aluvial de Santa Cruz, Xoxocotlán.

Este trabajo es de utilidad a todo el valle de Oaxaca, sin embargo, antes habría que hacer un estudio previo ya que cada suelo es único y cambiante en sus características, respuestas y comportamiento a los SPT.



Figura 53. La zona saturada es un lugar propicio de conexión para los SPT en el valle aluvial de Santa Cruz Xoxocotlán.

CAPÍTULO V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Como consecuencia del análisis de los resultados obtenidos se establecen las siguientes conclusiones.

Con referencia a (CFE, 2007) un sistema de puesta a tierra (SPT) debe tener una resistividad de un dígito o $10 \Omega\text{m}$.

En este estudio los perfiles geoelectricos interpretan para el valle aluvial de Santa Cruz Xoxocotlán en suelo no modificado dos estratos: el superior es arcilla que atrapa y retiene el agua ionizada en sus espacios interlaminares haciéndolo impermeable con una resistividad eléctrica promedio de $162 \Omega\text{m}$; el segundo corresponde a la zona saturada que es arena fina y limoarcillas con resistividad promedio de $683 \Omega\text{m}$. Para suelos modificados los valores de resistividad son de 34 a $100 \Omega\text{m}$ en lluvias. Y en la zona saturada las resistividades van de 5 a $25 \Omega\text{m}$, siendo el promedio de $13.01 \Omega\text{m}$.

Los índices de anisotropía han permitido conocer que las resistividades en los dos periodos infiltran poca agua teniendo los mayores valores para $a=20 \text{ m}$. No se pudo inferir que exista una relación directa entre índices de anisotropía y dirección de flujo subterráneo.

En una descarga atmosférica a Tierra no se dispersan las corrientes de elevadas frecuencias y voltajes en el estrato aislante de arena y afectan seriamente al equipo eléctrico y electrónico antes de atenuarse el efecto de la descarga.

Con el estudio del suelo aluvial usando los métodos planteados y derivado de los resultados obtenidos se comprueban las hipótesis y se concluye:

Son ineficientes los SPT en la disipación de corrientes (I) de descargas atmosféricas y de fallas por aislamiento debido a la disposición y propiedades de los estratos del suelo aluvial al no haber conductividad eléctrica (γ) con la zona de baja impedancia que corresponde a la zona saturada.

Al profundizarse el nivel freático (h) ha aumentado progresivamente la resistividad (ρ) del subsuelo y disminuido la conductividad (γ) haciendo ineficientes los SPT.

5.2. Recomendaciones

Ocultos a la vista los electrodos metálicos de un SPT les ocurren un gran número de fenómenos de corrosión, los factores que concurren como el Ph los iones Na^+ , Ca^{++} , Fe^{++} , disueltos en el agua con los iones H^+ y OH^+ disociados del agua generan toda la química de corrosión del acero y contradictoriamente son altamente deseables para la disipación de corrientes de falla. Se sugiere usar acero inoxidable como electrodos en la zona saturada los han dado buenos resultados al nivel del mar.

Los valores mínimos de resistividad y resistencia en los perfiles geológicos para la disipación de corrientes están en la zona saturada.

- Se sugiere usar los pozos de agua en desuso instalando en ellos electrodos de acero inoxidable conectándolos en paralelo con los electrodos de todo registro del sistema eléctrico que alcancen la zona saturada para que la disipación de corrientes de falla en los SPT sea eficiente.
- Instalar en los edificios con alturas sobresalientes el sistema de protección contra descargas atmosféricas en la parte superior. Los datos del nivel de isodensidad o isoceraúnicos son datos de probabilidad, sin embargo los cambios climáticos han incrementado estos niveles.
- Es necesario instalar un sistema de drenaje en los registros eléctricos de la red exterior de energía eléctrica; canalizando el agua de arcilla en solución coloidal a un pozo anillado que se construiría en la zona más arenosa.

La propiedad iónica de la arcilla ocasiona la oscilación del voltaje en el sistema eléctrico; Esta desaparecerá con la corrección de los SPT.

Bibliografía

Abdelhady E., Essam A., Morsy & Sherif M. (2004). Geoelectric Resistivity Sounding for Groundwater Evaluation: Two Field Examples. Geophysics Dept., Faculty of Science, Cairo University. Egyptian Geophysical Society Journal, vol. 2, No. 1, 61-68

Bakkali Saad (2006) Utilización de sondeos eléctricos para el diagnóstico del potencial hídrico de la región del Tizeght (anti atlas marroquí).

Ballester Rossi, Zmirou, Bounghar (2001). Confounding and Effect Modification in the Short-Term Effects of Ambient Particles on Total.

Ballares, Alonso, (1995). Software para Modelado directo de sondeos eléctricos verticales, CICESE, México.

Belmonte J., Campos E. & Herrera J. (2005). Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, México. Geofísica Internacional, Vol. 44, Núm. 3, 283-300.

Belmonte J., Campos E. y Alatorre Z. (2003). Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etna, Oaxaca, México. *Revista Geofísica* 59.

Bent R. B. 2007. *Electric Power Research Institute (EPRI) Transmission Line Reference Book, 345 kV and above*. 2da. Edición, Págs. 545-552,

Bolshakov D., Modin I., Pervago E. & Shevnin V. (1998a). Modeling and interpretation of azimuthal resistivity sounding over two-layered model with arbitrary-oriented anisotropy in each layer. Geological faculty, Moscow, 1-4.

Bolshakov D., Modin I., Pervago E. & Shevnin V. (1998b). New Step in anisotropy studies: Arrow-type array. MSU, Geological faculty, Moscow, 1-4.

Bolshakov D., Modin I., Pervago E., & Shevnin V. (1995). Anisotropy effects investigatios by resistivity method in some inhomogeneous media. Geological faculty, Moscow, 1-6.

Boyd, T. (1996) Introduction to Geophysical Exploration, obtenida de: http://galitzin.mines.edu/INTROGP/main_template.jsp?menu=res_menu.html&page=DC%20Home&url=RES%2Fmain.html.

Busby, J. & Jackson, P. (2006). The application of time-lapse Azimuthal apparent resistivity measurements for the prediction of coastal cliff failure. *Journal of Applied Geophysics* 59, 261-272.

Carn et al (1990) Control the gold distribution and gold particle evolution in glacial and fluvioglacial placers of the Ancocalla-ananea Basin Southern Andes of Peru.

CFE 2007. Metodología basada en investigaciones a nivel Internacional (IEEE), Nacional (IEE), Institucional (LAPEM) para la evaluación, modificación y diseño de puesta a Tierra de L.T's aéreas de 115 a 400 kV.

Custodio E., y Llamas R. (2001) Hidrología subterránea. (2ª ed.) Barcelona España: Omega.

Dahlin T. (2000). Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. Geophysical Prospecting 48, 181-187.

De la Vega M. (2002). Problemas de ingeniería de puesta a Tierra. (2ª. Edición) México: Limusa.

Domínguez José Manuel Schiffer Isaac (1992) Las arcillas: el barro noble. Primera reimpresión 1995. La ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica.

Enríquez Harper Gilberto 2002 La calidad de la energía eléctrica, Colección de Textos Politécnicos Editorial Limusa México.

Fetter C. W.(2001) Applied Hidrólogeology Fourth Edition Prentice Hall New Jersey University of Wisconsin –Oshkosh.

Gasulla, M. (1999). Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en el subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona. pp 1-1:2-9.

González, Montero. Traductor de la edición original en lengua rusa publicada por Editorial Nedra, Moscú. 1980 Ed. Reverté, S.A. España.

Gorman, T. and W. E. Kelly, 1990. Electrical-Hydraulic Properties of Unsaturated Ottawa Sands. J. Hydrology, 118, 1-18.

Hennig T., Weller A. & Canh T. (2005). The effect of dike geometry on different resistivity configurations. Journal of Applied Geophysics 57, 278-292.

Jones H. L. E.A. Hajek (2007) Characterizing avulsion stratigraphy in Ancient alluvial deposits.

J. tapias y M. Himi (2005). Estimación de la distribución espacial de las propiedades texturales de los suelos por tomografía eléctrica. Barcelona España. McGraw–Hill.

Juárez Badillo., Rico Rodríguez (1985) Mecánica de Suelos Tomo 1 Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tercera Edición. Editorial Limusa.

Kéller Frischknecht (1966) Electrical Methods in Geophysical prospecting.

Koefoed, O. 1979. Geosounding Principles, 1: Resistivity Sounding Measurements. Elsevier. Amsterdam. 276 pp.

Krohn, C. E., 1988. Sandstone Fractal and Euclidean Pore Volume Distributions. JGR, 93, B4, 3286-3296.

Lane et al (1995). Characteristics of fractures in crystalline bedrock determined by surface and borehole geophysical ...

Lashkaripour G. (2003). An investigation of groundwater condition by geoelectrical resistivity method: A case study in Korin aquifer, southeast Iran. Journal of Spatial Hydrology. Vol. 3. No.1.

Mayer 1984 Differentiating anisotropy and lateral effects using azimuthal resistivity offset Wenner soundings.

Milsom J. (1996). Field Geophysics. Third Edition. Wiley Editors. U.S.A.

Molina, W. (2006). Comparación de los métodos 1-d y 2-d de resistividad eléctrica por medio de sondeos tipo Wenner, Dipolo-dipolo y Wenner Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD y RES2DINV. UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR.

Niels B. (2000). Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations. Geophysical Prospecting 48, 1-19.

NOM-001-SEDE-1999. Norma Oficial Mexicana relativa a las instalaciones destinadas al suministro y uso de la energía eléctrica.

Nunn, et al (1983) Seismic reflection coefficients from mantle fault zones.

Pernía Llera José María Corral Lledo María del Mar Análisis del Llenado de los Acuíferos en Función de Diferentes Periodos Históricos de Referencia.

Ramos José, López Héctor, Julián Víctor -Martínez Ruiz, José Jorge Arana-Gómez (2007). Sucesión de eventos y Geometría de la parte central del

acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, México) inferida a partir de datos geoelectricos.

Ruiz J. (1993). Prospección geoelectrica y registros geofísicos de pozos. Libro V. C.N.A. México.

Schmutz M., Andrieux P., Bobachev A., Montoroi J. & Nasri S. (2006). Azimuthal resistivity soundings over a steeply dipping anisotropic formation. A case history in central Tunisia. *Journal of Applied Geophysics* 60, 213-224.

Soto Ortiz y Gonzáles Púa 1999. Sistemas de puesta a Tierra en los cerros. *Ingeniería & desarrollo. Universidad del norte* 5:112-118-1999. Colombia.

Steinich B., I. Simon, J., A. Chavarría & I. Marín, (1997). Geophysical investigations of the vadose zone in the Valley of Hermosillo aquifer, Sonora, México. *Geofísica internacional*, 1-11.

J.C. Tapias, M. Himi y A. Casas (2005) Estimación de la Distribución Espacial de las Propiedades Texturales de los Suelospor Tomografía Eléctrica: Principios y Aplicaciones

Taylor and Fleming (1980) Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by.

Valkenburgh V. Nooger Nevill Inc. (2004). Basic Electricity. Vol.1. © by The Neville Press, Inc. (12ª ed.). México: CECSA. Vega M.I., García Alonso, J. M. Miranda, F. Capilla (2007). Corrosión behaviour of new staniles steels reinforcing bars embedded in concrete.

Zapata, A. (2001). Prospección de materiales de aluvión, mediante estudio geoelectrico para el cálculo de reservas y planeamiento minero. Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre "Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción". Programa CYTED. Madrid. pp. 1-10

J Mantilla, M Vega 1999 - Método para calcular la tasa de salida en una línea, debido a descargas atmosféricas indirectas Tesis de Grado. Universidad Simón Bolívar,

ANEXOS

ANEXO 1.

La NOM-001- SEDE-1999

Es la Norma Oficial Mexicana 001 de la Secretaría de Energía versión 1999 vigente a la fecha. Para todo lo relacionado con instalaciones eléctricas de todo tipo y fabricación de equipos eléctricos y electrónicos.

La reglamentación para los SPT está contenida en el artículo 250 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-1999. Se cita para este trabajo en forma sintética por la amplitud, lo siguiente:

Los sistemas eléctricos se conectan a Tierra. Artículo 250-1. En sistemas, circuitos y equipos. Conductor a Tierra, conexiones y electrodos.

- Para limitar las sobretensiones eléctricas debidas a descargas atmosféricas.
- Transitorios en la red o contacto accidental con líneas de alta tensión,
- Para estabilizar la tensión eléctrica a Tierra durante su funcionamiento normal.

Abunda:

- Los equipos se conectan a Tierra de modo que ofrezcan un camino de baja impedancia para las corrientes eléctricas de falla y que faciliten el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en caso de falla a Tierra.
- Los materiales conductores que rodean a conductores o equipos eléctricos o que forman parte de dicho equipo, se conectan a Tierra para limitar la tensión a Tierra de esos materiales y para facilitar el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en caso de falla a Tierra.

Sistema de electrodos de puesta a Tierra. Artículos 250 del 81 al 84

Electrodos de varilla o tubería. Los electrodos de varilla y tubo no deben tener menos de 2,4 m de longitud, deben ser del material especificado a continuación y estar instalados del siguiente modo:

- 1) Los electrodos consistentes en tubería o tubo (conduit) no deben tener un tamaño nominal inferior a 19 mm (diámetro) y, si son de hierro o acero, deben tener superficie exterior galvanizada o revestida de cualquier otro metal que los proteja contra la corrosión.
- 2) Los electrodos de varilla de hierro o de acero deben tener como mínimo un diámetro de 16 mm. Las varillas de acero inoxidable inferiores a 16 mm de diámetro, las de metales no-ferrosos o sus equivalentes, deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 13 mm. 250-83 (c) y (d) Los electrodos se deben conectar entre sí para formar el sistema de electrodos de puesta a Tierra. Con conexiones a presión aprobados o por soldadura exotérmica.

250-84, Resistencia de los electrodos fabricados. Un electrodo único que consista en una varilla, tubería o placa y que no tenga una resistencia a Tierra de 25Ω o menos, se debe complementar con un electrodo adicional de cualquiera de los tipos especificados en 250-81 o 250-83. Cuando se instalen varios electrodos de barras, tubos o placas para cumplir los requisitos de esta Sección, se deben colocar a una distancia mínima de 1,83 m entre sí y deben estar efectivamente conectados.

NOTA: La instalación en paralelo de varillas de más de 2,4 m aumenta la eficiencia si se separan más de 1,8 m.

250-86. Varillas de pararrayos. No se deben usar conductores de puesta a Tierra de los pararrayos ni tubos, varillas u otros electrodos fabricados utilizados para poner a Tierra las bajadas de los pararrayos, en sustitución de los electrodos de Tierra indicados en 250-83 para la puesta a Tierra de sistemas eléctricos y de equipo. Esta disposición no impide cumplir los requisitos de conexión de los electrodos de puesta a Tierra de diversos sistemas.

NOTA 1: Para la separación de los electrodos de los pararrayos, véase 250-46. Para la conexión de los electrodos, véanse 800-40 (d), 810-21(j) y 820-40 (d).

NOTA 2: Si se interconectan todos los electrodos de puesta a Tierra de distintos sistemas, limitan la diferencia de potencial entre ellos y entre sus correspondientes sistemas de alambrado.

D. Métodos de puesta a Tierra

820-40. Puesta a Tierra en cables. Cuando lo requiere la Sección 820-33, la pantalla del cable coaxial debe ponerse a Tierra como se especifica en los incisos siguientes:

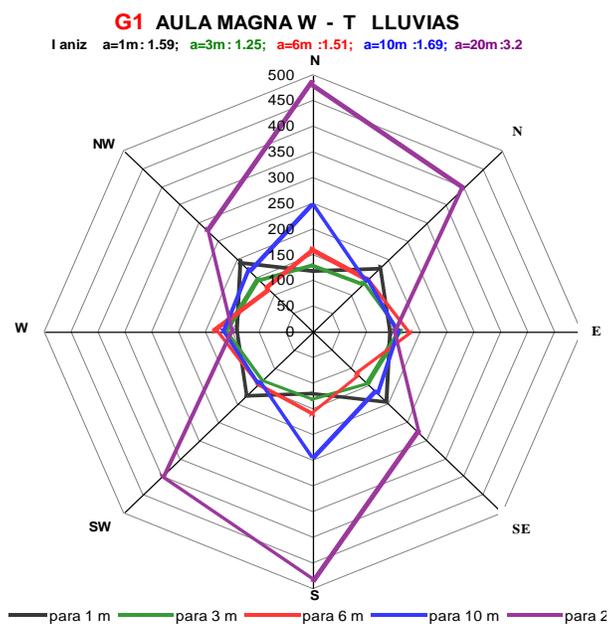
- d) Unión de electrodos. Debe conectarse un puente de unión de tamaño nominal no menor a 13, 30 mm² (6 AWG) de cobre o equivalente entre el sistema de electrodos de puesta a Tierra de la antena y el sistema de electrodos de puesta a Tierra de energía en el edificio o estructura, cuando se usen electrodos separados.

El campo eléctrico normal de una toma de Tierra depende de la fuerza de la corriente enviada al terreno y de las características del subsuelo.

ANEXO 2

Gráficos de sondeos azimutales Wenner.

Se muestran en las siguientes figuras los gráficos azimutales Wenner 8 en lluvias y 8 en estiaje tomadas en las mismas coordenadas de ubicación. Se pueden observar en ellas propiedades del suelo en la variación de la resistividad y profundidad para cada valor de a en su color correspondiente. La profundidad aproximada que se alcanza corresponde a cada valor de a en profundidad.



G1 AULA MAGNA W - T ESTIAJE

I. aniz a=1m:1.03; a=3m:1.13; a=6m:1.08; a=10m:1.07; a=20m:1.41

