



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

**“APLICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES
PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN
LA COMUNIDAD DE PAZOLTEPEC, TLACOTEPEC DE
BENITO JUÁREZ, PUEBLA”**

TESIS

Que para obtener el grado de

LICENCIADO EN INGENIERÍA GEOFÍSICA

Presenta

ELTON REGALADO AYALA

Asesor de tesis

ING. MANUEL CONRADO URIBE ARRIAGA

Junio 2025



Oficio No. SAC/0892/2025

**C. Elton Regalado Ayala -201219011-
Pasante de la carrera de Ingeniería
Geofísica
Presente.**

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

“APLICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA COMUNIDAD DE PAZOLTEPEC, TLACOTEPEC DE BENITO JUÁREZ, PUEBLA”

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Director de Tema al Ing. Manuel Conrado Uribe Arriaga.

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

Atentamente

“Pensar bien para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 02 de junio de 2025

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



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

Facultad
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente.

El que suscribe: Ing. Manuel Conrado Uribe Arriaga, director del tema de tesis

“APLICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA COMUNIDAD DE PAZOLTEPEC, TLACOTEPEC DE BENITO JUÁREZ, PUEBLA”

Presentada por el C. Elton Regalado Ayala -201219011-, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0892/2025 con fecha de emisión 02 de junio de 2025, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

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

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 06 de junio de 2025

Ing. Manuel Conrado Uribe Arriaga
Director de Tema



I'MCUA/barv
C.c.p. Archivo



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

**“APLICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES
PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN
LA COMUNIDAD DE PAZOLTEPEC, TLACOTEPEC DE
BENITO JUÁREZ, PUEBLA”.**

TESIS

Que para obtener el grado de

LICENCIADO EN INGENIERÍA GEOFÍSICA

Presenta

ELTON REGALADO AYALA

Comité de sínodos

Director de tesis	Ing. Manuel C. Uribe Arriaga.
Sinodal	M.C. José Serrano Ortíz.
Vocal	M.I. José Luis González Guevara.

Junio 2025

AGRADECIMIENTOS

“Si he visto más lejos, es porque estoy parado sobre los hombros de gigantes”.

“Pa biiya jma situ, ti zuhuua lu xhiique binni nandxó”.

Isaac Newton/traducción Elton R. Ayala.

Gracias a la vida que me ha dado tanto, al universo por permitir culminar mis estudios, a mis padres, el profesor Raymundo Regalado Jiménez y profesora Evarista Ayala Castillo, por su dedicación, impulso y sacrificio hacia mi persona.

A mis hermanos María Elisa, Raymundo y Pavel, mis incondicionales en la vida.

A los catedráticos de la Facultad de ingeniería, por compartir sus conocimientos y su valioso tiempo durante mi estancia en el colegio de Geofísica.

Gracias a mis compañeros de colegio, en especial a Jesús Zarate Pérez, por los triunfos que conquistamos y por las singularidades que vivimos.

Gracias a mis directivos, profesores, compañeros y personal de la facultad de ingeniería por el apoyo después de los sismos de septiembre del 2017.

Gracias Ing. Uribe por su paciencia y guía en este trabajo, Maestro José Serrano y Maestro José Luis Guevara por pulir el contenido de esta tesis.

Maestro Raúl Vásquez y Maestro José Castillo por su paciencia académica durante mi estancia en el colegio y las atenciones a mi proyecto de tesis.

A los estudiantes, maestros, obreros, campesinos, ferrocarrileros que participaron en el movimiento de Reforma Universitaria de los 70's.

Gracias totales.

DEDICATORIA.

A mis padres:

Profesor Raymundo Reglado Jiménez y Profesora Evarista Ayala Castillo.

A mis hermanos:

María Elisa, Raymundo y Pavel Amir regalado Ayala.

A mis abuelos:

Lorenzo Regalado, María Dolores Jiménez, Vicente Ayala y Elisa Castillo, raíces profundas de mi ser.

A mi familia:

Por todos ustedes familia Regalado Jiménez y Ayala Castillo, por sus ánimos, por impulsarme y por las atenciones recibidas les dedico esta humilde tesis.

A las familias:

Pineda Guerra, Eduardo Martín, Martín García, Salgado Villavicencio y García García, por recibirme siempre con los brazos abiertos y calidez familiar.

A las vidas que se tomaron en el movimiento de Reforma Universitaria, su muerte se reivindica en cada estudiante que culminan sus estudios en esta Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE MAPAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I	3
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	7
CAPÍTULO II	8
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	8
2.2. GEOLOGÍA.....	11
2.3. ESTRATIGRAFÍA	15
2.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	22
2.5 MARCO HIDROGRÁFICO.....	24
CAPÍTULO III	29
3. MARCO TEÓRICO.....	29
3.2 RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS	49
CAPÍTULO IV	54
4. METODOLOGÍA.....	54
4.2. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	64
4.3. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	68
4.3. MODELACIÓN GEOELÉCTRICA EN SURFER	74
CAPÍTULO V	79
5.- RESULTADOS	79
5.2. ANÁLISIS TÉCNICO	81
5.3. MODELO DE POZO	84
5.4.1 CORRELACIÓN GEOFÍSICA.....	87

CAPÍTULO VI	90
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
6.2. RECOMENDACIONES	91
CAPÍTULO VII	93
7.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 CORTE LITOLÓGICO PROPUESTO PARA LA ZONA DE ESTUDIO, TOMADO DE DOMINGUEZ.(2005).TESIS DOCTORAL.CIUDAD DE MÉXICO,MÉXICO: UNAM.....	16
FIGURA 2.2 CORTE LITOLÓGICO UBICADO EN TEPEYEHUALCO DE CUAUHTÉMOC. NIVEL PIEZOMÉTRICO DE 91M. TOMADO DE DOMÍNGUEZ.(2005).TESIS DOCTORAL.CIUDAD DE MÉXICO,MÉXICO: UNAM.	18
FIGURA 2.3 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA QUE DESCRIBE LA AVALANCHA DE ESCOMBROS IZTACCÍHUATL (DAEIZ). (MALDE,1968).....	19
FIGURA 2.4 TERRENOS TECTONO-ESTRATIGRÁFICOS.(GEOLÓGICO-MINERA: ORIZABA E14-6;SGM).....	21
FIGURA 2.5 EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS (DOF, 2005). ..	27
FIGURA 3.1 APLICACIONES DE LA PROSPECCIÓN ELÉCTRICA. TOMADO DE: (IRIS INSTRUMENTS,2006)	30
FIGURA 3.2 EL PRINCIPIO DE MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO; SE INYECTA UNA CORRIENTE I ENTRE EL PAR DE ELECTRODOS AB Y SE MIDE LA DIFERENCIA DE POTENCIAL ΔV ENTRE EL PAR DE ELECTRODOS MN. (TOMADA DE ORELLANA, 1974).....	31
FIGURA 3.2 EL PRINCIPIO DE MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO; SE INYECTA UNA CORRIENTE I ENTRE EL PAR DE ELECTRODOS AB Y SE	

MIDE LA DIFERENCIA DE POTENCIAL ΔV ENTRE EL PAR DE ELECTRODOS MN. (TOMADA DE ORELLANA, 1974).	33
FIGURA 3.3 FLUJO DE CORRIENTE ELÉCTRICA GENERANDO A TRAVÉS DE UN ELECTRODO Y LA DISTRIBUCIÓN DEL POTENCIAL QUE OCASIONA (TOMADA DE LOKE,2004).	36
FIGURA 3.4 ARREGLO GENERAL DE LOS SEV .ELECTRODOS DE CORRIENTE (AB), ELECTRODOS DE POTENCIAL (MN).	40
FIGURA 3.5 EJEMPLO DE CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE GRAFICADA EN UNA HOJA BILOGARÍTMICA, SOFTWARE IPI2WIN. LA CURVA NEGRA REPRESENTA LA CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE, LA CURVA ROJA REPRESENTA LA CURVA CALCULADA Y LAS LÍNEAS AZULES REPRESENTAN LOS ESPESORES DE LAS CAPAS CALCULADAS.	41
FIGURA 3.6 CORTES DE DOS CAPAS $P2 > P1$ (AZUL) Y $P2 < P1$ (ROJO).	43
FIGURA 3.7 CORTE DE TRES CAPAS K Y H.	44
FIGURA 3.8 CORTE DE TRES CAPA TIPO A Y Q.	44
FIGURA 3.9 CORTES DE CUATRO CAPAS.	45
FIGURA 3.10 DISPOSITIVO SCHLUMBERGER. SEPARACIÓN ELECTRÓDICA "A", $S=AB/2$ (DOBRIN,M.B.& SAVIT,C.H.,1988).	46
FIGURA 3.11 DISPOSITIVO SCHLUMBERGER,(MODIFICADO DE ORELLANA,1982)	47
FIGURA 3.12 RANGOS DE VARIACIÓN DE LAS RESISTIVIDADES MÁS COMUNES DE ALGUNAS ROCAS Y MINERALES (N, LOZADA;2017).	50
FIGURA 4.1 RESISTIVÍMETRO SARIS.(SCINTREX,CAN.2013)	55
FIGURA 4.2 RESISTIVÍMETRO CONECTADO.	56
FIGURA 4.3 MODELO DE CAPAS P1S1.	68
FIGURA 4.4 MODELO DE CAPAS P1S2.	68
FIGURA 4.5 MODELO DE CAPAS P1S3.	69

FIGURA 4.6 PSEUDOSECCIÓN DE UNIDADES GEOELÉCTRICAS DEL PUNTO 1.....	70
FIGURA 4.7 MODELO DE CAPAS P2S1.	71
FIGURA 4.8 MODELO DE CAPAS P2S2.	71
FIGURA 4.9 MODELO DE CAPAS P2S3.	72
FIGURA 4.10 PSEUDOSECCIÓN DE UNIDADES GEOELÉCTRICAS DEL PUNTO 2.....	73
FIGURA 4.11 UNIDADES GEOELÉCTRICAS INTERPOLADAS DEL PUNTO 1 SOBRE NIVEL MEDIO DEL MAR.....	76
FIGURA 4.12 UNIDADES GEOELÉCTRICAS INTERPOLADAS DEL PUNTO 2 SOBRE NIVEL MEDIO DEL MAR.....	78
FIGURA 5.1. MODELO PROPUESTO DE COLUMNA LITOLÓGICA PAZOLTEPEC.	83
FIGURA 5.2 MODELO GEOELÉCTRICO.....	84
FIGURA 5.3 MODELO LITOESTRATIGRÁFICO.....	86
DE ACUERDO CON LA FIGURA 5.2 SE REALIZÓ TOMANDO EN CUENTA LA VARIACIÓN DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DEL ESTUDIO, SE DETECTARON DOS ANOMALÍAS CONTRASTANTES CON RESISTIVIDADES BAJAS RESPECTO A LA ROCA QUE LA CIRCUNDA, POR LO QUE SE DEFINIERON COMO ZONAS CON APORTE DE AGUA.....	88

Índice de Mapas

MAPA 2.1 DELIMITACIÓN REGIONAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.	9
MAPA 2.2 TOPOFORMAS Y CURVAS DE NIVEL.	10
MAPA 2.3 PROVINCIA FISIAGRÁFICA EJE NEOVOLCÁNICO Y SUBPROVINCIAS FISIAGRÁFICAS. (SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA,2005).	12
MAPA 2.4 GEOLOGÍA LOCAL. (MODIFICADO DE: CARTA GEOLÓGICO-MINERA ORIZABA E14-;SGM)	14
MAPA 2.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.	23
MAPA 2.6 HIDROLOGÍA, PRINCIPALES RÍOS DEL ÁREA DE ESTUDIO. (MODIFICADO DE: CONABIO.GOB.MX)	25
MAPA 4.1 MAPA BASE DEL ÁREA DE ESTUDIO.	58
MAPA 4.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.	59
MAPA 4.3 RÁSTER DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA.	60
MAPA 4.4 DIRECCIONES PREFERENCIALES DE LA ESCORRENTÍA.	62
MAPA 4.5 ACUMULACIONES IMPORTANTES DE AGUA.	63
MAPA 4.6 UBICACIÓN DE LOS SEV'S. (P:POLÍGONO,S:SEV).	65
MAPA 6.1 ÁREA DE PERFORACIÓN	92

Índice de Tablas

TABLA 2.1 DELIMITACIÓN POLIGONAL DEL ACUÍFERO DE TECAMACHALCO. TOMADO DE DOF. MÉXICO. (2005).....	24
TABLA.3.1 CONFIGURACIÓN DE RESISTIVIDADES PARA LOS DISTINTOS CORTES GEOELÉCTRICOS DE TRES CAPAS (ORELLANA Y MOONEY PARA EL DISPOSITIVO SCHLUMBERGER,1966).....	44
TABLA.3.2 CONFIGURACIÓN DE RESISTIVIDADES PARA LOS DISTINTOS CORTES GEOELÉCTRICOS DE CUATRO CAPAS (ORELLANA Y MOONEY PARA EL DISPOSITIVO SCHLUMBERGER,1966).....	45
TABLA 3.3 RESISTIVIDADES QUE CARACTERIZAN A LOS MINERALES, ROCAS Y SEDIMENTOS (TELLFORD ET AL,1990).	51
TABLA 3.4 VALORES DE RESISTIVIDAD DE ROCAS, MINERALES, AGUAS, SEDIMENTOS QUÍMICOS, MINERALES Y MATERIALES (TABLA TOMADA DE E. ANAYA, TESIS LICENCIATURA, 2010).	53
TABLA 4.1 PRUEBAS PRELIMINARES (FLORES DANIEL,2018).....	54
TABLA 4.2 UBICACIÓN DE LOS SEV'S.	64
TABLA 4.3 RESISTIVIDADES APARENTES, PUNTO1.	66
TABLA 4.4 RESISTIVIDADES APARENTES PUNTO2.	67
TABLA 4.5 UNIDADES GEOELÉCTRICAS. RANGO DE RESISTIVIDADES Y SU CLASIFICACIÓN.....	74

Resumen

El presente trabajo expone la aplicación de sondeos eléctricos verticales aplicados a la exploración de aguas subterráneas en la comunidad de Pazoltepec, perteneciente al municipio de Tlacotepec de Benito Juárez, en el estado de Puebla.

La inversión de los datos recabados en campo fue utilizando el software IPI2WIN para determinar las curvas de resistividades verdaderas y proponer un modelo geoelectrico del sitio de estudio. El resultado de las curvas de resistividades se modeló capas de pseudosecciones de resistividad verdadera respecto a la profundidad, se definió la profundidad de exploración de 150 m de profundidad y el nivel freático se estimó a 70m de profundidad.

Los materiales de recorte tomados de la perforación exploratoria ayudaron a caracterizar la litología de las rocas saturadas de agua las cuales se definieron como: Brechas andesíticas, tobas arenosas y tobas calcáreas del Terciario Superior, clasificadas como material de arrastre y de origen vulcano-sedimentario; con resistividades verdaderas resultados de la modelación oscilan de $5 \Omega \cdot m$ hasta $30 \Omega \cdot m$.

La interpretación del sitio se modeló a partir de la integración del modelo de capas, modelos de resistividades aparentes, pseudosecciones de resistividad; la información geológica, litoestratigráfica compilada en la web y muestras de material de recorte extraídas en el sitio durante la perforación.

Abstract

This work sets out the application of vertical electrical surveys for groundwater exploration in the community of Pazoltepec, belonging to the municipality of Tlacotepec de Benito Juárez, Puebla.

Inversion of data collected in the field was applied to determine the true resistivity and to propose a geological model of the study site, the data inversion was performed with IPI2WIN software.

With the inversion of the data obtained, layers of pseudo-sections of resistivity were modeled with respect to depth, the depth of exploration was defined at 150 m of depth and the water table was estimated at 70 m of depth.

The interpretation was integrated with the apparent resistivity data, resistivity pseudo-sections and geological and litho-stratigraphic information compiled on the web and samples extracted on the site during drilling.

The information taken from exploratory drilling helped to characterize the lithology of water-saturated rocks which were defined as: Andesitic breccias, sandy tufts and calcareous tufts of the Upper Tertiary, classified as drag material and of Volcano-sedimentary origin; with true resistivities ranging from 5 Ω m to 30 Ω m.

Capítulo I

1. Introducción

El agua es parte de los bienes naturales más importantes del país, constituye un factor detonante para el crecimiento y el bienestar de la sociedad, satisface las necesidades más elementales del ser humano, es indispensable para el riego de cultivos y el desarrollo económico.

El diagnóstico de México en cuanto a la “disponibilidad” de agua por habitante ha caído un 78% de 1950 a 2013 (de 18 035 a 3 982 m³/hab). El mismo diagnóstico señala que de 731 cuencas hidrológicas, 104 (14%) tienen problemas de disponibilidad y de los 653 acuíferos, 106 están sobreexplotados que significa el 16%. (Huizar *et al* ,2017).

Los métodos geofísicos son herramientas no invasivas utilizadas para definir las propiedades y condiciones físicas del subsuelo, en la industria minera y petrolera permiten definir estructuras geológicas para su aprovechamiento. Actualmente debido a la demanda de agua los métodos geofísicos son una herramienta versátil e importante para estudios hidrogeológicos.

En este estudio se aplicó la técnica de exploración geofísica en la modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) con el objetivo de localizar el agua contenida en la roca a profundidad, a partir de la variación de las resistividades del subsuelo.

La zona de estudio de acuerdo con CONAGUA: Tlacotepec de Benito Juárez queda comprendida en las regiones hidrológicas del Papaloapan y del Balsas; el valle de Esperanza y la región de Tehuacán pertenece a la subcuenca del río Salado, emplazada en la Región Hidrológica No. 28, cuenca del Río Papaloapan.

1.1. Planteamiento del problema.

Los campesinos de la comunidad de Pazoltepec, Tlacotepec de Benito Juárez, Puebla, enfrentan el desabasto de agua para uso agrícola y pecuario, debido a la irregularidad de la temporada de lluvias y la deficiencia del sistema de riego proveniente de la presa Valsequillo, solicitaron el apoyo del colegio de Geofísica.

Como antecedente, durante el año 2006 en esta comunidad se efectuó una perforación exploratoria de 136 metros con resultados negativos para el alumbramiento de agua. Ello debido a que no se utilizaron métodos de exploración geofísica para aguas subterráneas y nula supervisión en la perforación, derivó en derrumbes en las formaciones a partir de los 128 m de profundidad, lo que hizo imposible seguir con la perforación y el desarrollo del pozo.

El crecimiento de la población y la demanda de volúmenes importantes de agua para actividades productivas de la comunidad obliga la apertura de nuevos pozos profundos.

No existe información geofísica publicada a cerca de la naturaleza hidrogeológica en el área de estudio.

1.1.2. Justificación

La aplicación de métodos de exploración Geofísica en la modalidad de SEV's con arreglo Schlumberger resulta una técnica efectiva para la ubicación de agua subterránea a partir de las variaciones de resistividad del subsuelo, se modelan a partir de capas geoelectricas y se asocian las propiedades físicas de las formaciones de rocosas. El análisis y modelado de los SEV's para la exploración de aguas subterráneas permite definir el nivel freático y las rocas saturadas de agua a profundidad.

La cualidad más ventajosa de la técnica de SEV's es que mapea grandes áreas de manera rápida, en comparación con métodos de exploración directa como la perforación. La profundidad y resolución de la exploración con el arreglo Schlumberger es mayor en comparación con otros arreglos electródicos debido a que compensa la caída de potencial para obtener señales de datos con el menor ruido posible, los SEV's son métodos no invasivos, por lo que no alteran las propiedades físicas o estructurales del subsuelo.

El aprovechamiento del agua subterránea será para el riego de las tierras de cultivo y sustento de pequeños hatos de ganado ovino y porcino que son las principales fuentes económicas en esta comunidad. En el área de estudio no existen reportes escritos o información geofísica alguna, por lo que este trabajo aporta información científica importante para estudios de exploración e investigación científica para proyectos a "*posteriori*" relacionados al agua subterránea de esta comunidad.

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1. General:

Ubicar y desarrollar un pozo profundo de uso agropecuario, en la comunidad de Pazoltepec, Tlacotepec de Benito Juárez, Puebla, aplicando Sondeos Eléctricos Verticales.

1.2.2. Particulares:

- Obtener las resistividades verdaderas de la zona de estudio, aplicando el método de inversión de datos en IPI2WIN.
- Definir el nivel freático, a partir del análisis de curvas de resistividad y modelos geoelectricos.
- Determinar la profundidad de exploración y las formaciones de roca saturadas de agua, a partir de la correlación de las secciones geoelectricas y la información geológica de gabinete y de campo.

1.3. Alcances y Limitaciones

1.3.1. Alcances.

De acuerdo con los antecedentes de la perforación exploratoria de 136 m se pretende alcanzar una profundidad de exploración mínima de 150 m y máxima de 200 m.

- Investigar en el Polígono de interés; aplicación de tres SEV's en el lindero principal de las villas del ferrocarril de Pazoltepec, coordenadas: 649245.85 m E, 2060016.16 m N, con 1894 msnmm (metros sobre el nivel medio del mar).
- La profundidad máxima de exploración es de 200 m aplicando el arreglo electródico Schlumberger, apertura máxima de AB/2 es de 360 metros.
- Realizar una propuesta de columna Litoestratigráfica de la zona de acuerdo con los datos obtenidos en la exploración y el análisis de SIG; integrando información geológica, hidrológica y geofísica del área de estudio.

1.3.2. Limitaciones

- La adquisición de datos, debido al desplazamiento del personal y los equipos en terreno accidentado.
- Las facilidades para adquirir los datos, ya que abarcábamos grandes distancias e invadíamos terrenos para la puesta de los electrodos.
- Calidad de los datos dependen de la continuidad de la señal, debido a que afloraban macizos rocosos.
- Recursos económicos para la perforación y desarrollo de un pozo profundo.

Capítulo II

2. Descripción del área de estudio

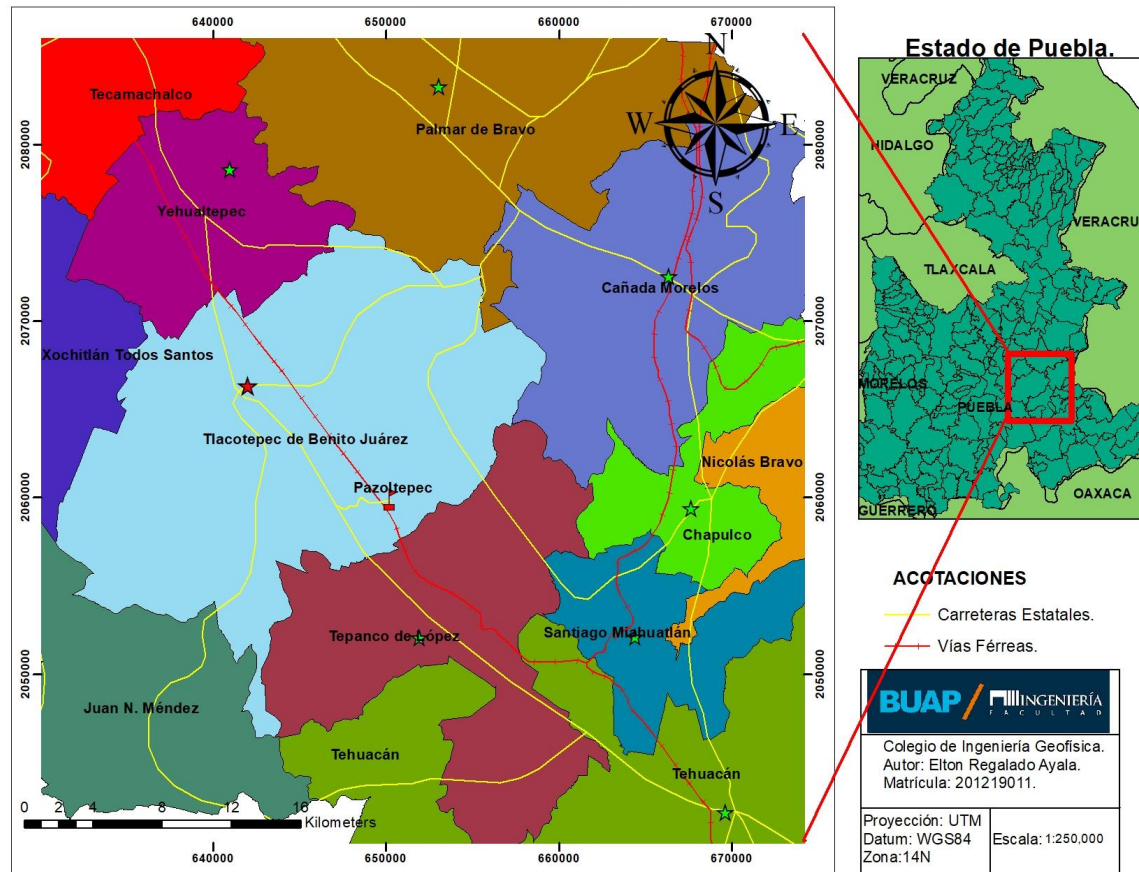
2.1. Área de estudio

El área de interés se encuentra en la comunidad de Pazoltepec se localiza a 35 kilómetros al Suroeste de la ciudad de Tecamachalco principal centro económico regional y a 10 kilómetros al suroeste de su cabecera municipal la ciudad de Tlacotepec de Benito Juárez. Las coordenadas geográficas de Pazoltepec son: 18°37'28.53" N y 97°34'27.83" O con una elevación de 1905 msnmm.

Pazoltepec colinda al Norte con San Marcos Tlacoyalco, al Sur con San Luis Temalacayuca, al Este con la comunidad de Pericotepec y al Oeste con la sierra Monumento.

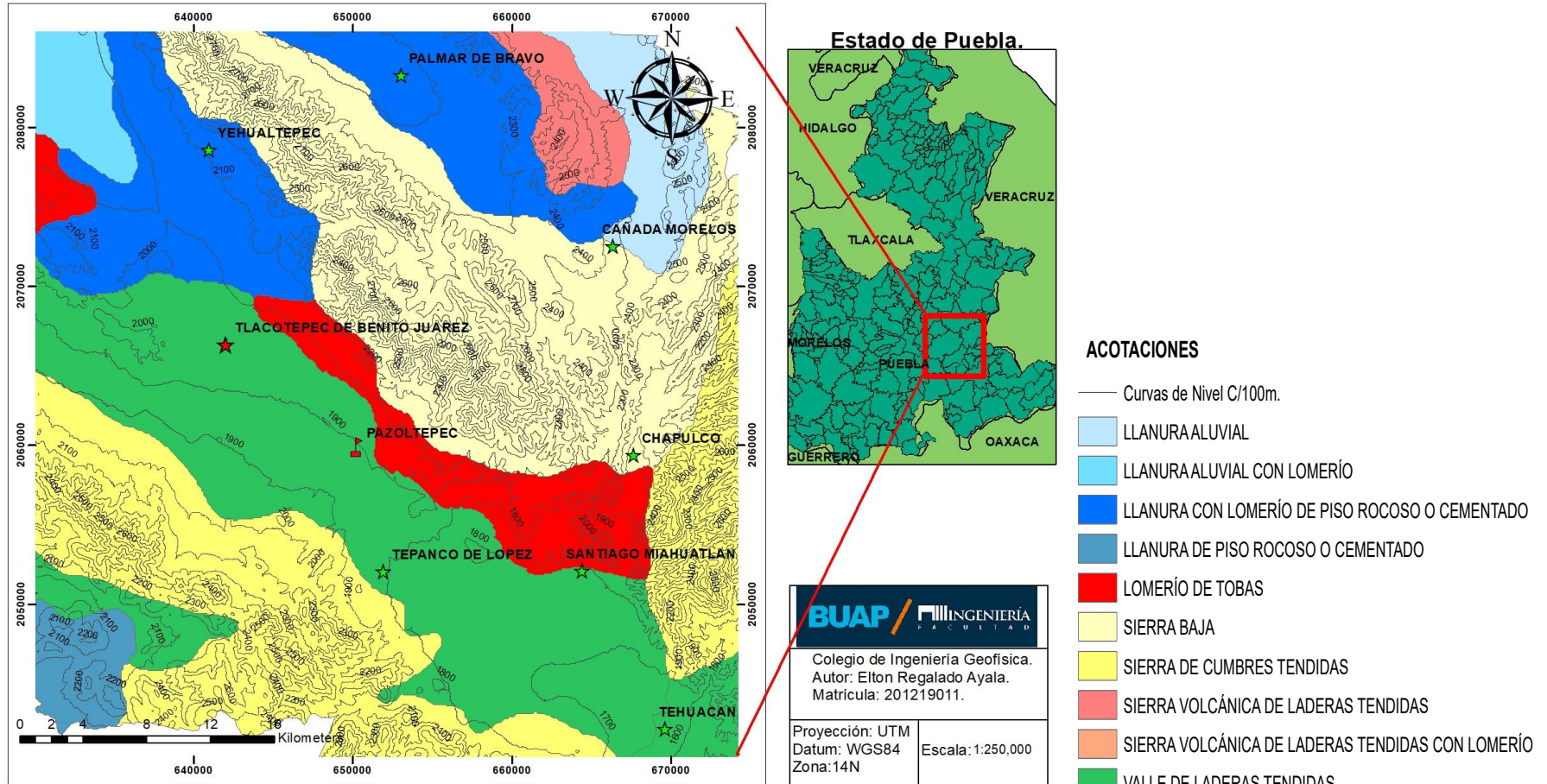
Regionalmente el área de estudio pertenece al municipio de Tlacotepec de Juárez que colinda al norte con los municipios de Yehualtepec y Palmar de Bravo; al este con los municipios de Palmar de Bravo, Cañada Morelos y Tepanco de López; al sur con los municipios de Tepanco de López y Juan N. Méndez; al oeste con los municipios de Juan N. Méndez y Xochitlán Todos Santos. Ocupa el 1.2% de la superficie del estado (INEGI, 2015).

Delimitación Municipal de la Región Tecamachalco-Tehuacán.



Mapa 2.1 Delimitación Regional del área de estudio.

Topoformas y Curvas de Nivel Región Tecamachalco-Tehuacán.



Mapa 2.2 Topoformas y curvas de nivel.

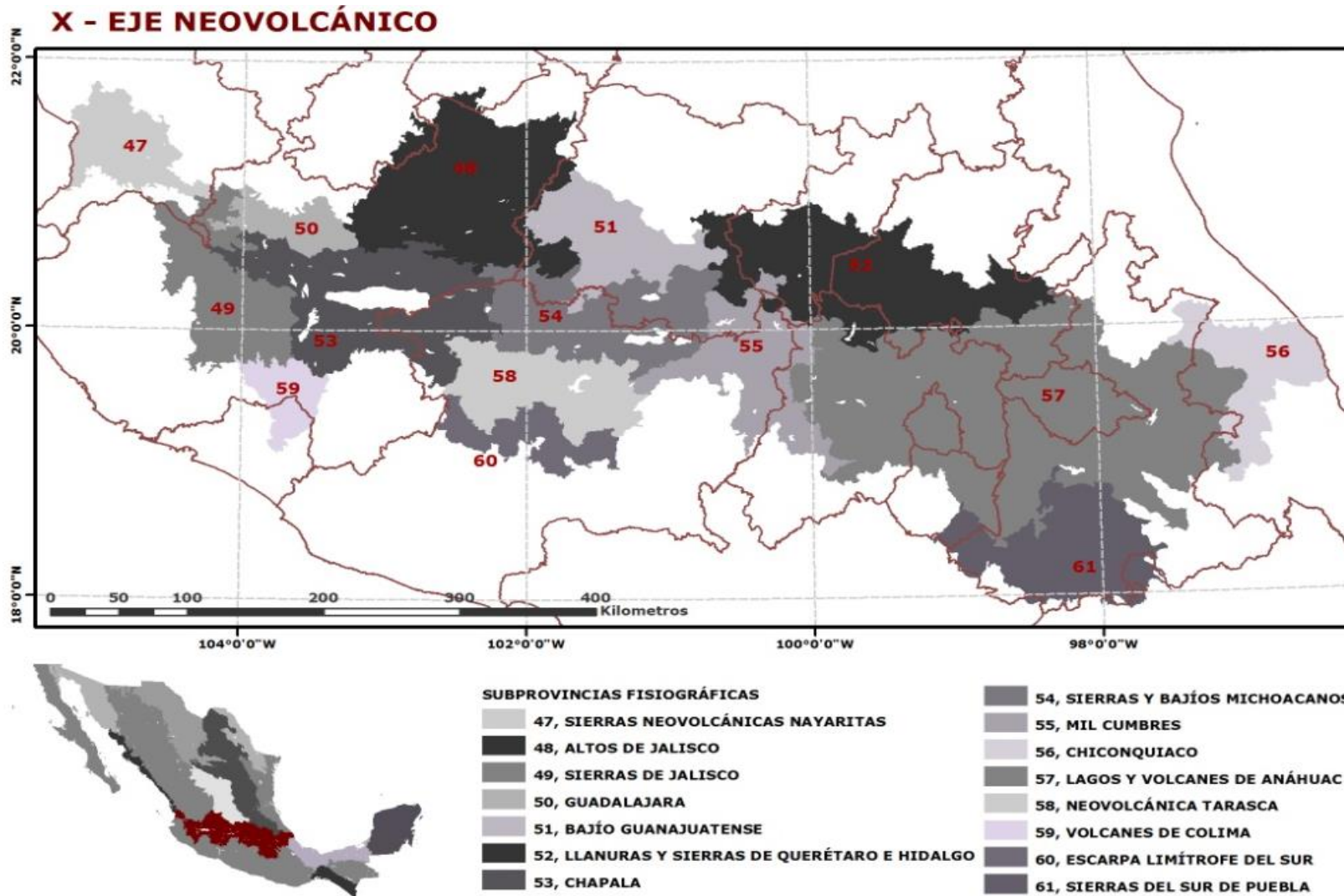
2.2. Geología

La descripción Geológica regional del área de estudio corresponde a la zona de Tecamachalco que se encuentra en el extremo oriental de la provincia fisiográfica Faja Volcánica Transmexicana o Eje Neovolcánico y dentro de las Subprovincias fisiográficas de: Lagos y volcanes del Anáhuac, y Sierras del Sur de Puebla.

Lagos y volcanes del Anáhuac son rocas de características volcánicas como: basaltos, andesitas y riolitas, que han dado origen a sierras y cadenas montañosas, entre las que se han originado tres unidades geomorfológicas: planicies, volcanes y zonas de plegamientos.

Sierras del Sur de Puebla, con plegamientos que caracterizan a las rocas calcáreas y que a su vez constituyen la sierra de forma alargada, con orientación NW-SE, como se observa en la Sierra de Soltepec y Cuesta Blanca.

La Sierra Cuesta Blanca divide geomorfológicamente a los valles de Esperanza y Palmar de Bravo al Oriente de Tecamachalco. La sierra el Monumento delimita los valles de Palmar de Bravo y el de Tepeaca-Tecamachalco. Otras estructuras compuestas de rocas sedimentarias se encuentran son las sierras del Tentzo, Zapotitlán y Tehuacán, localizadas al sur y al sureste de la región de estudio.



Mapa 2.3 Provincia fisiográfica Eje Neovolcánico y subprovincias fisiográficas. (Sociedad Geológica Mexicana, 2005).

2.2.1. Geología Local

La Geología local del área de estudio corresponde a conos de basalto de origen Terciario, tobas andesíticas semiconsolidadas del Cuaternario, conglomerados polimícticos y travertinos del Paleógeno; y plegamientos de Caliza-dolomía del Cretácico Superior.

En la parte baja de los valles se presentan tobas andesíticas de tipo brechas del Cuaternario y material de pie de monte de origen aluvial, clasificadas como arenas y tobas de grano fino, formando parte del suelo con espesores de 0.4 a 1.5 m.

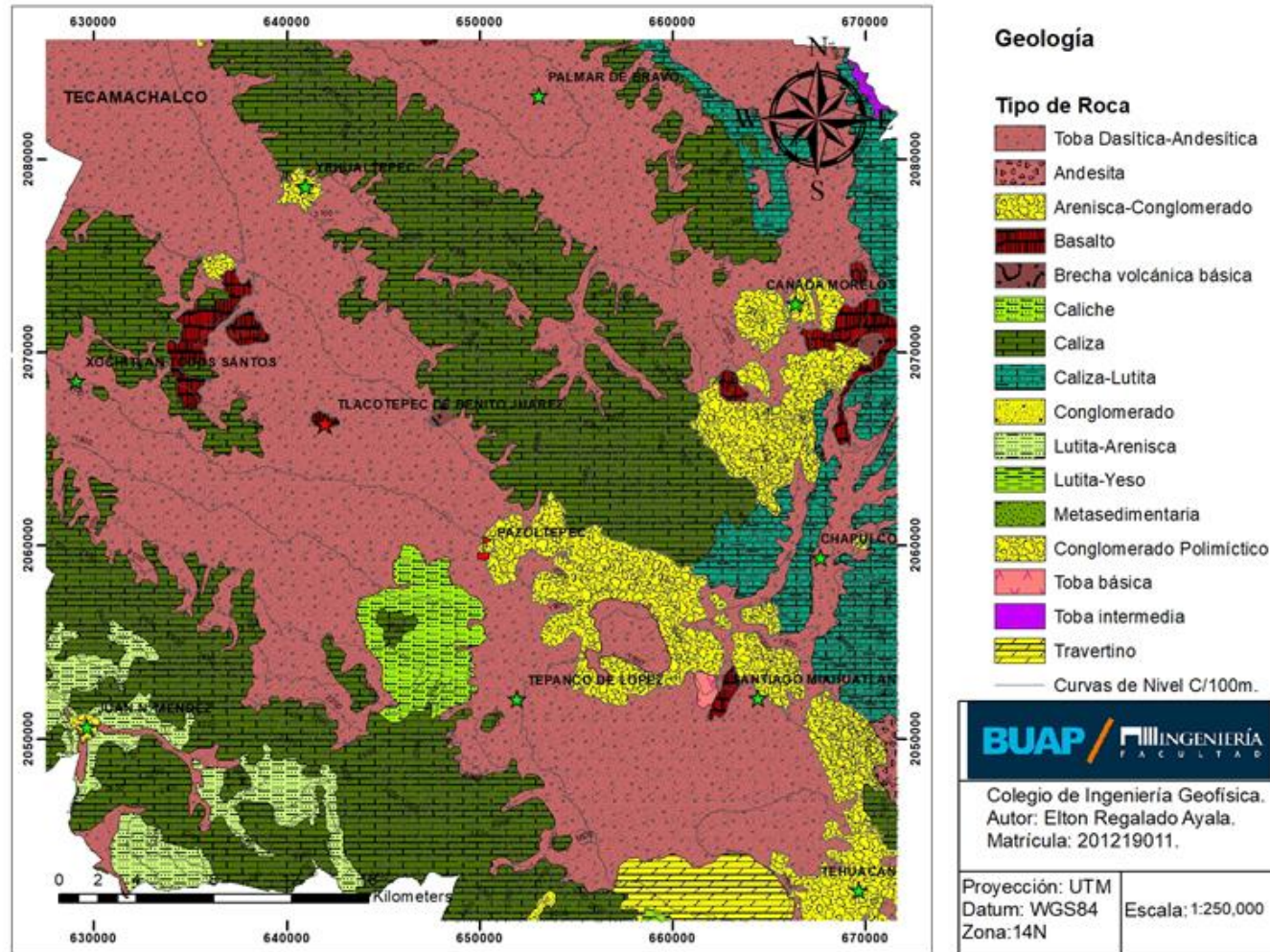
A las faldas de la sierra el monumento ubicado en el oriente del mapa 5 se observan rocas del Terciario (Paleógeno) clasificados como conglomerados polimícticos, y travertinos.

El tepetate es un material arcilloso derivado de la desintegración las rocas volcánicas, puede estar compactado o cementado, constituyen depósitos de piedemonte y aflora al pie de la sierra el monumento ubicado en la parte oriental del mapa 2.2. Debido a que la comunidad fue fundada en esta zona de tepetate derivó a su origen náhuatl "Pazoltepec" que significa "paso de tepetate".

Las rocas sedimentarias Caliza-dolomía se encuentran aflorando las sierras Monumento, La esperanza y Soltepec con dirección NE-SO, material es muy consolidado de color blanco y muy duro, contiene nódulos de pedernal y pequeñas concreciones de cristales de calcita.

Hacia la parte SE afloran rocas Calizas del Cretácico inferior, de matriz fina y muy consolidada de origen marino, compone la sierra cordón de la cuesta en la zona de Tepexi de Rodríguez.

Mapa Geológico.



Mapa 2.4 Geología Local. (Modificado de: Carta Geológico-minera Orizaba E14-; SGM)

2.3. Estratigrafía

De acuerdo con investigaciones de CONAGUA (2015), la secuencia litológica identificada en la zona de Tecamachalco queda comprendida desde el Cretácico inferior al reciente.

2.3.1. Formaciones Orizaba y Cuesta del Cura. Albiano Superior-Cenomaniano (Kt).

“La Formación Orizaba es la más antigua en la zona de estudio compuesta por calizas arrecifales de 3000 metros de espesor” Hilger (1973). La investigación de Padilla y Sánchez (1973) describe que la formación se encuentra en la Sierra del Tentzo ubicada al SE, caracterizando de la siguiente manera: a) grainstone con pelecípodos y nódulos de pedernal color café, y b) calizas masivas de aspecto arrecifal.

Descansando sobre la unidad anterior se presenta una secuencia compuesta por rocas calcáreas pertenecientes a la Formación Orizaba, se caracteriza por la presencia de bandas y nódulos de pedernal, intercaladas con estratos de calizas arrecifales.

“Coronando en forma concordante a la Formación Orizaba, con alternancia de calizas arcillosas lutitas y luego calizas con pedernal pertenecientes a la formación Cuesta del Cura, la cual está cubierta por lutitas y areniscas del Cretácico superior”. Wilson, B.W,et al; (1955.)

A continuación, modelo Litoestratigráfico (Fig.2.1) de la zona Tecamachalco propuesta por la Dra. Eloísa Domínguez.

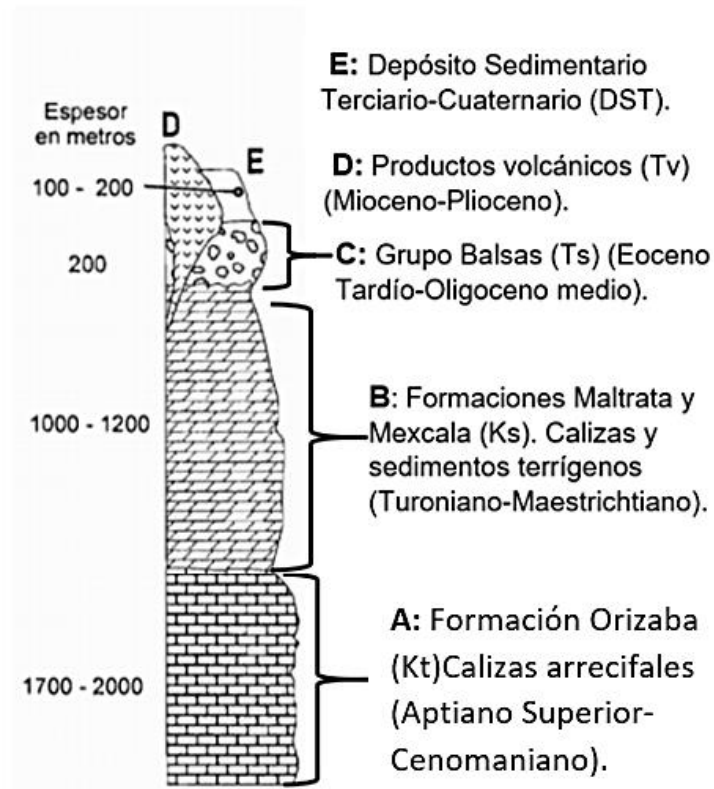


Figura 2.1 Corte litológico propuesto para la zona de estudio, tomado de Domínguez.(2005).Tesis doctoral.Ciudad de México,México: UNAM.

La presencia de un conglomerado compuesto por clastos de calizas fosilíferas, con la presencia de nódulos de pedernal, empacada en una matriz arenosa y cementada con carbonato de calcio, marca el inicio del período Terciario.

Para el periodo cuaternario se han reportado las siguientes unidades litológicas: arenas tobáceas, arenas y gravas. Las arenas tobáceas, afloran en gran parte de los valles Esperanza y Palmar de Bravo, conformadas por arenas pumicíticas que cubren discordantemente a derrames basálticos reciente.

Formación Cuesta del Cura: Esta unidad se compone principalmente de capas delgadas de caliza ondulosa y compactas de color gris oscuro a negro; incluye lutita gris y numerosos lentes de pedernal, algunas capas de caliza son finamente laminadas con bandas grises y negras intercaladas. (Imlay, R.W., 1936).

2.3.2. Formaciones Maltrata, Tehuacán y Mexcala.

Turoniano - Maastrichtiano (Ks).

Formación Maltrata: Compuesta por caliza mudstone compacta arcillosa de color gris, rojizo con abundantes bandas y nódulos de pedernal negro en forma de nódulos irregulares; en la parte inferior entre la caliza se encuentran intercaladas pizarras arcillosas, amarillas, así como horizontes intercalados de lutita. (Böse, 1899).

Formación Tehuacán: Caliza roja de facies pelágica a arrecifal, con microfauna Albiano - Maastrichtiano, presenta estratos gruesos con bandas y nódulos de pedernal. (Arámbaro - Pérez *et al*, 1978).

Formación Mexcala: Consiste en una secuencia rítmica del tipo flysch de arenisca, limolita y lutita calcárea, en estratos de 5-50 cm de espesor, con bandas de pedernal negro. La textura de las rocas varía de mudstone a wackestone, en algunas partes presenta rasgos de disolución y nódulos de pedernal de color negro.

2.3.3. Grupo Balsas. Eoceno tardío-Oligoceno medio(Ts).

Destaca el conglomerado de fragmentos de calizas cretácicas, pedernal y arenisca, areniscas jurásicas y pizarras de la formación Acatlán, las unidades que suprayacen discordantemente rocas cretácicas y subyacen a rocas volcánicas del Eoceno-Oligoceno temprano (Fries, 1956-1962).

La figura 2.5 representa el modelo del corte litológico en Tepeyehualco de Cuauhtémoc, elaborado por la Dra. Eloísa Domínguez.

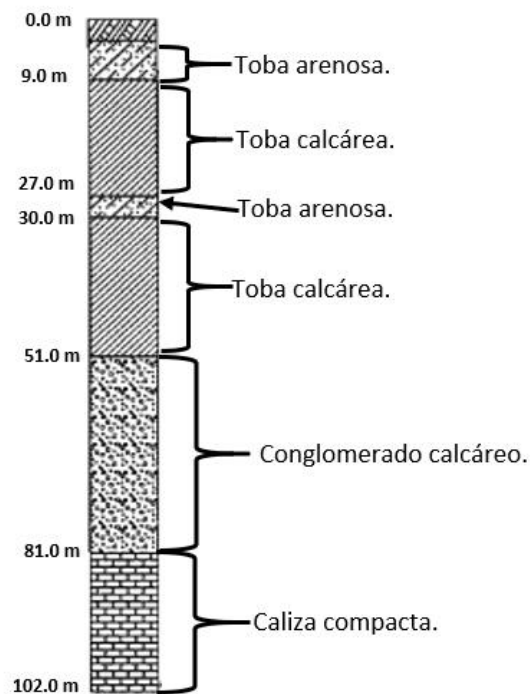


Figura 2.2 Corte litológico ubicado en Tepeyehualco de Cuauhtémoc. Nivel piezométrico de 91m. Tomado de Domínguez.(2005).Tesis doctoral.Ciudad de México,México: UNAM.

Productos lávicos del Mioceno-Plioceno (Tv):

Depósitos de origen volcánico de color gris que denomina “lava Ixcalco” que corresponde a andesita olivínica. Conformadas por capas sucesivas de coladas de andesita o basalto y de depósitos piroclásticos, como ejemplo el cerro Techcalrey de cima plana ubicada al NE de Tecamachalco, donde las andesitas subyacen a la secuencia de sedimentos lacustres (Domínguez, E.2005).

En tanto el Cerro colorados en San Lorenzo Ometepec es una brecha volcánica con matriz de microlitos, plagioclasas (labradorita), augita, fragmentos de roca ígnea (basalto). Exhibe poros y fracturas rellenas de calcita o arcillas la figura 2.6 muestra a detalle. (Domínguez, E. 2005).

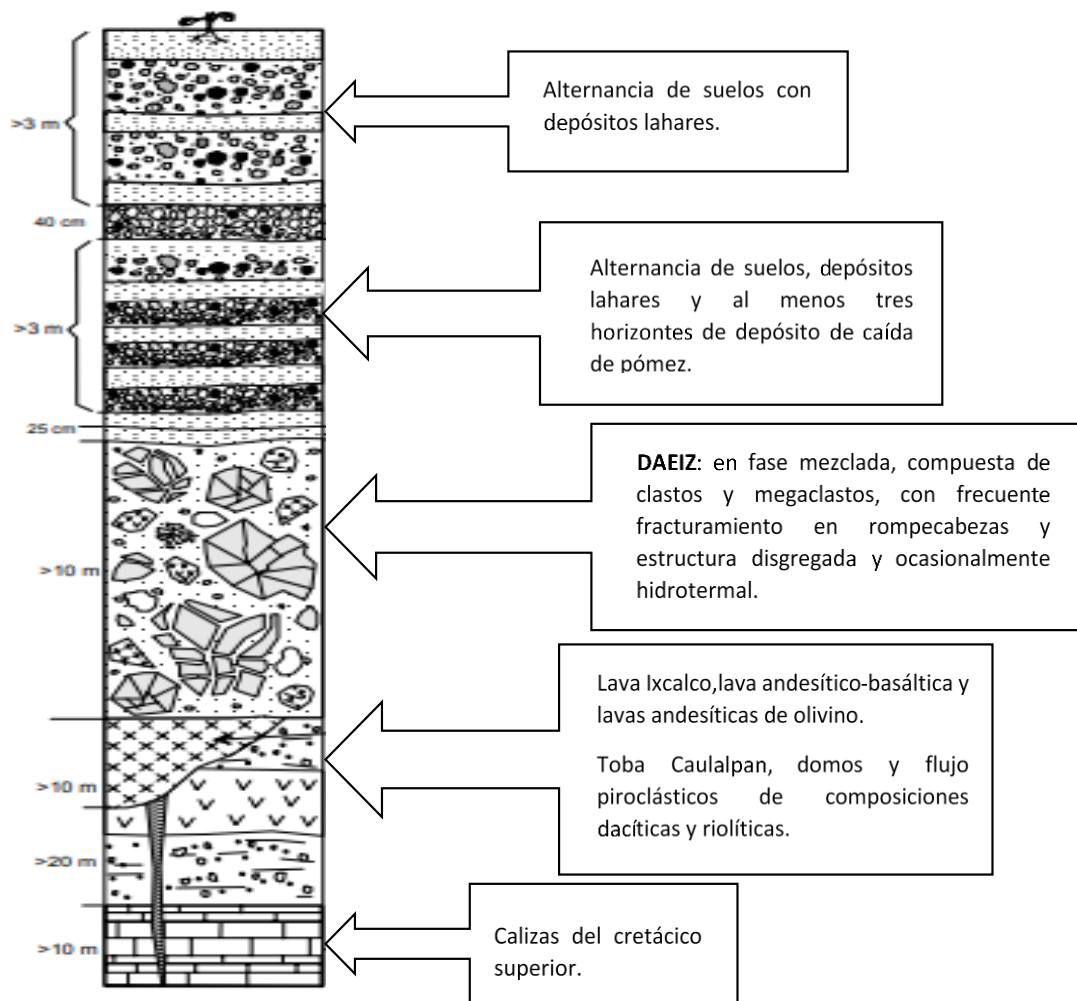


Figura 2.3 Columna estratigráfica que describe la avalancha de escombros Iztaccíhuatl (DAEIZ). (Malde, 1968).

2.3.4. Depósito Sedimentario Terciario-Cuaternario (DST).

Forman el acuífero somero, se han integrado y denominado como Depósito Sedimentario Terciario-Cuaternario (DST) e integra materiales de origen sedimentario y volcanoclásticos. Sobreyace a los derrames lávicos de edad Mioceno-Plioceno (Sosa, Monroy, et al. 1984), espesor máximo de 270 metros, sobreyace discordantemente a las calizas mesozoicas.

El depósito sedimentario Terciario-Cuaternario está conformado por un paquete de conglomerado no consolidado, tufas, tobas, secuencia de caliche, lodolitas con carbonato, horizontes arcillosos y areniscas volcanoclásticas con estratificación horizontal, cada horizonte se diferencian uno de otros debido a los cambios en el tamaño de sus partículas (conglomerítica a arcilloso-limoso), de consistencia variable (de muy suave, deleznable a dura) y color generalmente muy claros, en tonalidades de blanco, amarillo, beige y rosado (fig.2.4).

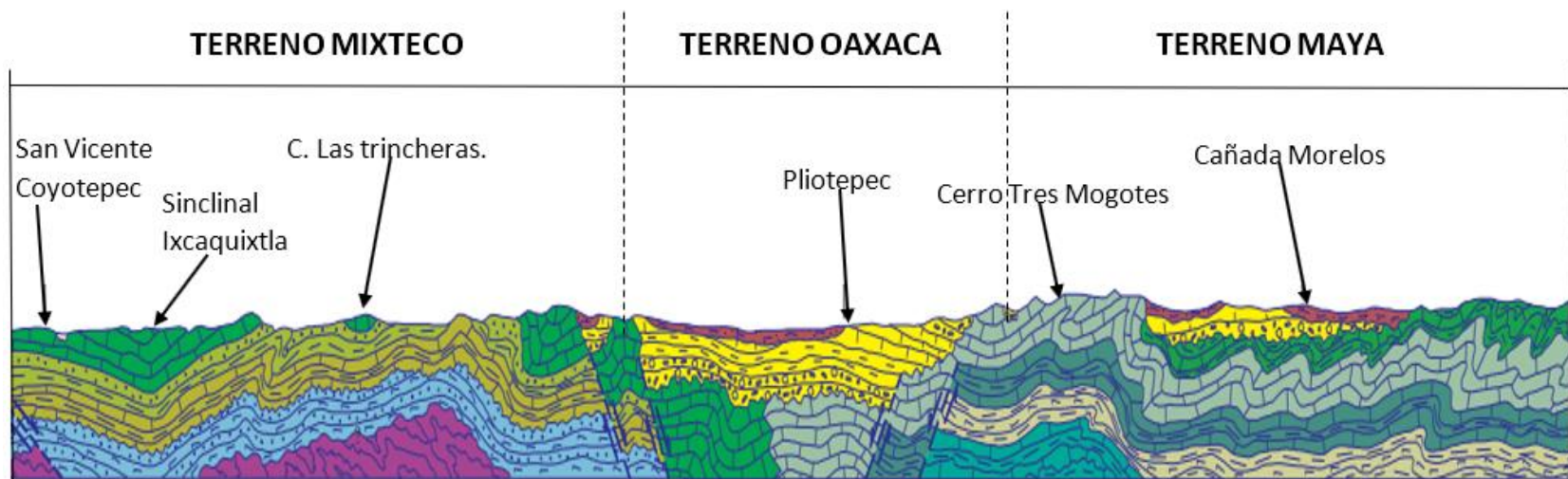


Figura 2.4 Terrenos Tectono-Estratigráficos.(Geológico-minera: Orizaba E14-6;SGM)

2.4. Geología Estructural.

Estructuras que bordean al macizo Mixteco-Oaxaqueño en su porción nororiental, se denomina el “Arco Estructural Tecamachalco-Tehuacán-Calipam cuya edad va del Jurásico Tardío al Neógeno.

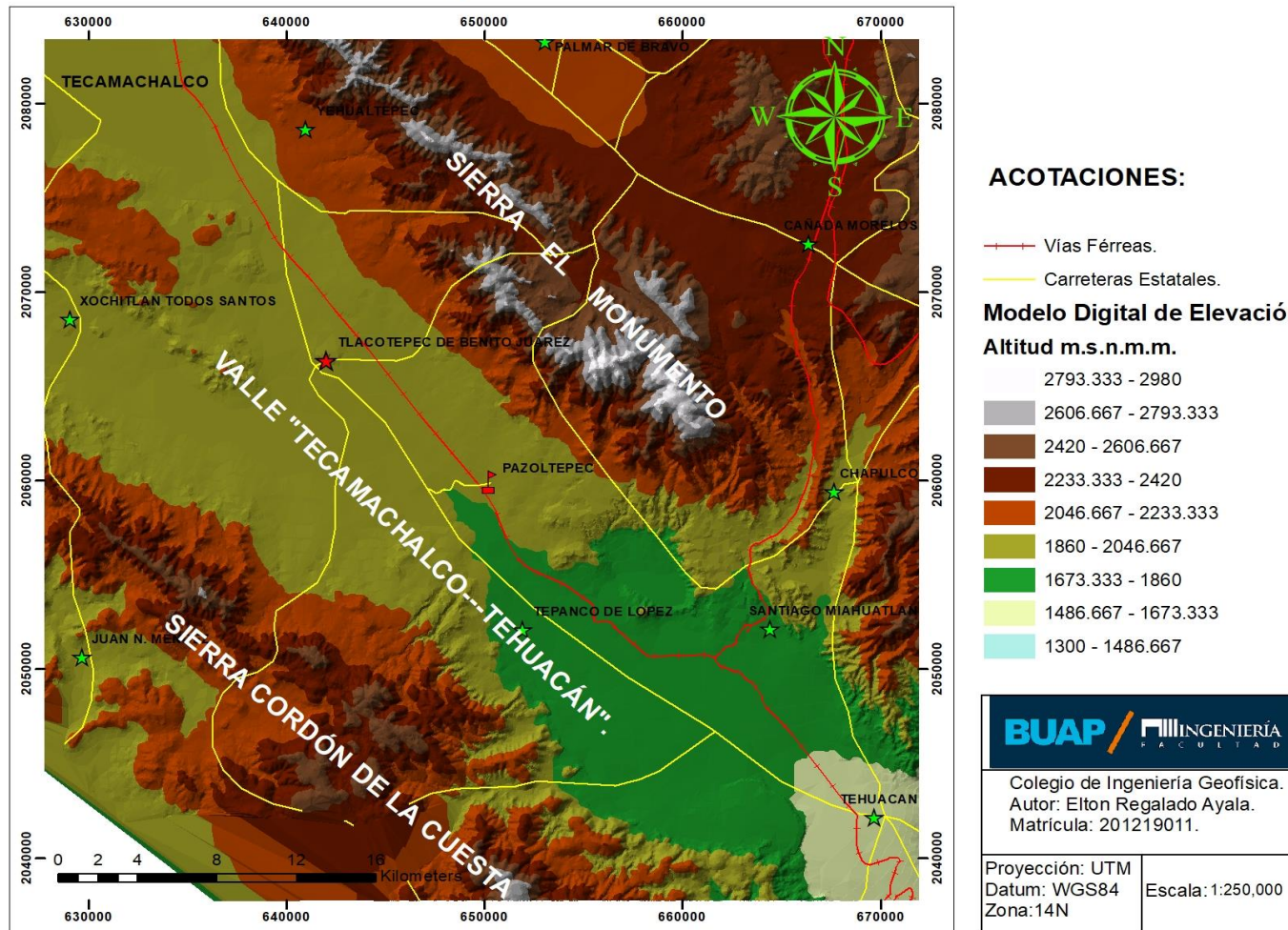
Sierra de Tecamachalco: Se orienta en dirección NW-SE. Es el límite norte-oriente del mapa 2.3. Se caracteriza por pendientes suaves en su porción occidental y más abruptas hacia el borde oriente, sus elevaciones varían entre 1050 y 2500 msnm. Está formada principalmente por rocas sedimentarias y volcánicas (Eguiza, et al 2001).

Valles intermontados de Esperanza: elevaciones promedio de los 2400 metros sobre el nivel del mar (msnm), al Oriente formado por el pico de Orizaba y la Sierra Cuesta Blanca dirección NE-SO, valle de Palmar de Bravo Palmar de Bravo 2200 msnm.

Sierra Cuesta Blanca: en dirección NE-SO y la Sierra Monumento al SE con dirección NE-SO, valle de Tecamachalco-Tlacotepec-Tehuacán 2000 msnm. Formado por la Sierra monumento al oriente y las sierras de Tetzoyocan NE-SO, Tentzo NO-SE (que conforman la sierra cordón de la cuesta y Tehuacán al Sur).

De forma general todas las rocas descritas con anterioridad se han agrupado genéricamente como rocas calcáreas del Cretácico; regionalmente se menciona la existencia de plegamientos calizos, así como la presencia de fenómenos kársticos en algunas localidades tales como las sierras Monumento y Tetzoyocan a las calizas arrecifales afectadas por el proceso de disolución de estructura irregular y las fracturas están rellenas por sedimentos finos.

Geología Estructural.



Mapa 2.5 Geología Estructural.

2.5 Marco Hidrográfico

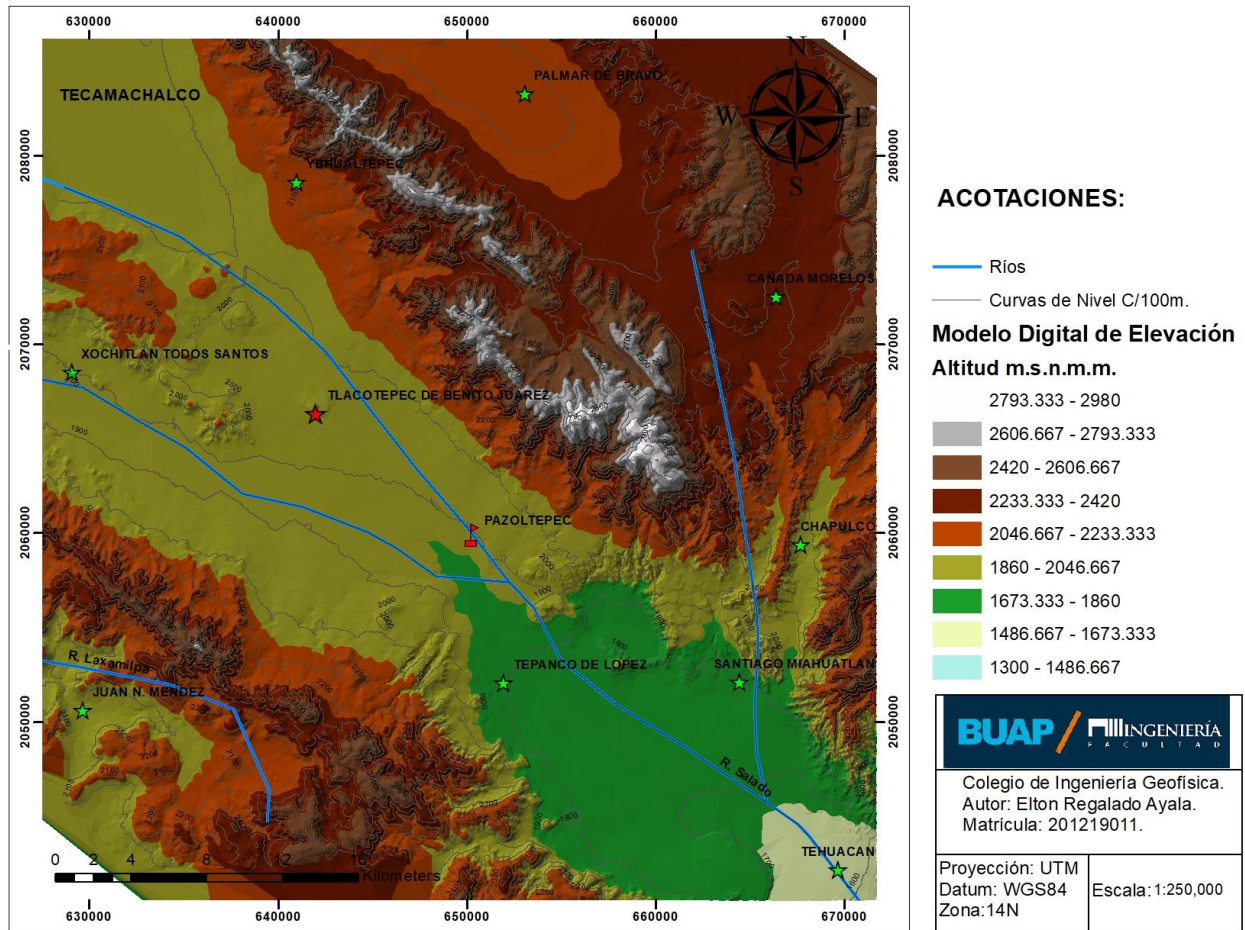
El acuífero del valle de Tecamachalco se localiza en la porción central del estado de Puebla, su extensión superficial es de 3,600 kilómetros cuadrados (km²). Colinda con: la sierra de Soltepec al noreste; por el volcán de La Malinche al norte; por la sierra de Zapotitlán al sur y suroeste y por la sierra del Tentzo al oeste cuenca del tipo exorreico, drenaje del tipo subdendrítico rectangular. (DOF, 2005).

Vértice	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	47	34.8	19	5	38.4	
2	97	37	26.4	19	3	43.2	
3	97	31	15.6	18	58	30.0	
4	97	17	13.2	19	0	46.8	
5	97	18	7.2	18	58	44.4	
6	97	17	52.8	18	54	43.2	
7	97	21	25.2	18	48	3.6	
8	97	23	42.0	18	39	3.6	
9	97	33	14.4	18	36	18.0	
10	97	39	43.2	18	31	30.0	
11	97	50	56.4	18	40	40.8	
12	97	57	10.8	18	49	58.8	
13	97	54	50.4	18	52	33.6	
14	97	55	19.2	18	53	38.4	
15	98	1	22.8	18	56	9.6	
16	98	1	4.8	19	13	33.6	Del 16 al 17 por el límite estatal
17	97	55	37.2	19	9	54.0	
1	97	47	34.8	19	5	38.4	

Tabla 2.1 Delimitación poligonal del acuífero de Tecamachalco. Tomado de DOF. México. (2005).

En esta zona se encuentran 29 municipios contenidos de manera total o parcial del cual en Tlacotepec de Benito Juárez se localiza el área de interés.

Mapa Hidrológico.



Mapa 2.6 Hidrología, principales ríos del área de estudio. (Modificado de: conabio.gob.mx)

2.5.1. Hidrogeología

El Diario Oficial de la Federación (2005) determina que el acuífero Valle de Tecamachalco está conformado por rocas calcáreas y está constituido por depósitos cuaternarios no consolidados, de grano medio a grueso.

En las zonas de Palmar de Bravo y Esperanza lo conforman materiales detríticos granulares, así como arenas tobáceas, coronadas por los depósitos cuaternarios de pie de monte, fluviales y aluviales.

Se encuentra limitado lateral e inferiormente por rocas sedimentarias de plataforma. Calizas arrecifales de las Formaciones Orizaba, constituyen la parte inferior del acuífero regional, aun cuando parte de la zona está separada por el relleno de calizas arcillosas, areniscas y lutitas de baja permeabilidad, que actúan como un gran acuitardo discontinuo.

La profundidad de los niveles estáticos en la zona de Esperanza oscila entre los 10 hasta un poco más de 90 metros; los niveles más someros se localizan al sur de la población de Tepeaca, en tanto las más profundas se han identificado en las inmediaciones del cerro Tlacomilco al este de Apango de Zaragoza.

En el valle de Palmar de Bravo la distribución de la profundidad del nivel estático varía de 20 metros en el área central del valle y los más profundos se encuentran dentro del rango de 50 a 60 metros.

Datos del año 1996 correspondientes a la zona Tepeaca-Tecamachalco, el promedio del nivel estático con base a 163 pozos que disponían de dato fue de 47.1 m y un nivel dinámico promedio de 58 m pertenecientes a 249 pozos.

El promedio del caudal instantáneo, obtenido a través de 153 pozos fue de 23 litros por segundo (lps) y el caudal específico del acuífero explotado es del orden de 2 lps/m.

Del último censo disponible, considerado en el modelo del año de 1999, se obtiene que el acuífero es explotado a través de 937 pozos activos, de los cuales sólo 310 cuentan con datos de profundidad total con un promedio de 110 metros.

Existen 138 aprovechamientos con profundidades mayores a 100 metros y con un promedio total de perforación del orden de 140 metros; el diámetro promedio de ademe en 102 pozos que cuentan varía de 10 a 46 centímetros con promedio de 35.6 centímetros.

En cuanto al promedio de gastos instantáneos, reportados en el censo para 150 pozos, es de 23 lps.

Los valores promedio de los niveles de agua para el período 1997-2002 considerando 33 pozos piloto, de acuerdo con la información de lecturas de niveles estáticos realizado en el año de 1997, el promedio del nivel estático fue de 47.9 metros; para el año 2000 el promedio fue de 49 metros y para el año 2002 el valor promedio del nivel estático es de 50.0 metros obtenido en los mismos pozos piloto.

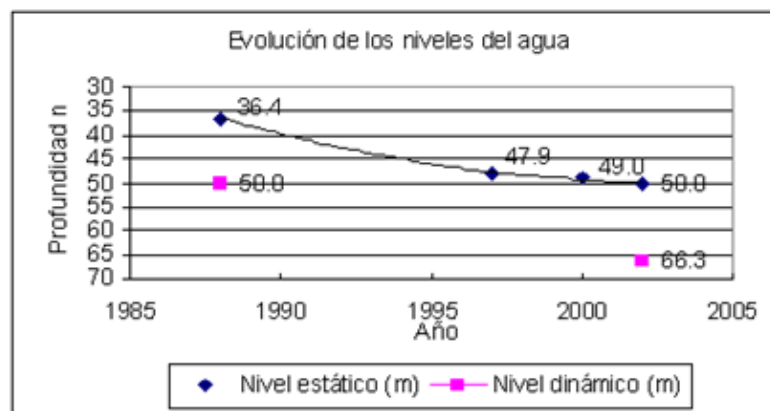


Figura 2.5 Evolución de los niveles piezométricos (DOF, 2005).

Las recargas naturales que alimentan al acuífero provienen principalmente de agua de lluvia que se presenta en toda el área de estudio, a través de infiltración vertical.

La lluvia se infiltra en las partes altas del área, se adiciona como flujos subterráneos horizontales que se presentan principalmente en las zonas norte, oeste del Valle de Tecamachalco y de la Sierra Monumento.

Otro componente importante de la recarga al acuífero la constituye la originada por la infiltración de agua utilizada en los sistemas y áreas de riego. Las recargas inducidas por el uso del agua de riego comprenden las provenientes de agua subterránea y por las aguas superficiales provenientes del Distrito de Riego que son almacenadas y controladas a través de la Presa Manuel Ávila Camacho.

El acuífero Valle de Tecamachalco también es alimentado por la precipitación por flujos subterráneos horizontales que en parte tienen su origen en el agua de lluvia que se infiltra en las partes altas de la zona de estudio y posiblemente por agua subterránea que se "fuga" por la parte sur del acuífero denominado "Oriental" a través de la sierra de Soltepec.

En la región cubierta por el acuífero Valle de Tecamachalco, no existen ríos de importancia que alimenten al acuífero o viceversa, es decir no hay flujos base de importancia en la región, asimismo no existen efectos de la evapotranspiración sobre el acuífero en la zona de estudio, debido a las profundidades de los niveles estáticos.

Capítulo III

3. Marco Teórico.

3.1. Teoría Básica de la Prospección Eléctrica.

La prospección eléctrica estudia la distribución de la resistividad en el subsuelo; la resistividad está relacionada directamente con la composición mineralógica de la roca, el contenido de fluidos, la porosidad y el grado de saturación de los fluidos en la roca. La técnica de prospección eléctrica ha proporcionado información de gran utilidad durante muchos años para diversas áreas de investigación, como son la hidrogeología, minería, geotecnia y estudios ambientales (Loke, 2004).

Los métodos eléctricos investigan potenciales eléctricos naturales y propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales como son: conductividad, permeabilidad y permitividad.

El método de resistividad es un método de campo artificial (con la excepción de algunas modalidades). En este método es el propio explorador quien crea el campo físico que va a explorar lo cual permite diseñar las características más adecuadas para el fin propuesto. (De Jesús, 2016)

Consiste en introducir una corriente eléctrica continua en el terreno por un par de electrodos y posteriormente medir la diferencia de potencial entre otro par de electrodos. La relación de estas dos magnitudes (corriente y diferencia de potencial) es lo que se conoce como resistividad. Este método se aplica a la detección de reservas geotérmicas, localización de restos arqueológicos, exploración de agua subterránea, exploración minera y petrolera. (Anaya, 2010)

Destaca el bajo precio de los equipos empleados y su fácil implementación, si bien requiere de un procedimiento extra, el desplazamiento de los electrodos y cables para evitar la caída de potencial el cual nos permite obtener mejores datos.

En la figura 3.1 se muestran las aplicaciones de la prospección eléctrica:

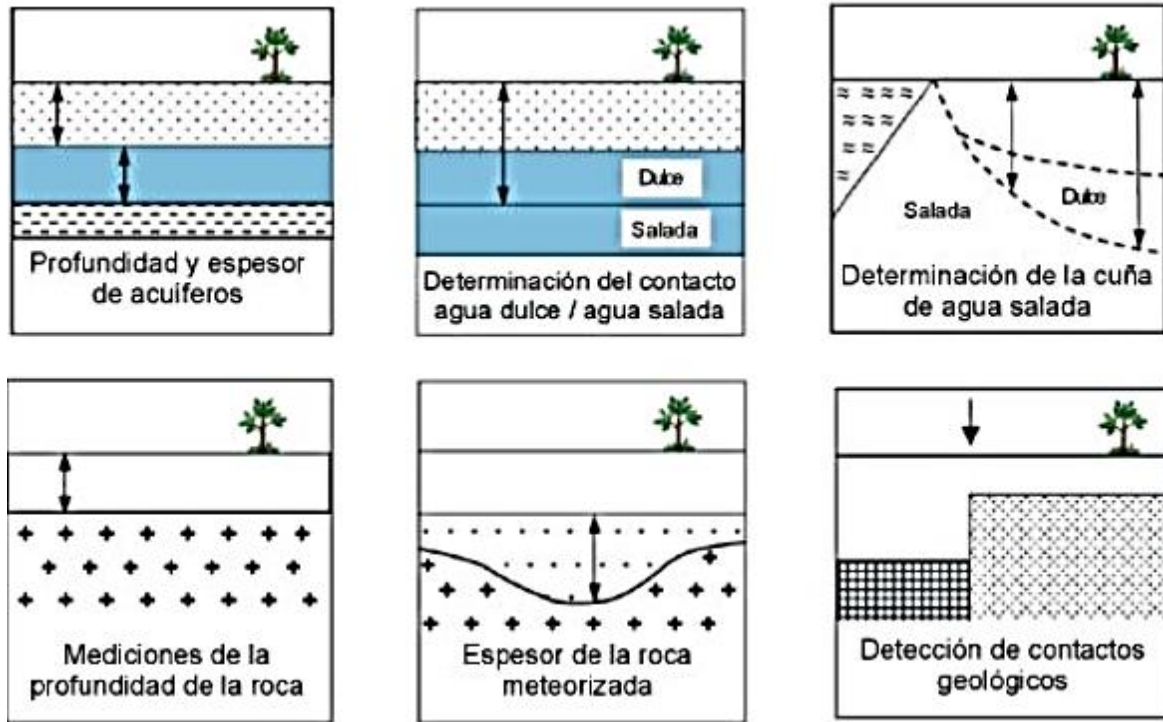


Figura 3.1 Aplicaciones de la prospección eléctrica. Tomado de: (IRIS Instruments,2006)

Se le dice campo eléctrico, E , a la carga positiva o negativa que atrae a cargas de signo contrario o repele a cargas de su mismo signo.

La fuerza con la cual un E atrae o repele una carga se le conoce como intensidad de campo.

El trabajo, W , que realiza un campo para repeler una carga de 1 C hasta el infinito se le llama potencial, V .

La diferencia de potencial entre dos puntos de E , es el trabajo, W , que se realiza para mover una carga de 1 C del punto A al punto B.

El método de resistividad considera un cuerpo semi-infinito con una resistividad uniforme, en donde se colocan cuatro electrodos, dos de corriente (A y B) y dos de potencial (M y N). El gradiente de potencial es medido por un voltímetro o potenciómetro.

Este método es una aplicación práctica de la Ley de Ohm.

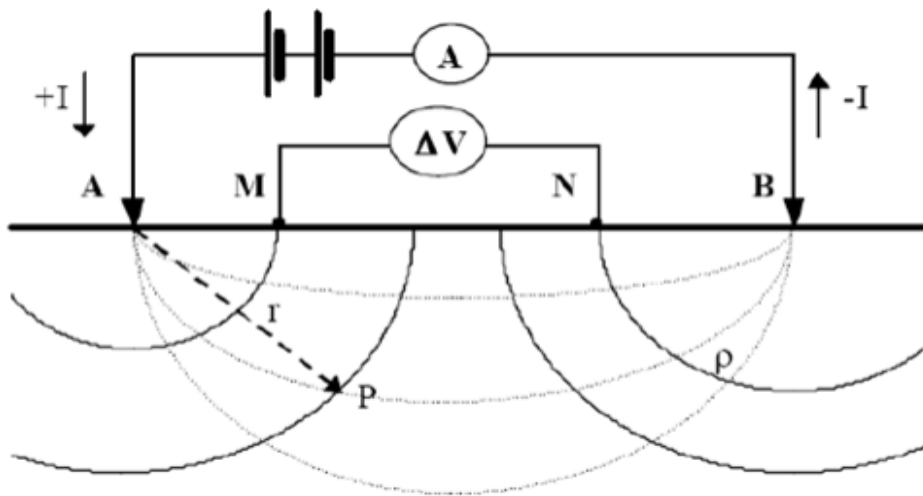


Figura 3.2 El principio de medición de la resistividad del suelo; se inyecta una corriente I entre el par de electrodos AB y se mide la diferencia de potencial ΔV entre el par de electrodos MN. Tomada de Orellana, 1974.

3.1.1. Ecuaciones Generales

Para comenzar se definirán algunos conceptos de magnitudes físicas de relevancia en la prospección eléctrica. La resistencia eléctrica se define como la medida de la oposición que ejerce un material al paso de la corriente y su unidad de medida es el *Ohm* (Ω). La resistencia de un cuerpo conductor se expresa como:

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots (1)$$

Donde L (m) y A (m^2) representan la longitud y la sección transversal del cuerpo conductor respectivamente. La magnitud ρ es un coeficiente que depende de la naturaleza del cuerpo considerado y recibe el nombre de resistividad (Orellana, 1974), sus unidades son Ωm .

En la prospección eléctrica este parámetro es el de principal interés, ya que define mejor las características del subsuelo en comparación a la resistencia, ya que el valor de esta última depende de las características geométricas del cuerpo estudiado.

Se asume que el subsuelo está compuesto por varias capas, cada una de ellas posee una resistividad constante y se encuentran limitadas entre sí por superficies perfectamente planas. Para simplificar aún más el problema, éste será resuelto para el caso simple de un semi-espacio homogéneo de resistividad, ρ , (Orellana, 1974).

En la prospección eléctrica se dispone de al menos un electrodo de corriente, mediante el cual se aplica una intensidad de corriente eléctrica I que generará un campo eléctrico. Por lo general se utilizan dos electrodos de corriente, uno positivo y otro negativo, por el primero de ellos una intensidad de corriente penetrará el subsuelo y saldrá por el electrodo negativo.

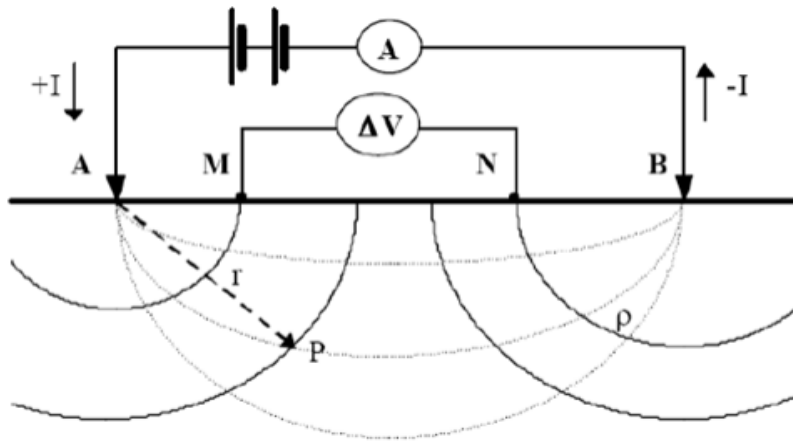


Figura 3.2 El principio de medición de la resistividad del suelo; se inyecta una corriente I entre el par de electrodos AB y se mide la diferencia de potencial ΔV entre el par de electrodos MN. Tomada de Orellana, 1974.

Las leyes que describen cualquier fenómeno electromagnético son las ecuaciones de Maxwell. Para este caso de estudio sólo se tratarán la Ley de Gauss Eléctrica (2) y la Ley de Faraday (3).

$$I = \iint J \cdot ds \dots (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = - \frac{\partial \mathbf{B}(t)}{\partial t} \dots (3)$$

La ecuación 2 relaciona el flujo de corriente, J , que pasa a través de cualquier superficie con el total de la carga encerrada en esa superficie (I) (Fleisch, 2008). Por lo pronto se tomará en cuenta sólo la ecuación 3, y la 2 se retomará más adelante.

La ecuación 3 establece que un campo eléctrico, E , rotacional es producido por un campo magnético, B , que varía con respecto al tiempo (Fleisch, 2008).

Dado que el campo eléctrico, E , generado se considera estacionario (no existe campo magnético, B), la derivada temporal de la ecuación 3 es igual a cero.

$$\nabla \times E(\mathbf{r}) = \mathbf{0} \dots (4)$$

De acuerdo con la ecuación 4, el campo eléctrico, E , se le considera como conservativo o irrotacional, por lo que deriva de un potencial escalar y esto puede ser representado como

$$E = -\nabla\phi \dots (5)$$

La ley física que gobierna el flujo de corriente a través del subsuelo es la Ley de Ohm establece que la corriente eléctrica que se transmite entre dos puntos de un circuito eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre estos dos puntos y también a la resistencia eléctrica del material.

En geofísica, el circuito con el que se trata es el subsuelo y la resistencia eléctrica medida proviene de la roca y demás fluidos contenidos en ella. Esta Ley se representa de la siguiente forma:

$$J = \frac{E}{\rho} \dots (6)$$

Donde E es el campo de intensidad de eléctrica, ρ es la resistividad del medio y j es el vector de densidad de corriente eléctrica.

Ahora, el teorema de la divergencia establece que el flujo de corriente que entra por un material debe ser igual al flujo de corriente que sale del mismo, excepto si existe alguna discontinuidad en el material. La divergencia del vector de densidad de corriente es cero en cualquier lugar excepto en la fuente (electrodos), y se representa mediante la siguiente ecuación (Keller & Frischknecht, 1966).

$$\nabla \cdot J = \mathbf{0} \dots (7)$$

Al combinar las ecuaciones 7 con la 6 se obtiene la siguiente expresión:

$$\nabla J = \nabla \cdot \frac{E}{\rho} \dots (8)$$

Eso es igual que:

$$\nabla \cdot \frac{E}{\rho} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \frac{1}{\rho} \dots (9)$$

Sustituyendo la ecuación 5 en la 9, y siguiendo las propiedades del cálculo vectorial se obtiene:

$$\frac{1}{\rho} \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \frac{1}{\rho} = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \nabla \phi + E \cdot \nabla \frac{1}{\rho} = -\frac{1}{\rho} \nabla^2 \phi + E \cdot \nabla \frac{1}{\rho} = 0 \dots (10)$$

Valiéndose del supuesto establecido en un principio, de que la resistividad ρ es constante dentro de cada zona, se obtiene:

$$\nabla^2 \phi = 0 \dots (11)$$

La ecuación 11 es conocida como la ecuación de Laplace.

En coordenadas esféricas esta ecuación representada como:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \psi^2} = 0 \dots (12)$$

Cuando se tiene un semi-espacio homogéneo con una fuente puntual en superficie (electrodo), la corriente fluye radialmente desde la fuente y el potencial varía inversamente con respecto a la distancia de éste (Loke, 2004).

En la figura 3.4 se aprecia como las superficies equipotenciales tienen la forma de semiesferas y el flujo de corriente es perpendicular a la superficie equipotencial. Entonces, para este caso se asume que hay una completa simetría del flujo de corriente con respecto a las direcciones θ y ψ (Keller y Frischknecht, 1966), por lo tanto, las derivadas que contienen estos términos se eliminan de la ecuación 12, quedando simplemente la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = 0 \dots (13)$$

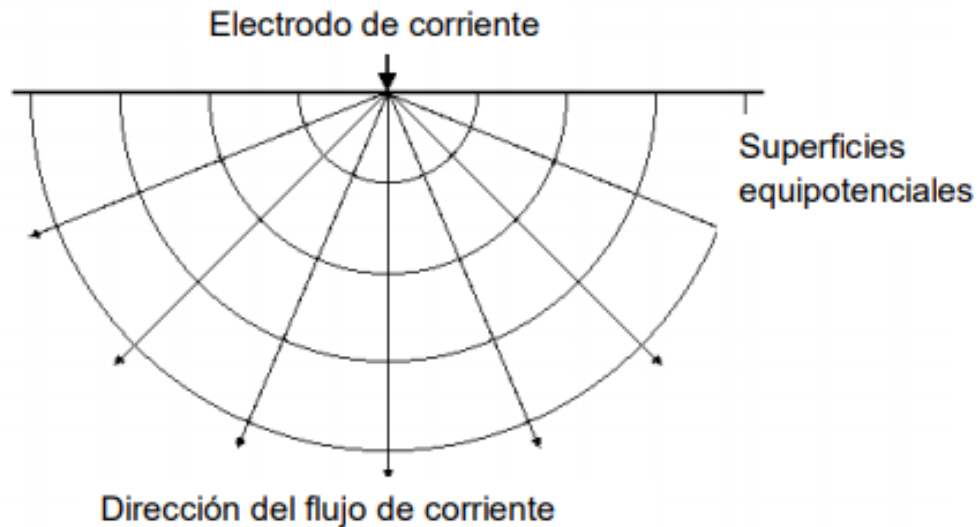


Figura 3.3 Flujo de corriente eléctrica generada a través de un electrodo y la distribución del potencial que ocasiona (Tomada de Loke, 2004).

Integrando la ecuación 13 se obtiene:

$$\int \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} + C = 0 \dots (14)$$

Despejando $\partial \phi$

$$\partial \phi = \frac{C}{r^2} \partial r \dots (15)$$

Integrando nuevamente se obtiene:

$$\phi = -\frac{C}{r} + D \dots (16)$$

Considerando que el potencial es cero cuando éste se encuentra a una gran distancia de la fuente, la constante de integración D se convierte en cero automáticamente, quedando:

$$\phi = -\frac{C}{r} \dots (17)$$

Obteniendo el gradiente de esta función resulta la ecuación:

$$\nabla \phi = -\frac{C}{r^2} = E \dots (18)$$

Ahora se retoma la ecuación 2 y con ayuda de la ecuación 18 se evalúa la integral:

$$I = \iiint \mathbf{j} \cdot d\mathbf{s} = \iiint \frac{\mathbf{E}}{\rho} d\mathbf{s} = \iiint \frac{-\nabla \phi}{\rho} d\mathbf{s} = \iiint \frac{C}{\rho r^2} d\mathbf{s} = \iiint \frac{2\pi C}{\rho} \dots (19)$$

El resultado de la ecuación 19, representa entonces el valor total de la corriente inyectada al subsuelo durante un estudio de prospección eléctrica. Despejando ésta se puede conocer el valor de la constante C y sustituyendo en la ecuación número 17 se obtiene el valor de la función potencial.

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \dots (20)$$

3.1.2. Factor geométrico

En la práctica, todos los estudios eléctricos utilizan como fuente al menos dos electrodos de corriente, uno positivo (A) y el otro negativo (B). La diferencia de potencial generada en el medio por dicho par de electrodos está dada por:

$$\Delta\phi = \nabla V = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{B} \right) \dots (21)$$

Los arreglos más comunes para trabajar en campo poseen cuatro electrodos, de los cuales dos funcionan como fuente emisora de corriente y los otros dos sirven para medir la diferencia de potencial entre dos puntos. Dicho esto, la diferencia de potencial para este tipo de arreglos está dada por:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \dots (22)$$

Entonces, a partir de los valores de corriente I y de la diferencia de potencial ΔV se puede calcular un valor de resistividad aparente " ρ_a ". Definimos a la resistividad aparente en un semi-espacio homogéneo con heterogeneidades donde las lecturas cambiaran de una posición a otra obteniendo una ρ diferente a la del semi-espacio homogéneo.

La resistividad aparente no es el promedio de los valores de ρ obtenidos del subsuelo, sino el valor de medición individual que se asocia al punto inmediatamente debajo del centro del arreglo de electrodos y es función del espaciamiento de los electrodos y de la distribución real de la ρ .

Es decir, la resistividad de un terreno imaginario, homogéneo e isótropo, equivalente al terreno real heterogéneo.

Así que de la expresión 23 se tiene que

$$\rho a = 2\pi k \frac{\Delta V}{I} \dots (23)$$

De manera simplificada

$$\rho a = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \dots (24)$$

Donde $k = \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right)^{-1} \dots (25)$

Tomado de Orellana, E. (Madrid, 1982)

La ecuación 25 representa el factor geométrico utilizado para el cálculo de la resistividad aparente. El factor geométrico dependerá del tipo de arreglo o configuración eléctrica que se esté aplicando.

3.1.3. Sondeo eléctrico vertical

El método del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) consiste en estudiar las variaciones de la resistividad eléctrica del subsuelo con respecto a la profundidad desde un punto fijo en superficie.

En un SEV el punto central del arreglo electródico (punto de atribución) permanece fijo, pero el espaciado entre electrodos (AB-MN) incrementa. Al aumentar continuamente estos espacios se obtiene información de zonas más profundas del subsuelo (Fig.3.4).

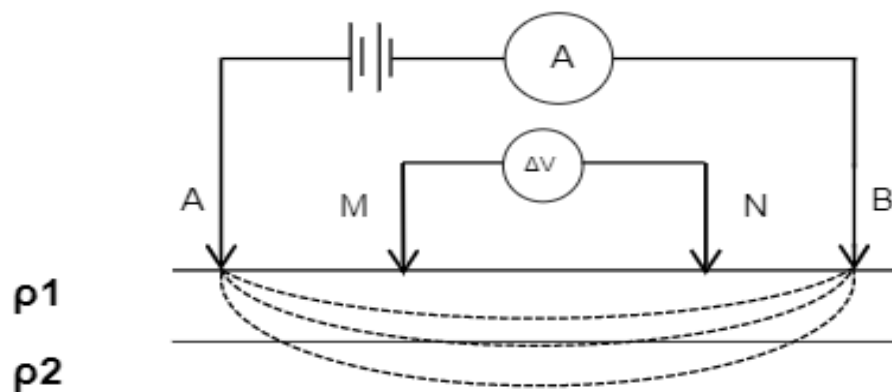


Figura 3.4 Arreglo general de los SEV .Electrodos de corriente (AB), electrodos de potencial (MN).

Los valores de resistividad aparente obtenidos en campo se grafican en una hoja bilogarítmica, donde en el eje horizontal se coloca la separación entre un electrodo de potencial y el de corriente más cercano, mientras que en el eje vertical se coloca el valor de resistividad aparente, de esta manera se dibuja una curva de resistividad aparente.

Para la interpretación de datos se asume que el subsuelo está conformado por capas horizontales y homogéneas. Así pues, sólo existen variaciones verticales y no laterales. Es por ello por lo que al SEV se le considera un método de estudio 1D.

Existen dos formas de interpretar estos datos, una es de manera manual utilizando curvas maestras (Orellana, E. y Mooney, H. M., 1966.) y la otra utilizando software de inversión como ejemplo IPI2WIN. Mediante los dos procedimientos se determina un cierto número de capas con un determinado espesor y un valor de resistividad.

El número de capas que se obtengan depende del número de cambios de pendiente observados en la gráfica de la curva de resistividad aparente, así que es una cuestión totalmente cualitativa.

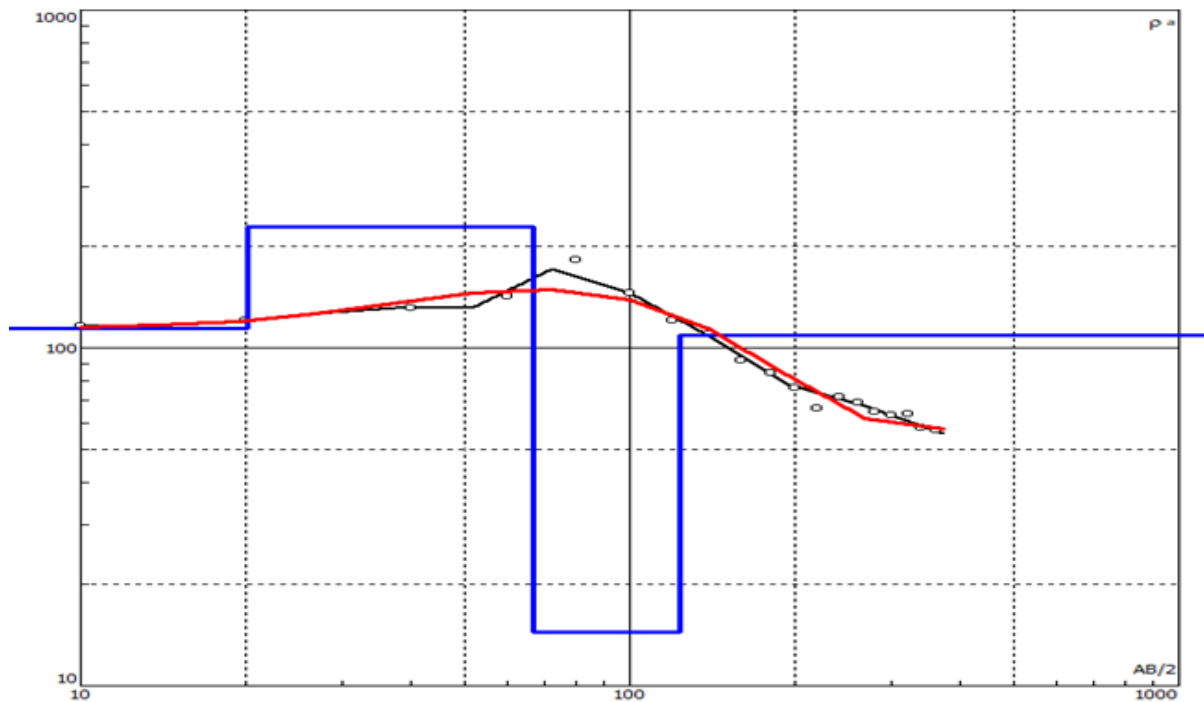


Figura 3.5 Ejemplo de curva de resistividad aparente graficada en una hoja bilogarítmica, software IPI2WIN. La curva negra representa la curva de resistividad aparente, la curva roja representa la curva calculada y las líneas azules representan los espesores de las capas calculadas.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos de corriente AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad, pero su densidad disminuye.

Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad $AB/2$ y el 70.6% por encima de una profundidad AB (Orellana, 1982).

La mayor eficacia del método corresponde cuando los sondeos se efectúan sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitada por planos paralelos a la superficie del terreno, medio estratificado. Es válida para estratos inclinados hasta unos 30° .

La profundidad de investigación de diversos dispositivos eléctricos en un suelo homogéneo, siendo para el dispositivo polo-polo de $0,35L$, para Schlumberger de $0,125 L$ y para Wenner de $0,11L$. Barker (1989). La profundidad de investigación efectiva para el dispositivo Schlumberger es $0,19L$ es decir ligeramente mayores que utilizando la definición de profundidad de investigación característica (Roy & Apparao, 1971).

El SEV es aplicable cuando el objetivo tiene una posición horizontal y una extensión mayor que su profundidad. Tal es el caso del estudio de capas tectónicas, búsqueda de agua subterránea, infiltración de agua marina en zonas costeras, estratificación y todo tipo de situaciones geológicas (fallas, diques, cavernas y discordancias) donde el modelo 1D se aproxime al modelo verdadero. (E. Anaya, 2010).

La magnitud de los espesores y las resistividades de cada medio estratificado recibe el nombre de corte geoelectrico; compuesto por n -capas, se necesita para su especificación el conocimiento de n -resistividades y $n-1$ espesores (debido a que en la última capa se toma como un espesor infinito).

Los cortes geoelectricos pueden clasificarse de acuerdo con el número de capas que lo componen. Los cortes de dos capas, en los cuales solo existen dos tipos de resistividades ($p_1 > p_2$ y $p_1 < p_2$).

Para los cortes geoelectricos de tres capas los podemos representar mediante las siglas H, K, Q y A y su configuración de resistividades se explican a continuación:

En la figura 3.6 se aprecian cortes de dos capas las únicas posibilidades son: $\rho_2 > \rho_1$ y $\rho_2 < \rho_1$.

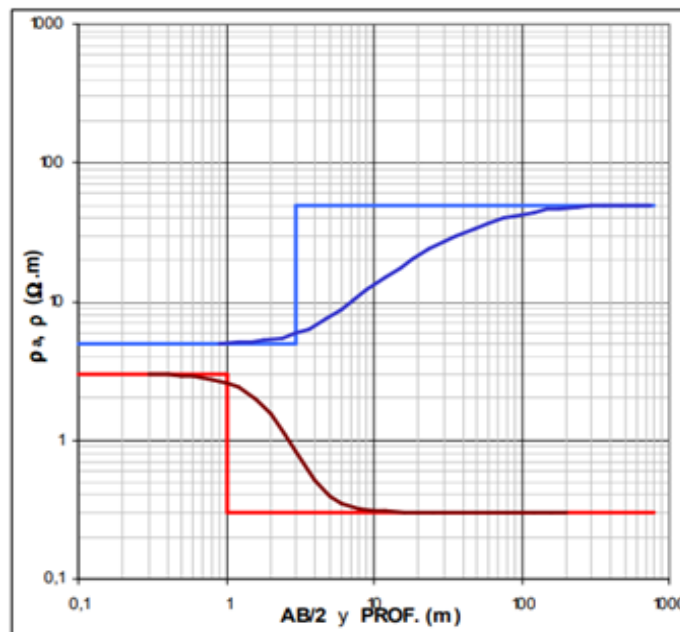


Figura 3.6 Cortes de dos capas $\rho_2 > \rho_1$ (azul) y $\rho_2 < \rho_1$ (rojo).

Los cortes de tres capas suelen designarse, en función de sus relaciones de resistividad.

Tipo de corte	Configuración de resistividades
Tipo H	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$
Tipo K	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$
Tipo Q	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$
Tipo A	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

Tabla.3.1 Configuración de resistividades para los distintos cortes geoelectrónicos de tres capas (Orellana y Mooney para el dispositivo Schlumberger, 1966).

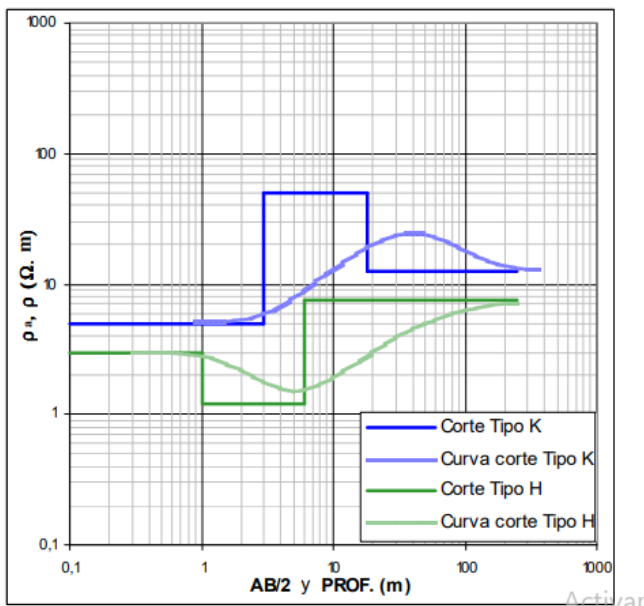


Figura 3.7 Corte de tres capas K y H.

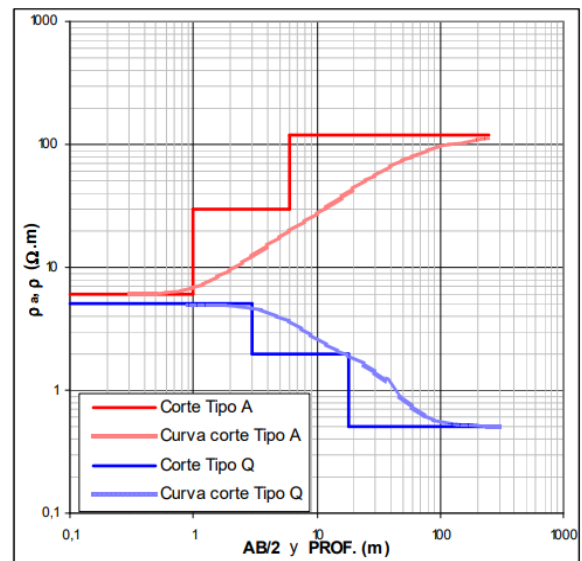


Figura 3.8 Corte de tres capa tipo A y Q.

Los cortes de cuatro capas pueden designarse con base en la nomenclatura anterior, según los ejemplos siguientes:

Tipo de corte	Configuración de resistividades
Tipo KQ (rojo)	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$
Tipo HK (verde)	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$
Tipo KH (azul)	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$
Tipo HA (negro)	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$

Tabla.3.2 Configuración de resistividades para los distintos cortes geoelectricos de cuatro capas (Orellana y Mooney para el dispositivo Schlumberger, 1966).

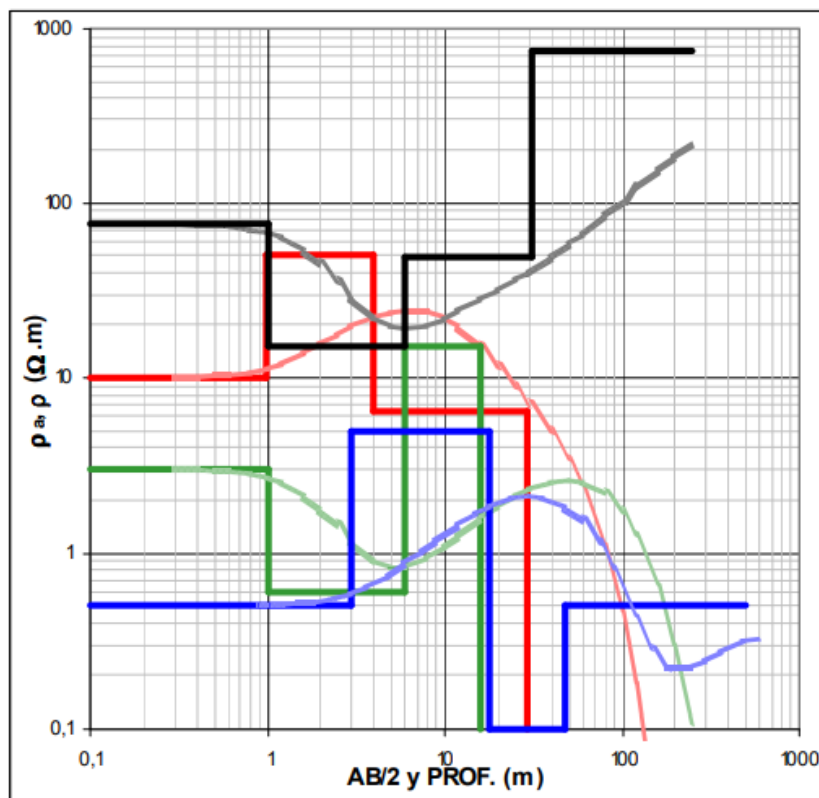


Figura 3.9 Cortes de cuatro capas.

3.1.4. Arreglo electródico Schlumberger

El arreglo electródico Schlumberger es considerado el más eficaz y usado, la idea que supone es la distancia de separación "a" entre MN tienda a cero. (Orellana, 1966). Se considera que $AMNB \gg MN$, el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectoros A y B dejando los electrodos detectores M y N fijos en torno a un punto central fijo llamado punto de atribución.

En las mediciones de campo debe cumplir la condición de que la distancia que separa AB debe ser mayor o igual a $5MN$. Cada vez que los electrodos M y N se reposicionan se comienza a abrir progresivamente A y B, pero siempre repitiendo un par de puntos comunes en cada $AB/2$; cuando M y N se reposicionan, a este movimiento de electrodos se le conoce como "empalme", de esta manera se intensifica la señal transmitida y se puede obtener un valor de resistividad con menor rango de error.

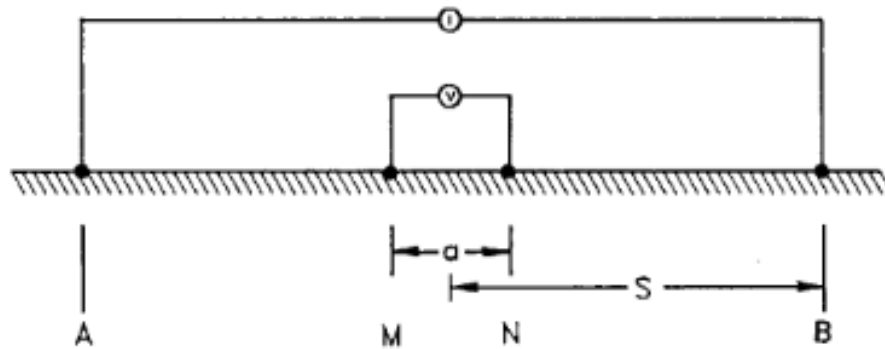


Figura 3.10 Dispositivo Schlumberger. Separación electródica "a",
 $S=AB/2$ (Dobrin, M.B. & Savit, C.H., 1988).

La configuración Schlumberger se define de la siguiente manera:

Se trata de una disposición de los electrodos de la forma AMNB, donde la distancia entre los electrodos de potencial MN es mucho menor a la distancia entre los electrodos de corriente AB. En la práctica $AB > 5MN$ (Orellana, 1982)

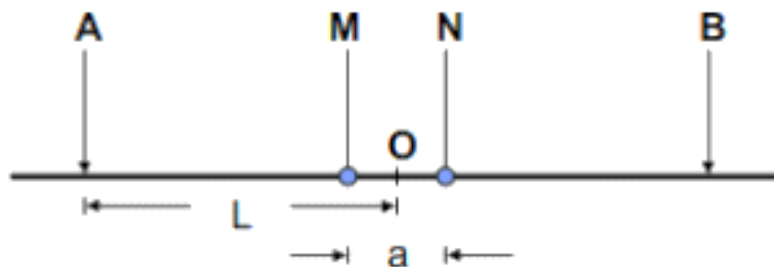


Figura 3.11 Dispositivo Schlumberger, (Modificado de Orellana, 1982)

Si llamamos L a la distancia $OA = OB$, la expresión (25) se podrá representar de la siguiente manera:

Los valores de resistividad aparente se representan en función de $AB/2$ y la constante geométrica k , recordando que la ecuación de resistividad aparente:

$$\rho_a = 2\pi a k \frac{\Delta V}{I} \dots (24)$$

Donde para el Dispositivo Schlumberger $k = \frac{\pi L^2}{a}$

Las ecuaciones antes descritas están desarrolladas para medios homogéneos. Al realizar mediciones en el subsuelo, exploramos sobre diversas heterogeneidades y obtenemos la resistividad aparente. Se le denomina resistividad aparente a las resistividades de diversos materiales que dependen de la distribución espacial de los materiales, dimensiones y del tipo de dispositivo utilizado.

La profundidad de investigación es controlada por la longitud del arreglo utilizado (separación entre los electrodos de corriente), entre mayor sea la separación electródica AB mayor será la profundidad de investigación de la corriente inyectada.

En términos de la distancia L es la distancia OA=OB el factor geométrico del dispositivo Schlumberger queda de la siguiente manera:

$$k = \frac{\pi \left(L^2 - \left(\frac{a^2}{4} \right) \right)}{a} \dots (25)$$

De modo que el cálculo de la resistividad aparente queda de la siguiente forma:

$$\rho_a = \frac{\pi \left(L^2 - \left(\frac{a^2}{4} \right) \right)}{a} \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \dots (26)$$

Donde:

L: Distancia OA=OB

a: Espaciamiento de los electrodos potenciales M y N, usualmente “a” es pequeño.

ΔV : Diferencia de potencial.

I: Corriente inducida en el subsuelo.

La idea de Schlumberger es hacer que la distancia “a” que separa los electrodos N y M tienda a cero. Entonces sintetizando la ecuación (26), se aplica el límite a la función cuando tiende a cero debido a que ΔV decrece al mismo tiempo que “a” tendremos que:

$$\rho_a = \lim_{a \rightarrow 0} \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta V}{Ia} = \pi L^2 \frac{1}{I} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{a} = \pi L^2 \frac{E}{I} \dots (27)$$

En las observaciones de campo se puede utilizar aparte de la ecuación 26.

$$\rho_a = \pi L^2 \frac{\Delta V}{Ia} \dots (28)$$

La ventaja de Schlumberger es por su error relativo proviene de despreciar el término $\frac{a^2}{4}$ de la ecuación 26.

$$\eta \leq \frac{L^2 - \left(L^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{L^2} = \left(\frac{a}{2L}\right) = 4\% \dots (29)$$

Para $MN=AB/5$, de acuerdo con Orellana, Madrid, 2a Ed., 1982.

3.2 Resistividad de las rocas

Los valores de resistividad de las rocas dependen fundamentalmente de las características de las soluciones acuosas y el tipo de porosidad, y grado de interconexión entre poros. La resistividad de minerales, rocas comunes, químicos, aguas, materiales de suelo y contaminantes varían entre $10^{-8} \Omega \cdot m$ y de $10^{15} \Omega \cdot m$ (Keller & Frischknecht, 1966; Daniels & Albery, 1966; Orellana 1982). La figura 3.12 muestra rangos la resistividad de diferentes materiales.

Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen valores altos de resistividad, depende mucho del grado de fracturación que poseen, y el porcentaje de agua que rellena las fracturas. Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad (Telford *et al*, 1990)

La propagación de la corriente eléctrica en los materiales terrestres se produce por medio de tres fenómenos principales:

1. La conducción dieléctrica que ocurre a través de materiales poco conductivos o aislantes.
2. La conducción electrónica a través de materiales con electrones libres.
3. La conducción electrolítica movimiento de iones presentes en los espacios intersticiales del terreno, este es el modo de propagación más importante y en el que se basa el método de resistividad.

Para la exploración de aguas subterráneas, la conducción electrolítica es probablemente el mecanismo más común cuando existen minerales conductivos, tales como los sulfuros metálicos y el mineral de grafito utilizados en la exploración minera. (López, A. 2004).

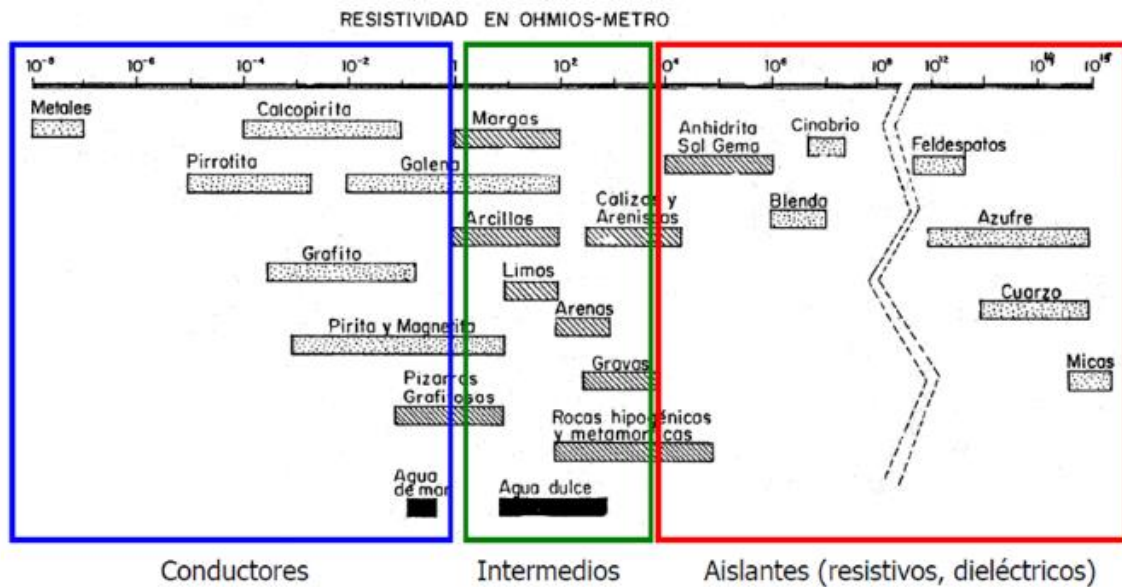


Figura 3.12 Rangos de variación de las resistividades más comunes de algunas rocas y minerales (N, Lozada;2017).

La resistividad de los minerales es muy alta en comparación con la resistividad de las rocas que los contienen, debido a la influencia de la porosidad, la permeabilidad, humedad y la resistividad de los fluidos que rellenan los poros de la roca; los cuales aumentan la conductividad y disminuyen la resistividad.

La tabla 3.3 muestra de ejemplo, en donde los rangos de valores comparativos de la resistividad de los minerales de cuarzo y calcita, y de rocas que los contienen: arenas y calizas respectivamente.

El cuarzo tiene un rango de resistividad entre $10^{12} \Omega \cdot m$ y $10^{14} \Omega \cdot m$, las arenas están compuestas de cuarzo y su rango de resistividad puede variar de $5 \Omega \cdot m$ a $103 \Omega \cdot m$, dependiendo de la resistividad del agua que la satura.

Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen valores grandes de resistividad. La resistividad de estas rocas es altamente dependiente del grado y el porcentaje de fracturas rellenas con agua subterránea. De esta manera una roca de este tipo puede tener un rango de resistividad, de aproximadamente 1000 hasta 10 millones de $\Omega \cdot m$, dependiendo si esta húmeda o seca.

Mineral/Sedimento	Rango de Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Cuarzo	$10^{10} - 10^{14}$
Calcita	10^{12}
Mica	$9 \times 10^2 - 10^{14}$
Biotita	$2 \times 10^2 - 10^6$
Galena	$3 \times 10^{-5} - 10^2$
Granito	4.5×10^3 (húmedo) - 1.3×10^6 (seco)
Pirita	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$
Agua subterránea	10 - 100
Agua Mineral Natural	0.5 - 150
Agua de Mar	0.2
Sulfato de Cobre	3×10^{-12}
Óxido de Hierro	0.1 - 300
Basalto	10 - 1.3×10^7 (seco)
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$ (seco)
Arenisca	1 - 6.4×10^8
Limos	50 - 10^7
Arcilla	1 - 100
Gravas	100 (húmedo) - 1400 (seco)
Conglomerado	$2 \times 10^3 - 10^4$

Tabla 3.3 Resistividades que caracterizan a los minerales, rocas y sedimentos (Telford *et al*, 1990).

La conducción electrónica y la conducción electrolítica son dos efectos que producen el flujo de corriente en materiales terrestres. En la primera el flujo de corriente se debe a los electrones libres, como los metales y semiconductores, esta se puede encontrar en materiales terrestres cuando se presentan materiales conductivos como los sulfuros metálicos y mineral de grafito. En la segunda el flujo de corriente se da a través del movimiento de iones como electrolitos; por lo tanto, la resistividad de los minerales es alta en comparación con la de las rocas.

La resistividad del agua subterránea varía de 1 hasta $100 \Omega \cdot m$ o más en medios terrestres, dependiendo de la concentración de sales disueltas. La baja resistividad del agua de mar (aproximadamente $0.2 \Omega \cdot m$) es debido al relativamente alto contenido de sal. Este fenómeno electrolítico hace al método de resistividad una técnica ideal para el mapeo de la interface del agua de sal y del agua dulce en zonas costeras.

En la tabla 3.4 se identifican las resistividades de rocas, químicos, minerales, materiales, aguas, sedimentos y suelos.

Rocas ígneas y metamórficas	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Rocas sedimentarias	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$
Granito alterado	1500-10000	Lutita	$20 - 2 \times 10^3$
Granito muy alterado	100-600	Caliza	$100 - 5 \times 10^3$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$	Caliza compacta	1000-5000
Ande sita	$4.5 \times 10^4 - 1.7 \times 10^2$	Caliza blanda	100-300
Diorita	10^5	Caliza fracturada	500-1000
Gabro	$10^3 - 10^6$	Limonita	$50 - 10^7$
Sienita	$10^2 - 10^6$	Dolomita	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Peridotita	$3 \times 10^3 - 6.5 \times 10^3$	Margas secas	10^2
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$	Margas húmedas	10
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$		
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$		
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$		
Aguas, sedimentos y suelos	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Químicos, minerales y materiales	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Arenas	30-500	Hierro	9.74×10^{-8}
Arena fina	10^3	0.01M cloruro de potasio	0.708
Arena seca	$10^3 - 10^4$	0.01M cloruro de sodio	0.843
Arena silíceas	200-3000	0.01M ácido acético	6.13
Arenas con agua dulce	50-500	Xileno	6.998×10^{16}
Arenas con agua salada	0.5-5	Aluminio	2.65×10^{-8}
Arena Petrolífera	$4 - 2.2 \times 10^2$	Mercurio	95.8×10^{-8}
Arcilla	1-100	Madera	$10^3 - 10^{11}$
Arcilla seca	30	Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$
Arcilla húmeda	10	Ámbar	5×10^{14}
Limos	10-200	Plata	1.47×10^{-8}
Aluvión	10-800	Cobre	1.70×10^{-8}
Gravas	$50 - 10^3$	Oro	2.22×10^{-8}
Gravas húmedas	5×10^2	Acero	20.0×10^{-8}
Gravas saturadas	102	Platino	11.0×10^{-8}
Conglomerado	$2 \times 10^3 - 10^4$	Tungsteno	5.25×10^{-8}
Roca salada	$3 \times 10^{-10} - 10^{13}$	Níquel	6.40×10^{-8}
Aguas dulces superficiales	$10 - 10^3$	Estaño	1.5×10^{-8}
Aguas salobres superficiales	2-10	Plomo	22.0×10^{-8}
Agua subterránea	10-100	Cromo	13.2×10^{-8}
(no contaminada)		Calcopirita	$1.2 \times 10^{-3} - 0.3$
Agua marina	0.2	Pirita	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$
Agua de lagos salados	0.1-1	Pirrotita	$6.5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$
		Cinabrio	2×10^7
		Galena	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$
		Cobalto	$3.5 \times 10^{-4} - 10^{-1}$
		Bauxita	$2 \times 10^2 - 6 \times 10^3$
		Cuprita	$10^{-3} - 300$
		Cromita	$1 - 10^6$
		Hematita	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$
		Magnetita	$5 \times 10^{-3} - 5.7 \times 10^3$
		Cuarzo	7.5×10^{17}
		Azufre	10^{15}
		Carbón	3.5×10^{-5}
		Anhidrita	10^9
		Calcita	2×10^{12}
		Fluorita	8×10^{13}
		Yeso	1000
		Grafito	60.00×10^{-8}
		Silicio	6.40×10^2

Tabla 3.4 Valores de resistividad de rocas, minerales, aguas, sedimentos químicos, minerales y materiales (Tabla tomada de E. Anaya, Tesis Licenciatura, 2010).

Capítulo IV

4. Metodología.

4.1. Planificación del estudio.

Se realizaron pruebas del equipo utilizado bajo la supervisión del instrumentista Daniel Apolos Flores Salazar encargado del departamento de Geofísica perteneciente al laboratorio integral de la facultad de ingeniería BUAP.

Dichas pruebas fueron realizadas el día anterior al levantamiento de datos en campo.

Fue necesario el uso de un multímetro para evaluar el estado de los cables y el equipo SARIS-Scintrex.

Prueba	Resultado
Continuidad en los postes emisores AB y receptores MN del resistivímetro.	Aprobado.
Continuidad en los carretes de cables.	Aprobado.
Voltaje y carga de la batería del resistivímetro.	Voltaje 24V, 7.5Ah y durante la prueba 97% carga de la batería. Aprobado.
Prueba en campo de la resistividad aparente con arreglo Schlumberger con equipo SARIS-Scintrex.	Aprobado.
Botones de la pantalla.	Todos en funcionamiento.

Tabla 4.1 Pruebas preliminares (Flores Daniel, 2018).

4.1.1. Recursos Humanos y materiales

Para la campaña de adquisición de datos en campo de este proyecto se emplearon los siguientes recursos humanos:

Un operador capacitado para configurar el resistivímetro modelo SARIS-Scintrex.
Cuatro auxiliares de campo empleados para la movilidad de los electrodos.

Resistivímetro:

Para la exploración geoelectrica se empleó el equipo de prospección de aguas subterráneas SARIS (Scintrex Automated Resistivity Imaging System) que consiste básicamente en tres partes: una consola electrónica, un módulo multielectrodo que permite conectar electrodos o cables inteligentes y una batería de 24V. La intensidad de corriente máxima que suministra el SARIS es de 1000 mA con un voltaje de hasta 500 V (Scintrex, Can, 2013).

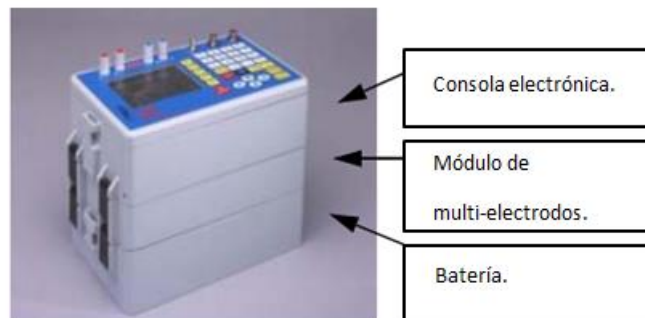
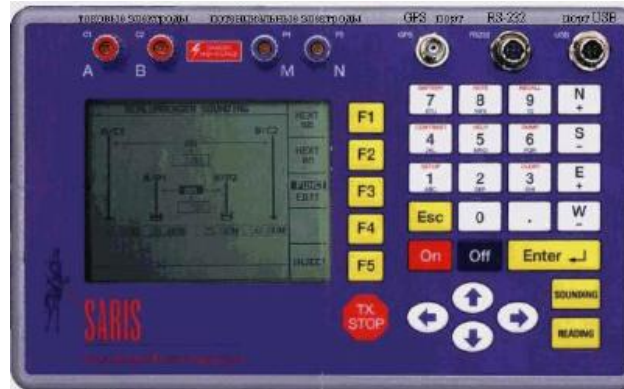


Figura 4.1 Resistivímetro SARIS.(Scintrex,Can.2013)

Adicionalmente se emplearon los siguientes materiales:

- A. 21 electrodos de acero inoxidable para AB y MN.
- B. Dos carretes cables eléctricos calibre 1/10" de 300 m para conectar la consola a los electrodos AB.
- C. Dos carretes de cables calibre 1/10" de 100 m que se conectaron a los electrodos MN.
- D. Cuatro marros de 3Lbs.
- E. Dos cintas métricas de 50 m cada una.
- F. Un GPS Garmín modelo Rhino 300.
- G. Libreta de campo.
- H. Hojas bilogarítmicas.



Figura 4.2 Resistivímetro conectado.

4.1.2. Consulta Sistemas de Información Geográfica.

Se realizó una consulta de sistemas de información geográfica con datos obtenidos a través de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) en su página web: conabio.gob.mx y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en su página web: inegi.org.mx.

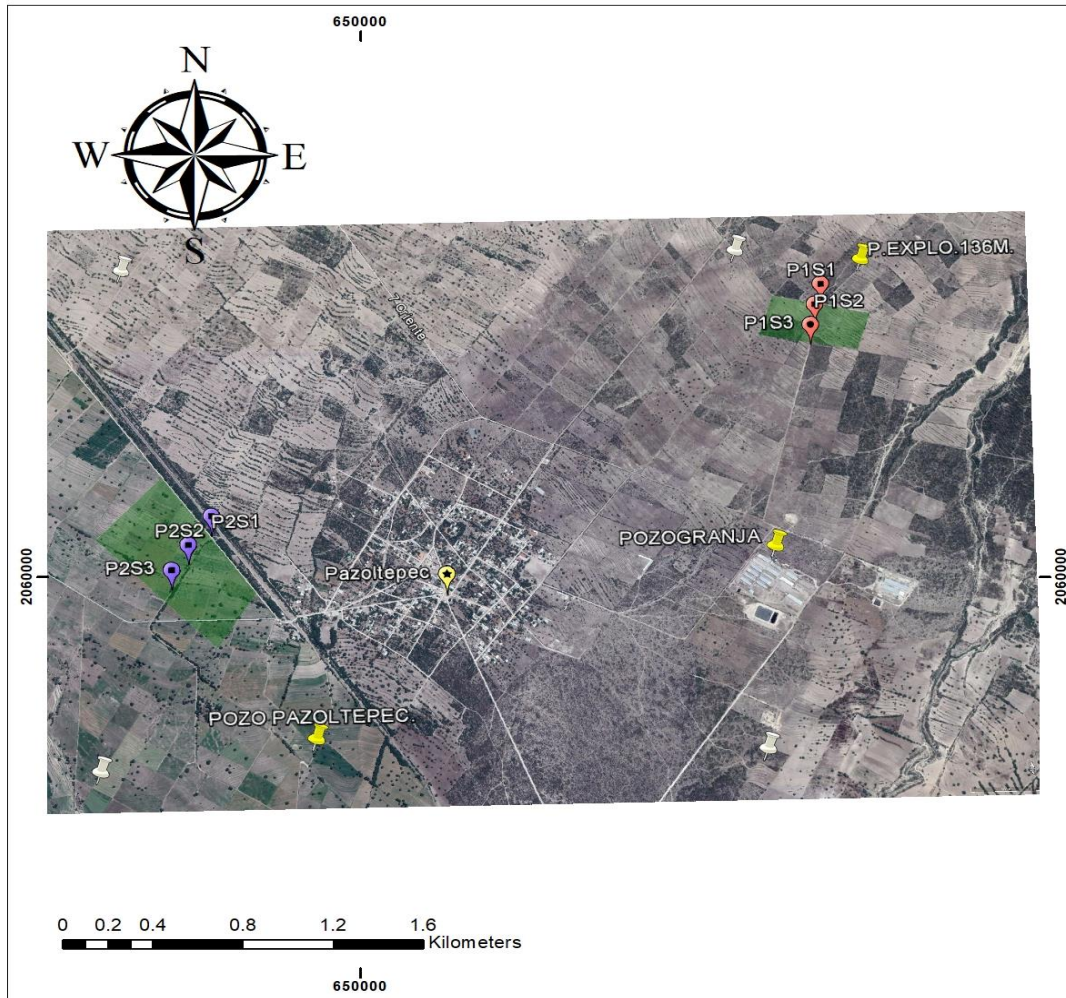
En los portales webs fueron descargados bases de datos en formato “.shp” *shapefile* dichos datos corresponden a curvas de nivel, geología, vías de comunicación, cuerpos de agua, corrientes de agua y límites territoriales del estado de Puebla.


La consulta de SIG fue a través del complemento ArcMap del software ArcGis versión 10.3 desarrollado por IRIS (Institute for Resources Information Science), en dicha consulta fue delimitada el área de estudio a través de coordenadas UTM.

El objetivo de la consulta de SIG es la delimitación del área de estudio, la ubicación geográfica, espacial, accesos y clasificación de la información topográfica, geológica e hidrológica del área de estudio.

A continuación, se muestra mapa base del área de estudio.

**DISTRIBUCIÓN DE SEV'S Y PUNTOS DE INTERÉS
EN EL ÁREA DE ESTUDIO.**

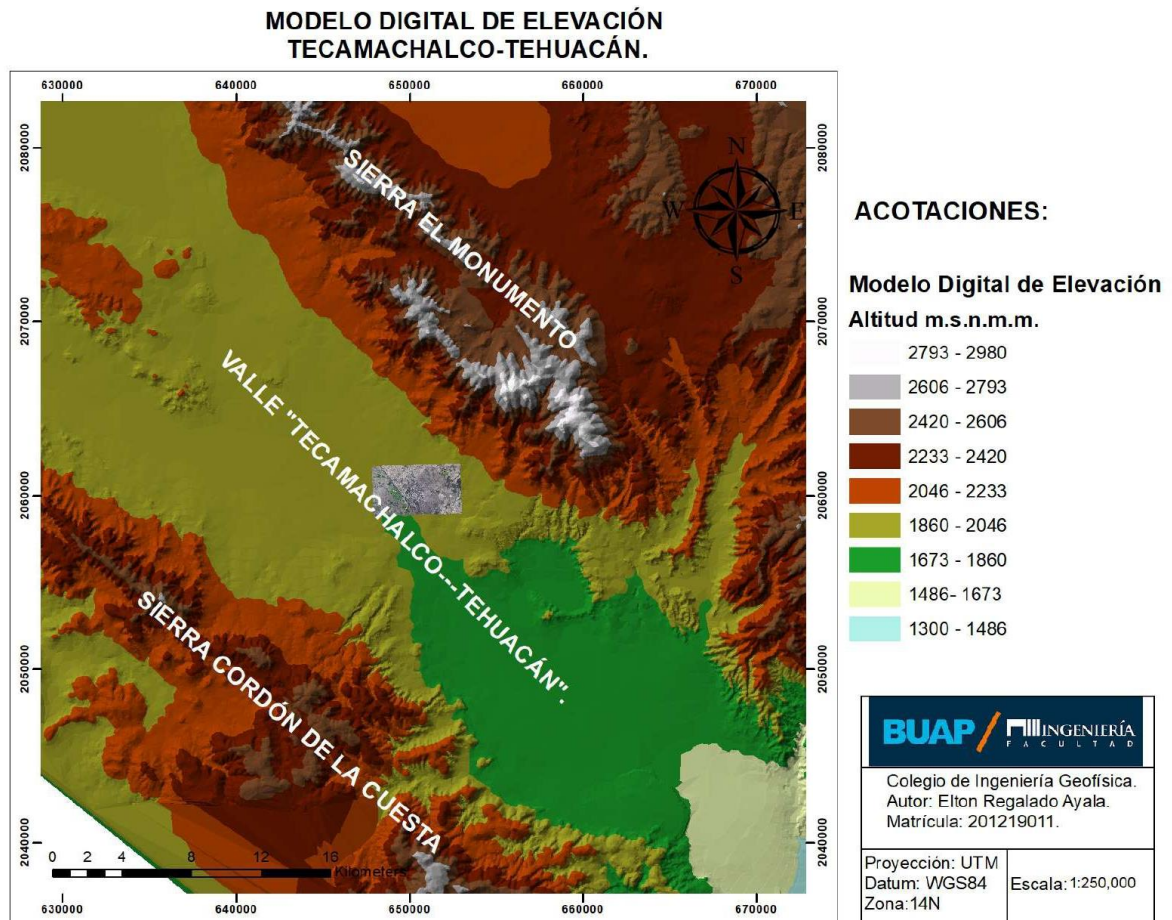


	
Colegio de Ingeniería Geofísica. Autor: Elton Regalado Ayala. Matrícula: 201219011.	
Proyección: UTM Datum: WGS84 Zona: 14N	Escala: 1:25,000

Mapa 4.1 Mapa base del área de estudio.

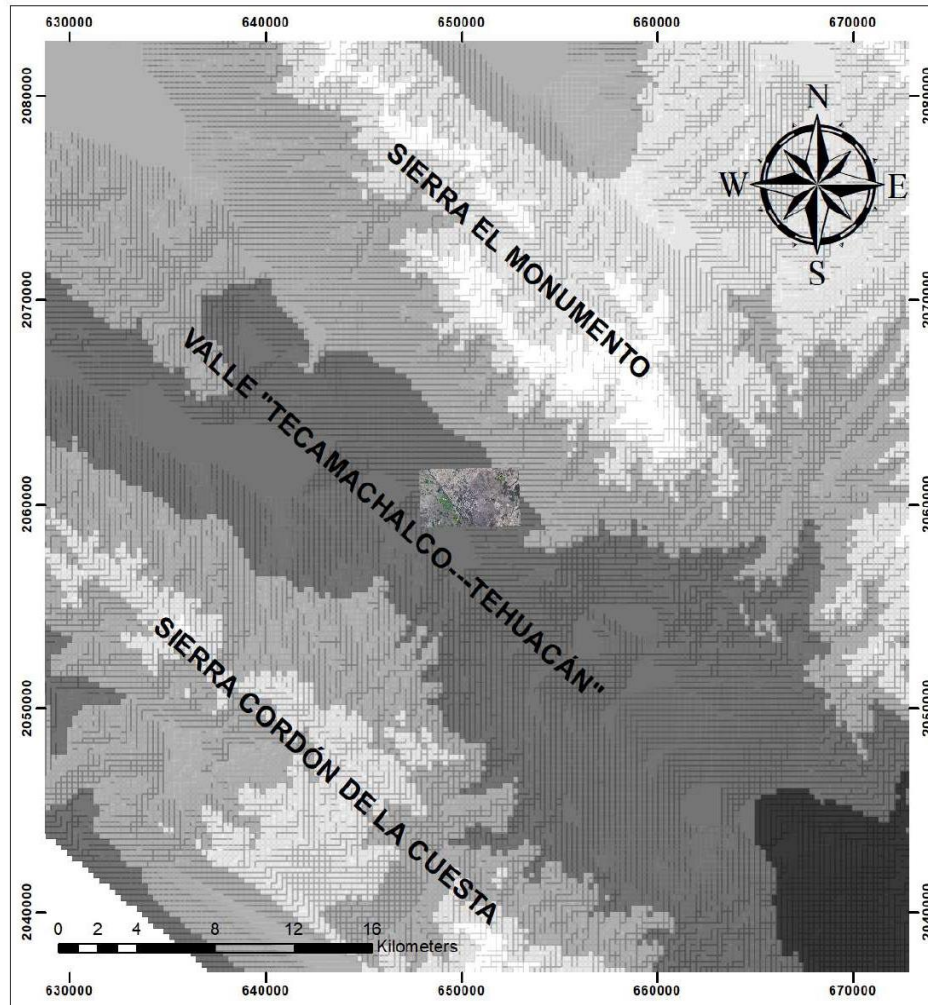
4.1.2. Modelación de SIG.

En la modelación de SIG se elaboró un modelo digital de elevación mapa 4.2 con curvas de nivel escala 1: 250,000, aplicando una reclasificación de elevaciones y se realizó la conversión a formato ráster para el análisis del medio físico (topografía) del área de estudio.



Mapa 4.2 Modelo Digital de Elevación.

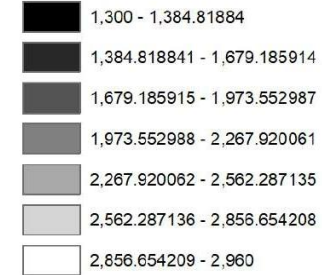
RÁSTER DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN TECAMACHALCO-TEHUACÁN.



ACOTACIONES:

Ráster MDE

Valor del Pixel



Colegio de Ingeniería Geofísica. Autor: Elton Regalado Ayala. Matrícula: 201219011.	
Proyección: UTM Datum: WGS84 Zona: 14N	Escala: 1:250,000

Mapa 4.3 Ráster de información topográfica.

4.1.3. Análisis de Sistemas de Información Geográfica

El objetivo del análisis de SIG en este trabajo es determinar de manera objetiva las áreas para la aplicación de los sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio, a través de la aplicación de herramientas matemáticas al ráster presentado con anterioridad.

Como resultado de la aplicación de herramientas *flow direction* y *flow accumulation* se obtuvieron los mapas 4.4 y 4.5 en los que se visualizan de las direcciones preferenciales de la escorrentía y las acumulaciones importantes de agua en el área estudiada respectivamente.

El principio matemático de las herramientas *flow direction* y *flow accumulation* es el cálculo vectorial, aplicando el operador nabla sobre los campos vectoriales de información ráster y caracterizando las áreas a través del gradiente ascendente (cimas) o descendente (sumideros) de una o más funciones; de esta manera discretizar la información del ráster contenida en celdas llamadas píxeles.

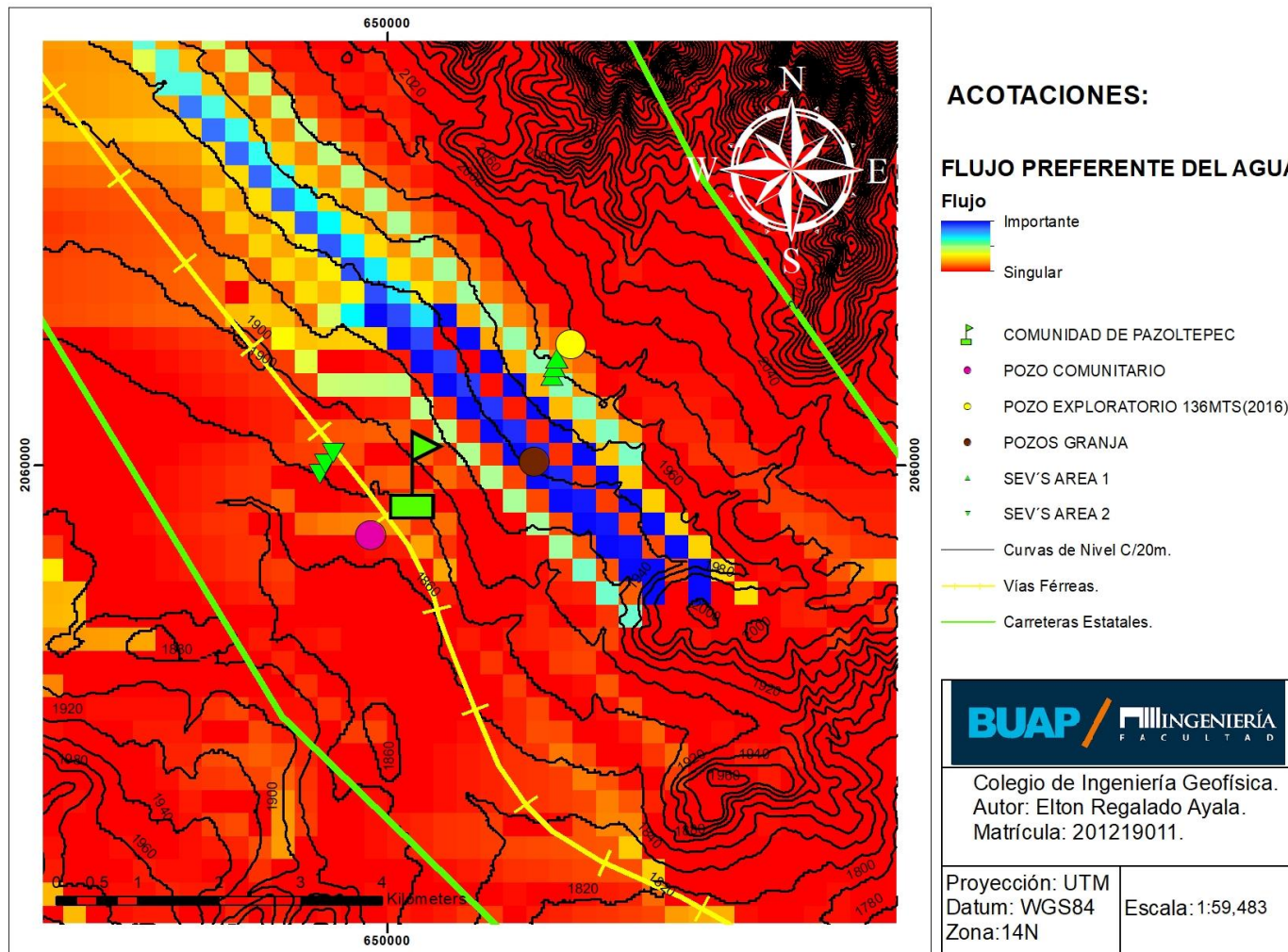
De manera regional, las acumulaciones y acumulaciones importantes de agua, tienen una dirección preferencial hacia el Sureste del mapa 4.4 regional, las concentraciones más importantes se encuentran hacia el municipio de Tepanco de López, debido a que esta zona es la de menor altitud respecto al nivel medio del mar en esta región.

Se determinó un flujo considerado con dirección preferencial NO-SE y una acumulación moderada hacia el centro y SE del mapa 4.5 de acumulaciones importantes.

El propósito de aplicar esta metodología es determinar de manera objetiva las áreas para la aplicación de los sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio de tal manera que se obtuvo una visualización regional del comportamiento superficial del fluido en la región de estudio.

4.1.3.1. Direcciones preferenciales de escorrentía

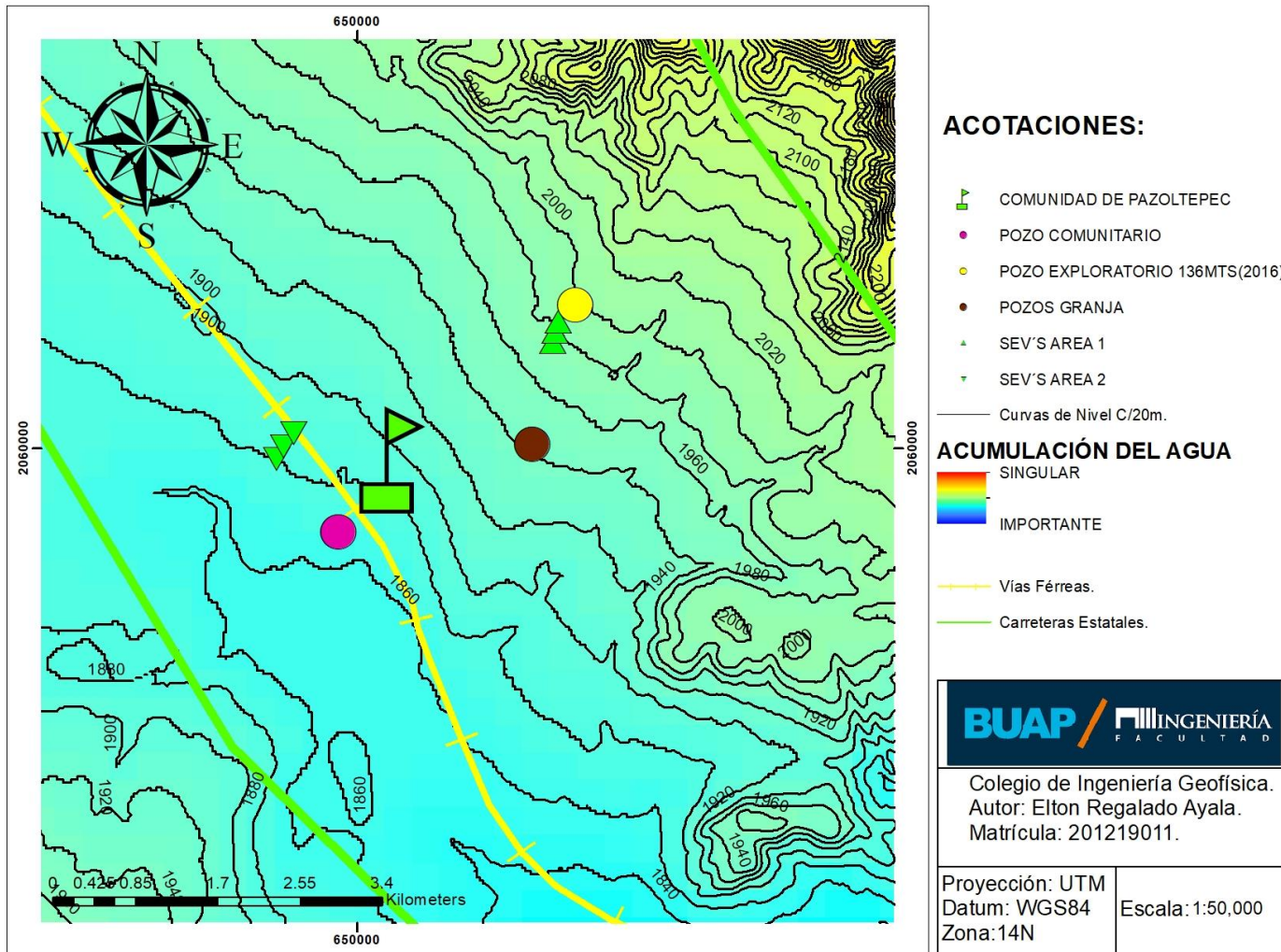
FLUJO PREFERENCIAL DEL AGUA EN EL ÁREA DE ESTUDIO



Mapa 4.4 Direcciones preferenciales de la escorrentía.

4.1.3.2. Acumulaciones importantes

ACUMULACIÓN PREFERENCIAL DEL AGUA EN EL ÁREA DE ESTUDIO



Mapa 4.5 Acumulaciones importantes de agua.

4.2. Adquisición de datos

Se ejecutaron seis SEV's con arreglo electródico Schlumberger en la comunidad de Pazoltepec, definiendo dos áreas de exploración P1 y P2, con el objetivo de explorar una profundidad mínima de 150 m y máxima de 200 m.

Como se definieron en los mapas anteriores: P: punto y S: SEV; entonces "P1S2" corresponde al punto 1 sondeo 2.

Áreas de exploración:

Punto 1:

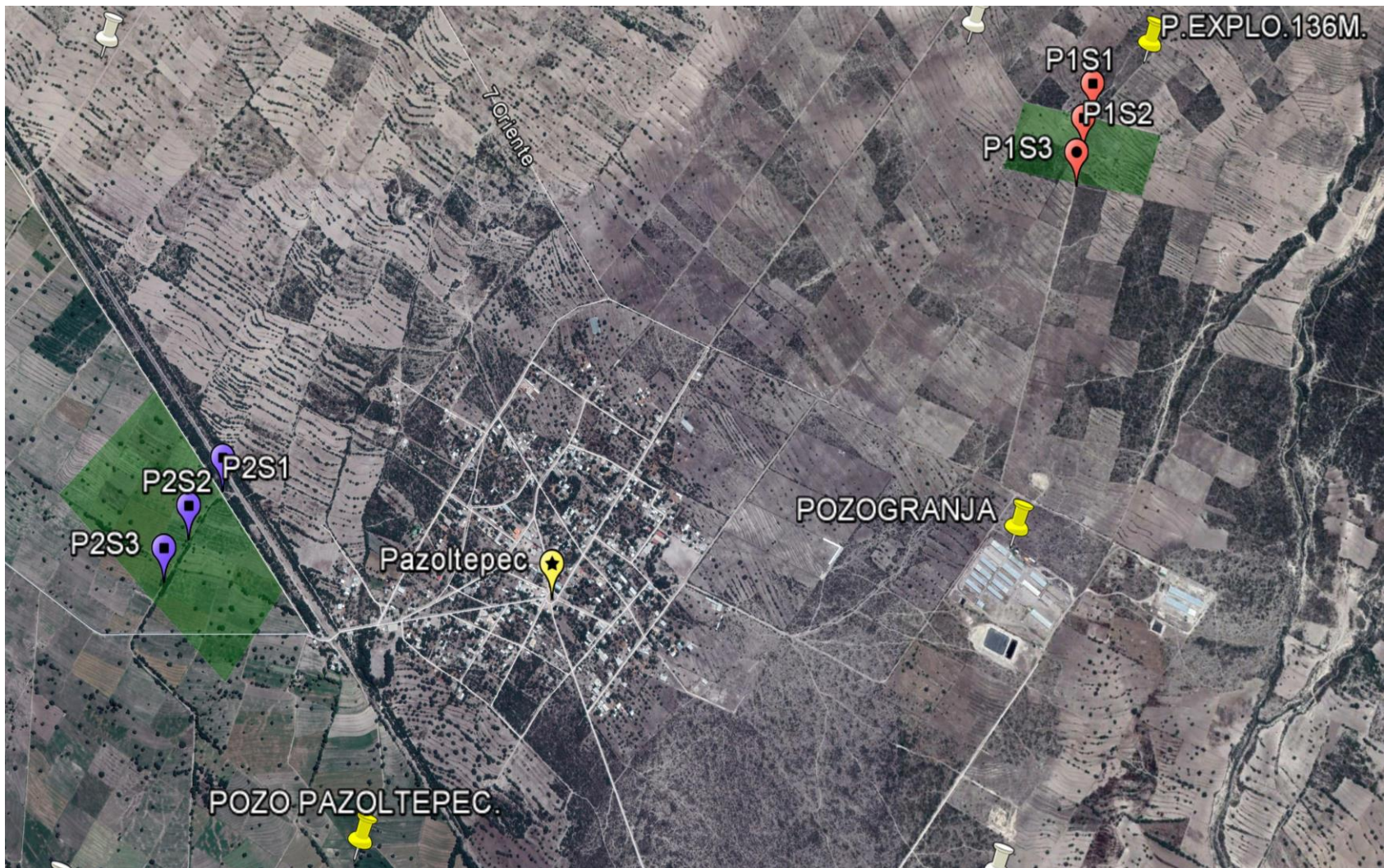
Área caracterizada por estar cerca de un pozo exploratorio de 136 metros ejecutado en el año 2016 realizado por una sociedad de agricultores y campesinos de la comunidad, además de que esta área se encuentra al pie de la sierra monumento.

Punto 2:

Localizado cerca de las vías férreas de la ruta Puebla-Tehuacán, ubicado en el centro y hacia el Oeste de Pazoltepec, a 1 km del pozo de agua potable de la comunidad y ubicado en el centro de la cuenca Tecamachalco-Tehuacán.

COORDENADAS UTM-14Q PUNTO 1			
SEV	X	Y	Elevación (msnmm)
1	652091.32 m E	2061320.85 m N	2000
2	652060.50 m E	2061217.30 m N	1990
3	652038.47 m E	2061113.82 m N	1986
COORDENADAS UTM-14Q PUNTO 2			
1	649344.98 m E	2060157.13 m N	1900
2	649245.85 m E	2060016.16 m N	1894
3	649174.73 m E	2059892.01 m N	1891

Tabla 4.2 Ubicación de los SEV's.



Mapa 4.6 Ubicación de los SEV's. (P: Polígono, S: SEV).

Espaciamientos de los Sondeos Eléctricos Verticales (m):

AB/2: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 160*, 180, 200, 220, 220*, 240, 260, 260*, 280, 300, 320, 320*, 340, 360.

*empalme.

La apertura mínima AB fue de 20 m y la máxima de 720 m.

Se realizaron cuatro empalmes.

Datos recabados en campo de resistividad aparente.

PUNTO 1			
	S1	S2	S3
AB/2(m)	ρ_a (Ω m)	ρ_a (Ω m)	ρ_a (Ω m)
20	110.9	115.9	119.3
40	124.2	120.4	127.2
60	120.7	131.2	133.7
80	122.3	141.5	149
100	125.4	181.7	173
120	114.4	144.9	139
140	131.2	120.2	122
160	180.7	109.5	120
180	160	91.7	114
200	179.2	74.6	87
220	116	52.9	73
240	134.6	60.8	66
260	330	71.55	70
280	104.2	92.63	63
300	114.9	64.5	62
320	119.5	63.1	59
340	98.72	63.71	55
360	120.6	58	40

Tabla 4.3 Resistividades aparentes, punto 1.

PUNTO 2			
	S1	S2	S3
AB/2(m)	ρ_a (Ω m)	ρ_a (Ω m)	ρ_a (Ω m)
20	74.5	66.5	72.3
40	70.5	54.3	60.4
50	66.7	47.7	47.72
60	53.6	40.7	42.6
80	37.8	33.7	30.5
100	40.55	6.29	6.3
120	33.5	6.1	5.9
140	38.9	5.4	5.6
160	25.6	3.3	3.5
180	27.2	3.8	3
200	24.2	2.6	2.6
220	26.3	4.5	2
240	23.1	6.9	3.4
260	20.5	5.2	5.2
280	15.2	7.3	8.1
300	9.8	9.83	9.83
320	12.6	10.6	10.2
340	18.7	12.5	10.9
360	33.5	6.8	11.3

Tabla 4.4 Resistividades aparentes punto 2.

Acotaciones de las Figuras Modelo de Capas de Resistividades Verdaderas.

Curva de campo Línea Negra

Curva Teórica Línea Roja

Modelo de Resistividad Verdadera Línea Azul.

Tabla de Valores de Resistividad Verdadera (ρ)

Número de Capas (**N**)

Espesores (**H**)

Profundidad (**D**)

4.3. Procesamiento de datos

Para el **Punto 1** las curvas de resistividad aparente procesadas en el software IPI2WIN son las siguientes:

P1S2; para esta curva de resistividad el error cuadrático medio de ajuste es significativo, como resultado el siguiente modelo de dos capas $\rho_2 > \rho_1$.

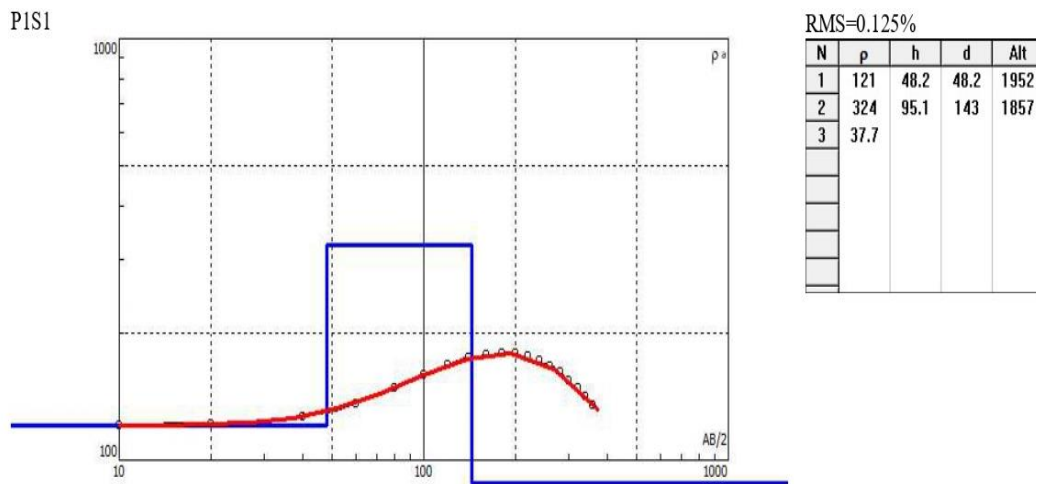


Figura 4.3 Modelo de capas P1S1.

P1S2; la figura 4.3 muestra el siguiente modelo de tres capas tipo KQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$) con un error cuadrático medio de 15.9%.

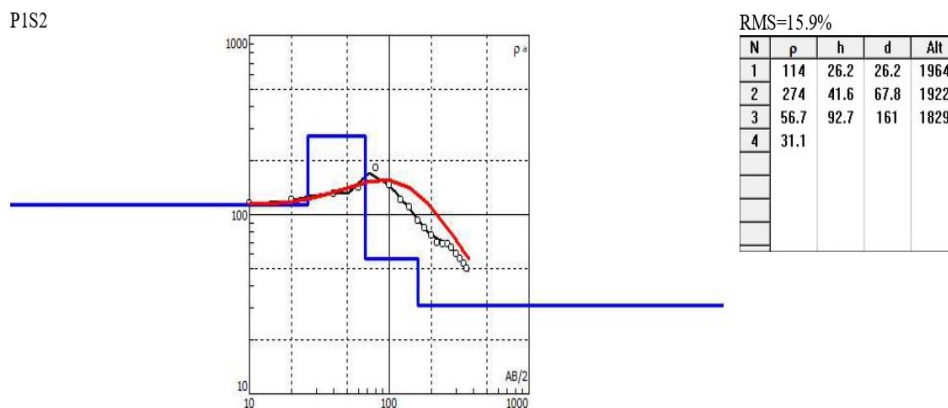


Figura 4.4 Modelo de capas P1S2.

P1S3, el siguiente modelo exhibe tres capas tipo KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$), con error cuadrático medio de 13.9%.

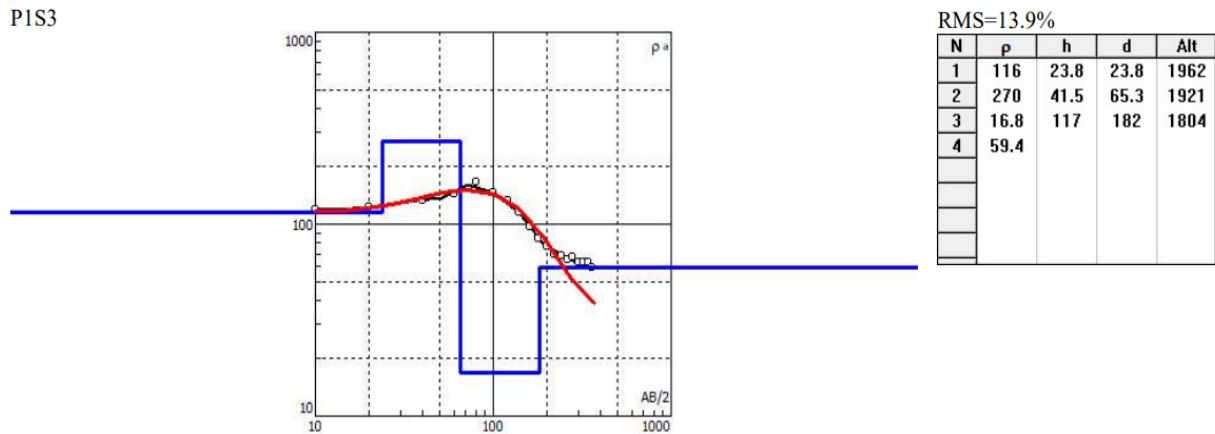


Figura 4.5 Modelo de capas P1S3.

A continuación, se representa el modelo de pseudosección de las resistividades verdaderas modeladas en IPI2WIN, se muestran en color rojo resistividades altas de 237 a 370 Ωm , de color amarillo resistividades medias que oscilan de 100-230 Ωm y en color azul resistividades bajas de 15-80 Ωm ; la profundidad de exploración mínima fue de 150 m y la máxima de 230 m, debido a la aplicación de la herramienta “Less depth” observamos solo 190 m de exploración en el modelo de pseudosección.

De esta manera definimos tres unidades geeléctricas para el punto de exploración 1, cercano a la perforación exploratoria de 136 m realizada en el 2016.

Unidades geoelectricas de la pseudosección de resistividades verdaderas P1S1, 2 Y 3.

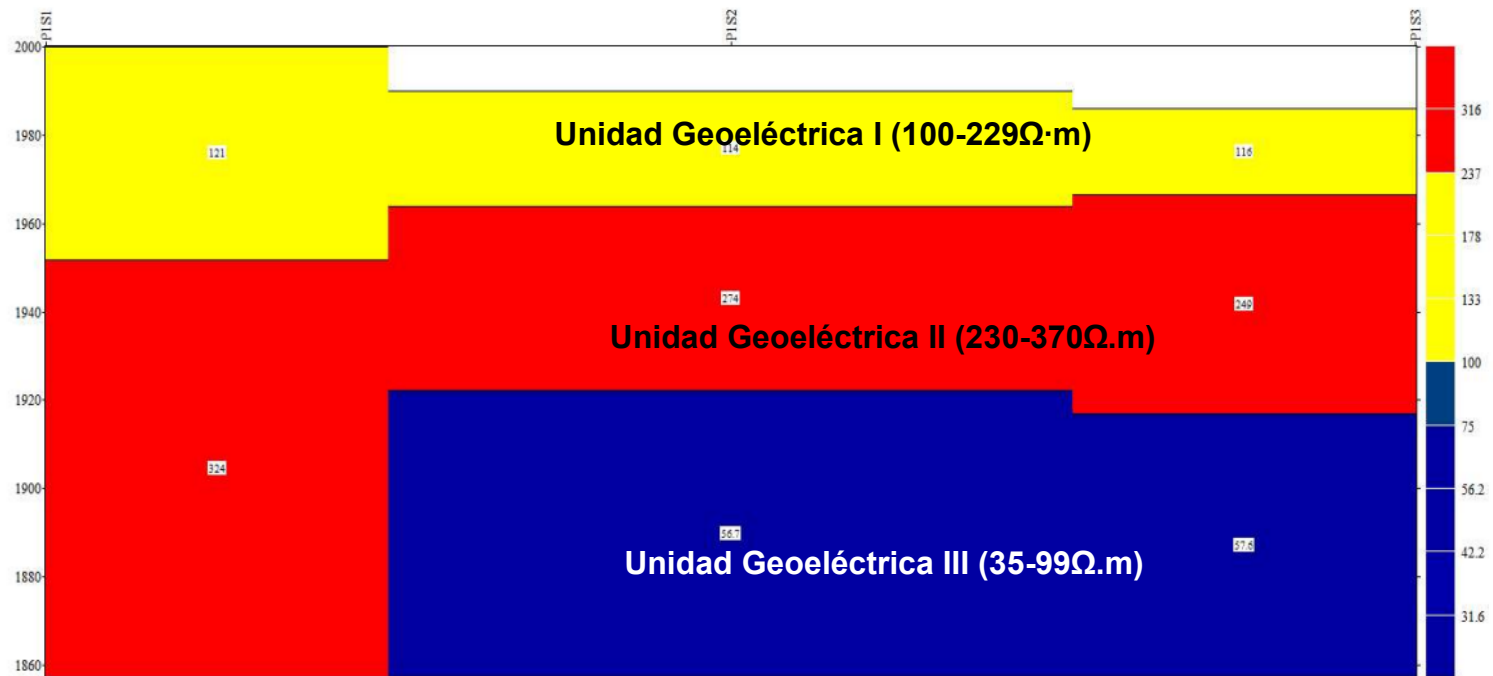


Figura 4.6 Pseudosección de Unidades Geoelectricas del punto 1.

Modelamiento en IPI2WIN, para el punto de exploración número dos, zona aledaña a las vías del ferrocarril.

P2S1; la curva de resistividades verdaderas es de tipo $\rho_1 > \rho_2$ de dos capas, con error cuadrático medio de 9.4% y una profundidad de 136 m.

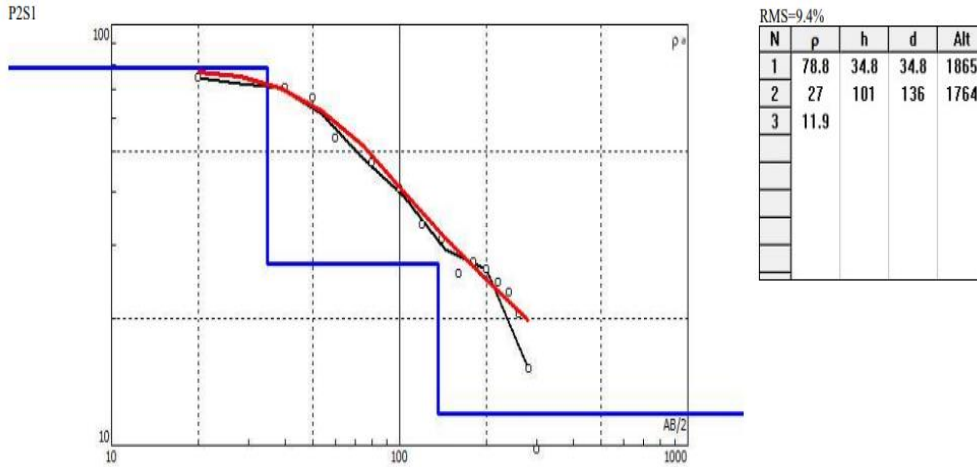


Figura 4.7 Modelo de capas P2S1.

P2S2; curva de resistividades verdaderas de tres capas, corte tipo Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) y error cuadrático medio es de 8.74%.

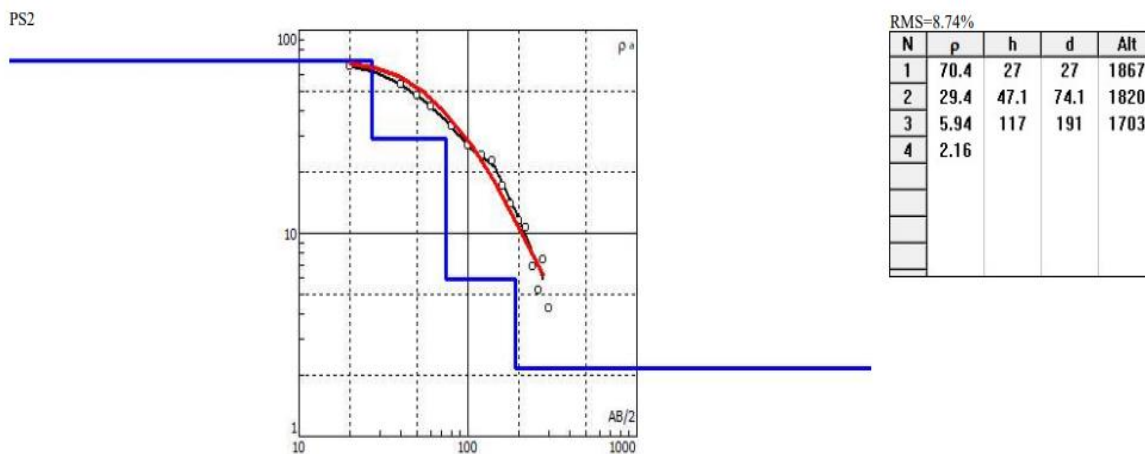


Figura 4.8 Modelo de capas P2S2.

P2S3, la siguiente curva de resistividades aparentes tiene una tendencia similar a la del SEV2, de tal forma que se caracterizó como una curva del tipo Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$), con error cuadrático medio de 5.56% y una profundidad de 197 m.

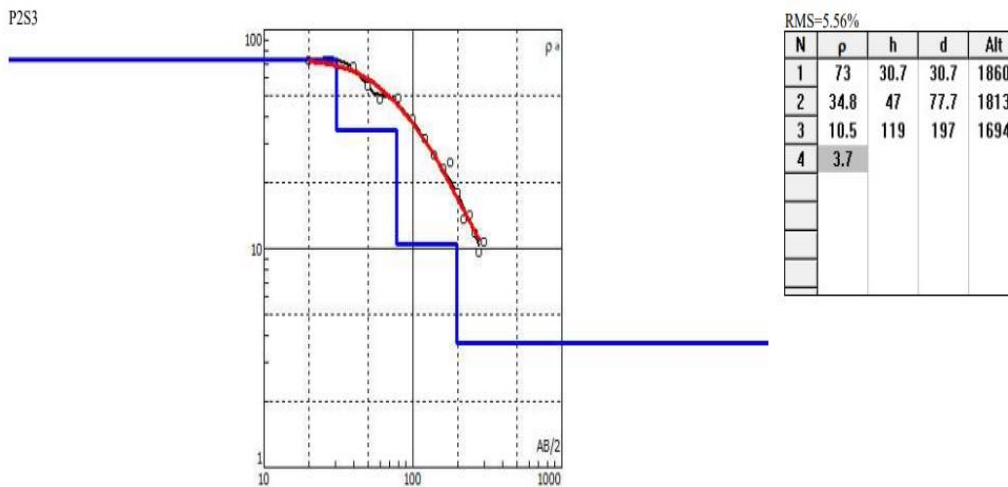


Figura 4.9 Modelo de capas P2S3.

En seguida se muestra el modelo de pseudosección de resistividades verdaderas modeladas en IPI2WIN para el punto de exploración número dos, aledaño a las vías del ferrocarril. Se clasificaron tres unidades geoelectricas con los siguientes rangos de resistividades verdaderas; resistividades altas de 70 a 100 Ωm en color rojo, las resistividades medias oscilan de 20 a 70 Ωm en color amarillo y de color azul resistividades bajas de 5 a 20 Ωm . La profundidad de exploración mínima es de 136 metros y la máxima de 200 metros.

Unidades geoelectricas de la pseudosección de resistividades verdaderas para el punto de exploración número dos (P2S1, 2 Y 3).

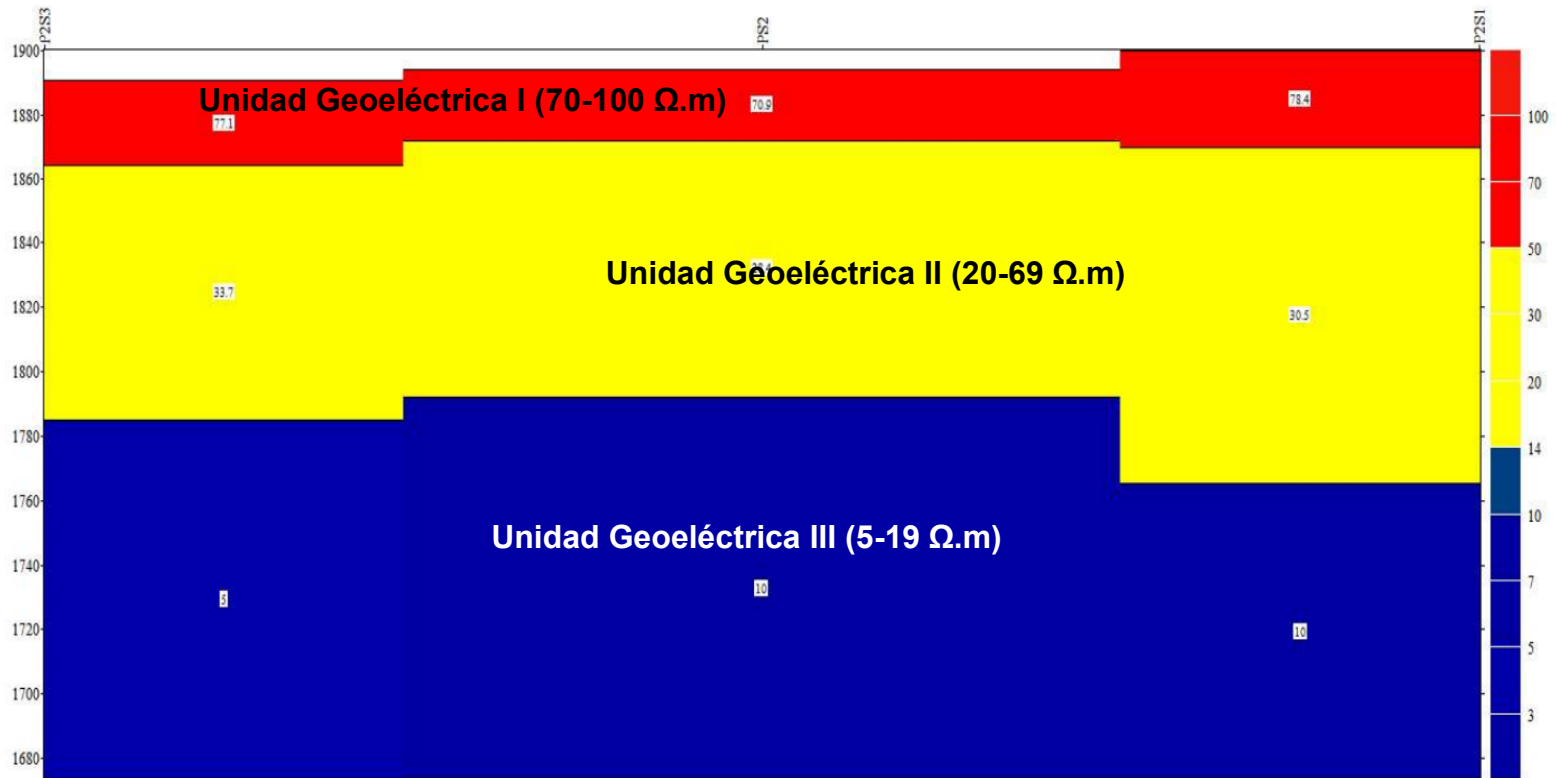


Figura 4.10 Pseudosección de unidades Geoelectricas del punto 2.

4.3. Modelación Geoeléctrica en Surfer

Se modelaron los datos de resistividades verdaderas obtenidas en IPI2WIN, a partir de exportar el modelo de pseudosección de resistividades verdaderas como archivo de extensión “surfer.ASCII” y se realizó una interpolación de la variación de resistividades verdaderas respecto a la profundidad de los sondeos eléctricos verticales a partir de una tabla de extensión “.xls”, posteriormente se elaboró un *grid* con extensión “.bln” y fue cargada esta información a través de la herramienta “contour”, para observar la información interpolada aplicando el método de regresión polinomial.

Cabe mencionar que la profundidad está sujeta Sobre el Nivel Medio del Mar (S.N.M.M.).

En la tabla 4.5 se clasifican los rangos de resistividad de las unidades geoeléctricas de los Sondeos Eléctricos Verticales.

UNIDADES GEOELÉCTRICAS PUNTO 1.		
Unidad	Rango de resistividades (Ωm)	Color
I	100-230	AMARILLO
II	229-370	ROJO
III	35-99	AZUL
UNIDADES GEOELÉCTRICAS PUNTO 2.		
Unidad	Rango de resistividades (Ωm)	Color
I	70-100	ROJO
II	20-60	AMARILLO
III	5-19	AZUL

Tabla 4.5 Unidades Geoeléctricas. Rango de resistividades y su clasificación.

A continuación, los modelos de interpolación se elaboraron bajo el método de regresión polinomial, están referenciadas Sobre el Nivel Medio del Mar (S.N.M.M.) sobre la vertical del gráfico y las distancias del espaciamiento sobre la horizontal. Las figuras 4.10 y 4.11 exhiben el contraste de la interpolación de resistividades verdaderas respecto a la profundidad de exploración y la apertura de los electrodos.

El resultado de la interpolación es un modelo geoelectrico que infiere sobre la distribución de las resistividades verdaderas, esta información nos sirve al momento que lo integramos con información de los materiales de perforación y la información geológica de la zona de estudio, para el proceso de interpretación.

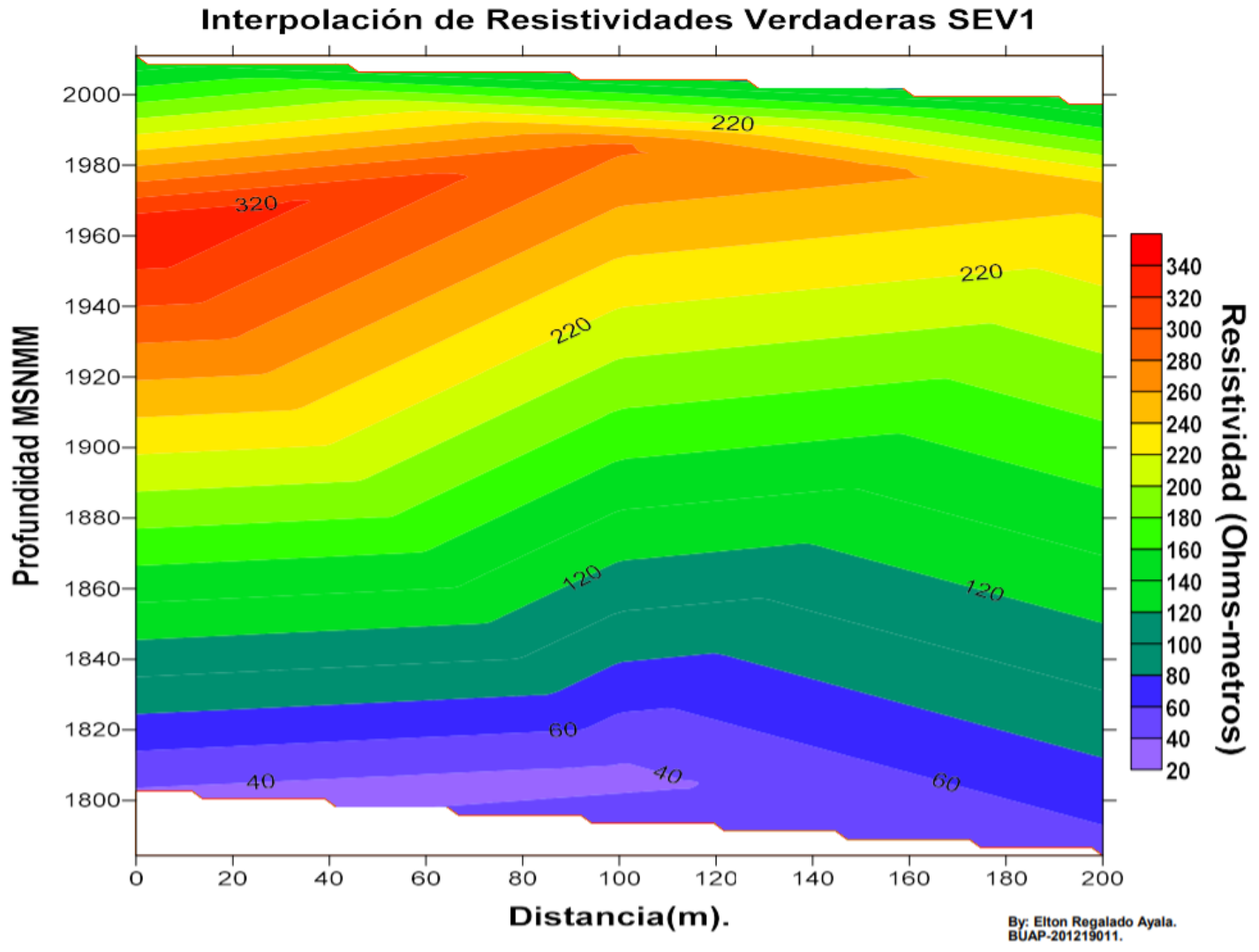


Figura 4.11 Unidades Geoeléctricas interpoladas del punto 1 sobre nivel medio del mar.

SEV1: De acuerdo con la distribución de las resistividades que aparecen en el gráfico de la figura 4.11 contrastan dos secciones altamente resistivas respecto a la sección de mayor distribución en tonos verdes y de resistividades que van desde los 80 Ω .m hasta 200 Ω .m, en la parte superior del gráfico con resistividades que oscilan entre los 220 Ω .m hasta 320 Ω .m (de tonos amarillos hasta rojizos).

La segunda sección que contrasta en la fig.4.11 se ubica en la parte inferior y representa resistividades de 20 Ω .m hasta 60 Ω .m. Se puede inferir de manera indirecta que las resistividades altas las relacionamos con materiales compactos y macizos rocosos; las resistividades bajas las asociamos a materiales con cierto grado de porosidad y/o agua embebida en las pequeñas cavidades.

SEV2: Corresponde al estudio de caso, para determinar la distribución de las resistividades los datos se sometieron a una interpolación polinomial del tipo local, se observa como resultado el contraste de tres unidades de resistividad verdadera en la figura 4.12.

En la parte superior del gráfico se encuentran las resistividades más altas en tonos que van del amarillo hasta el rojo con resistividades de 50 Ω .m hasta los 80 Ω .m, contrasta con una sección de resistividades en color verde que representan resistividades de 30 Ω .m a 45 Ω .m, de manera general y abarcando dos terceras partes del grafico se encuentran la unidad de resistividades bajas que va de 1 Ω .m hasta 25 Ω .m; asociamos las resistividades altas a materiales componentes del suelo compacto y macizos rocosos, y las resistividades bajas se asocian a rocas porosas con contenido de agua en sus poros.

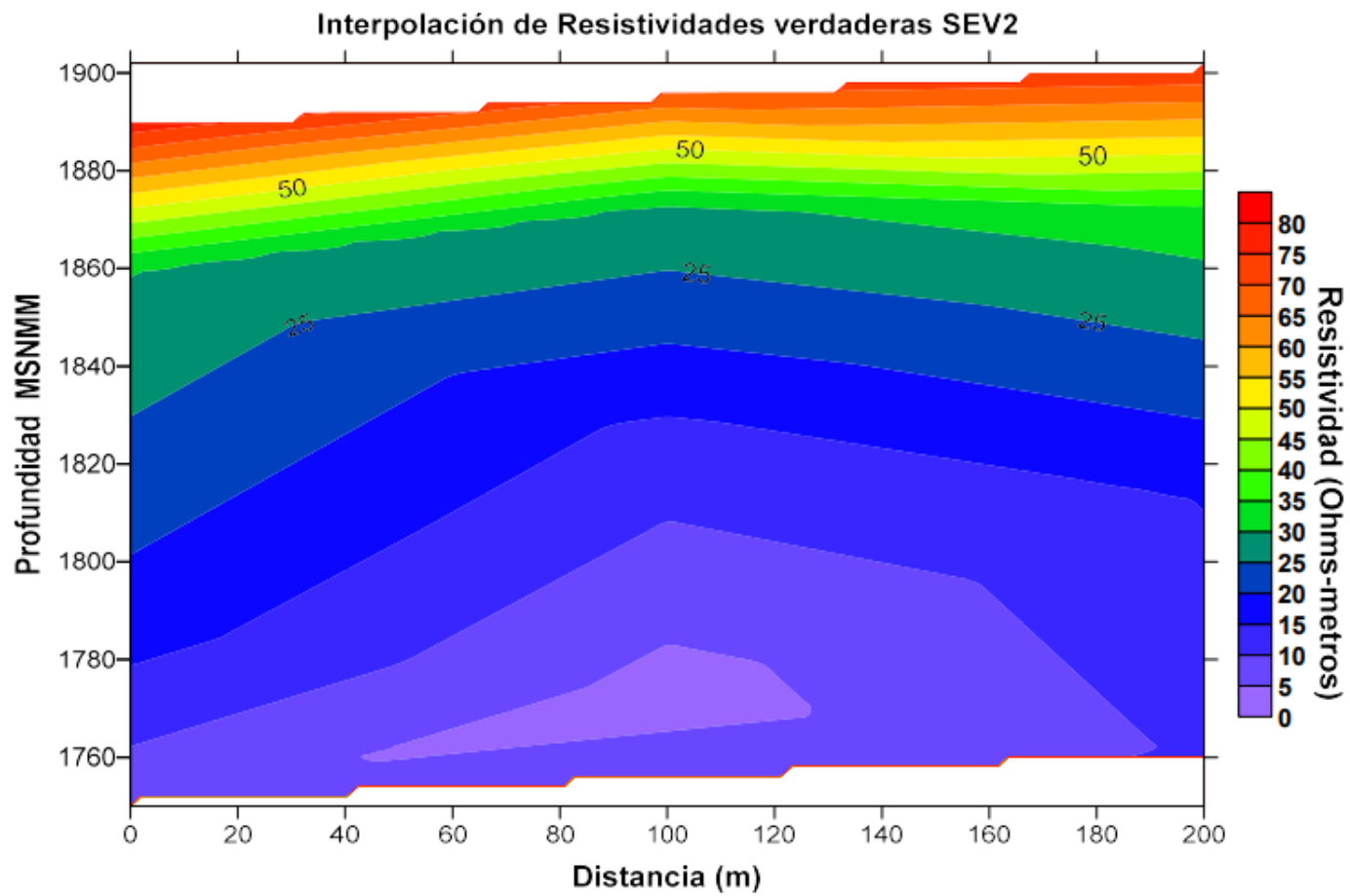


Figura 4.12 Unidades Geoeléctricas interpoladas del punto 2 sobre nivel medio del mar.

Capítulo V

5.- Resultados

5.1.1. Modelo de Unidades Geoeléctricas del punto 1 de la figura 4.11:

Interpretación para el punto aledaño a una perforación de 136 m realizada en el año 2016, con base en los sondeos realizados se determinaron tres unidades geoeléctricas contrastantes entre sí y con variaciones de resistividades citadas a continuación:

1.- Las resistividades en un rango de 100 a 220 $\Omega \cdot m$ y con espesor de 0 a 30 m comprenden a la unidad geoeléctrica I en color amarillo, se considera material de arrastres que conforma el suelo y roca caliza alterada por la erosión de la acción del agua y materiales de arrastre, que pertenecen a la unidad geoeléctrica I de color amarillo.

2.- Con resistividades de 220 $\Omega \cdot m$ a 320 $\Omega \cdot m$ y un espesor de 30 m a 70 m y se localiza la unidad geoeléctrica II en color rojo correspondiente a una caliza compacta y fracturada, de acuerdo con el modelo interpolado se observa la variación de las resistividades y en consecuencia el degradado del color rojo en el gráfico, esta unidad geoeléctrica II inicia en el borde superior izquierdo y disminuye hacia la derecha y a la mitad del gráfico, como un acuñamiento.

3.- La unidad geoeléctrica III en color azul tiene resistividades en un rango de 20 $\Omega \cdot m$ a 100 $\Omega \cdot m$ con un espesor de 160 m a 220 m se encuentra una capa muy contrastante y con posibilidades de almacenamiento de agua ya que en esta capa de material poroso está relacionado a depósitos del terciario, clasificado como arenas y tobas, existe una probabilidad importante para el alumbramiento de un pozo.

5.1.2. Estudio de caso del Modelo de Unidades Geoeléctricas del punto 2, correspondiente a la figura 4.12.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

1.- Con resistividades de $70-100 \Omega \cdot m$ y un espesor de 0 m a 30 m de profundidad se encuentran en la unidad geoeléctrica I de color rojo, de material de suelo compacto relacionado con material de arrastre, materia orgánica formadora de suelo y a mayor profundidad toba compactada.

2.-Unidad geoeléctrica II de color amarillo, con espesor de 30 m a 70 m de profundidad y con resistividades que oscilan entre los 20 a $70 \Omega \cdot m$ el cual se correlaciona con material aluvial de arrastre de origen volcánico y tobas andesíticas semi-compactas.

3.-A una profundidad de 70 m a 150 m se localizan resistividades de 5 a $20 \Omega \cdot m$ que son muy bajas y contrastantes respecto a las capas mencionadas con anterioridad y que corresponde a material aluvial vulcano-sedimentaria, arenisca-conglomerado de alta porosidad y permeabilidad, debido a que correlacionando geológicamente se encuentra en una zona de depósitos acarreados. Estas características pertenecen a la unidad geoeléctrica III en color azul.

De acuerdo al análisis hidrológico y consulta geológica de SIG esta área presenta acumulaciones importantes de agua, sujetas a la topografía y la geología.

El resultado de los análisis de los SEV's se estima que a los 70 metros de profundidad se encuentre el nivel freático del área de estudio, por lo que es un área factible para la perforación exploratoria y ampliación de un pozo profundo.

5.2. Análisis técnico

De acuerdo al análisis de los sondeos eléctricos verticales en las dos áreas de estudio P1 figura 4.11 y P2 figura 4.12, la información geológica y estratigráfica recabada en la zona de estudio, se determinó que el “Punto P2” es el área que reúne las mejores condiciones para una perforación exploratoria con base en los modelos y el análisis geoeléctrico; se determinó el nivel freático del área de exploración P2 a 70 m de profundidad a partir del contraste de la unidad geoeléctrica II con resistividades verdaderas de 40 a 60 $\Omega \cdot m$ y la unidad geoeléctrica III subyacente posee resistividades verdaderas de 5 a 20 $\Omega \cdot m$, clasificado como material semi compacto, caracterizado como brechas volcánicas, toba arenosa y toba calcárea con espesor aproximado de 60 m.

Se recomienda perforación exploratoria mínima de 150 m de profundidad, de 8 pulgadas de diámetro y fluido de perforación “base agua”, en el punto 2 con coordenadas UTM: X=649199.00 m E, Y= 2060014.00 m N.

Debido a que los modelos geoeléctricos, la correlación geológica y la interpretación indican que el punto de exploración 2, aledaño a las vías férreas, presenta ventajas importantes para el alumbramiento de un pozo profundo.

5.2.1. Resultados del punto SEV 2: Materiales de la perforación exploratoria.

El 23 de abril del 2018, los interesados de la comunidad de Pazoltepec reunieron el capital necesario para realizar la perforación exploratoria bajo las recomendaciones vertidas con anterioridad.

La perforación fue desarrollada por el C. Jesús Rodríguez dueño de la máquina perforadora y supervisor de la perforación C. Elton Regalado Ayala.

Durante 16 días se desarrolló la perforación sin problemas técnicos, hasta día 7 de mayo que el eje transmisor de rotación se fracturó, la pieza fue cambiada por una nueva e instalada hasta el día 11 de mayo hasta esta fecha se tenía un avance de

60 m de profundidad; la perforación concluyó el día 24 de mayo del 2018 con una profundidad total de 150 de profundidad y un diámetro de 18 pulgadas.

Durante el desarrollo de la perforación se recabaron muestras a cada metro de avance para construir una columna litológica correlacionable al modelo Geofísico elaborado con anterioridad.

De 0 a 2 m se perforó material blando y arcilloso con presencia importante de materia orgánica, color negruzco, material clasificado como tipo A, material blando, suelo.

De 2 a 40 m se recolectaron muestras de material compacto color café claro a oscuro de compactación media y clasificada como material tipo B, tepetate.

De los 40 a 70 m se perforó material compacto, color café claro, se identificaron fenocristales y fragmentos subangulosos, se caracterizó como toba brechoide con inclusión de fragmentos subangulosos cementado en una matriz de toba compacta color crema.

De los 70 m a 78 m se encontró con material suelto de color café oscuro, con fragmentos subangulosos, caracterizado como tobas arenosas con fragmentos de rocas. En esta formación ocurrió un aporte considerable de agua que indicativo de una formación portadora de agua; debido a que los materiales recortados se diluyeron con más rapidez y el lodo perdió viscosidad, se determinó la superficie freática a la profundidad de 72 m.

De los 136 a los 142 m de profundidad ocurrió aporte de agua considerable y el material recuperado a esta profundidad fue material suelto de color crema, clasificado como toba calcárea con fragmentos subangulosos.

De los 142 a los 150 m de profundidad se perforó material de dureza considerable, color blanco y fino, de acuerdo con la estratigrafía se clasificó como Caliza compacta proveniente de la formación Mexcala, por tal motivo se concluyó con la ampliación de la perforación de 12 a 18 pulgadas.

La figura 5.1 representa la columna litológica de materiales perforados en el punto 2 de la comunidad de Pazoltepec, realizado con el software SedLog de la Royal

Holloway University of London. Debido a la configuración del software se describirá a partir de la cima (top drilling) hasta la base (bottom drilling).

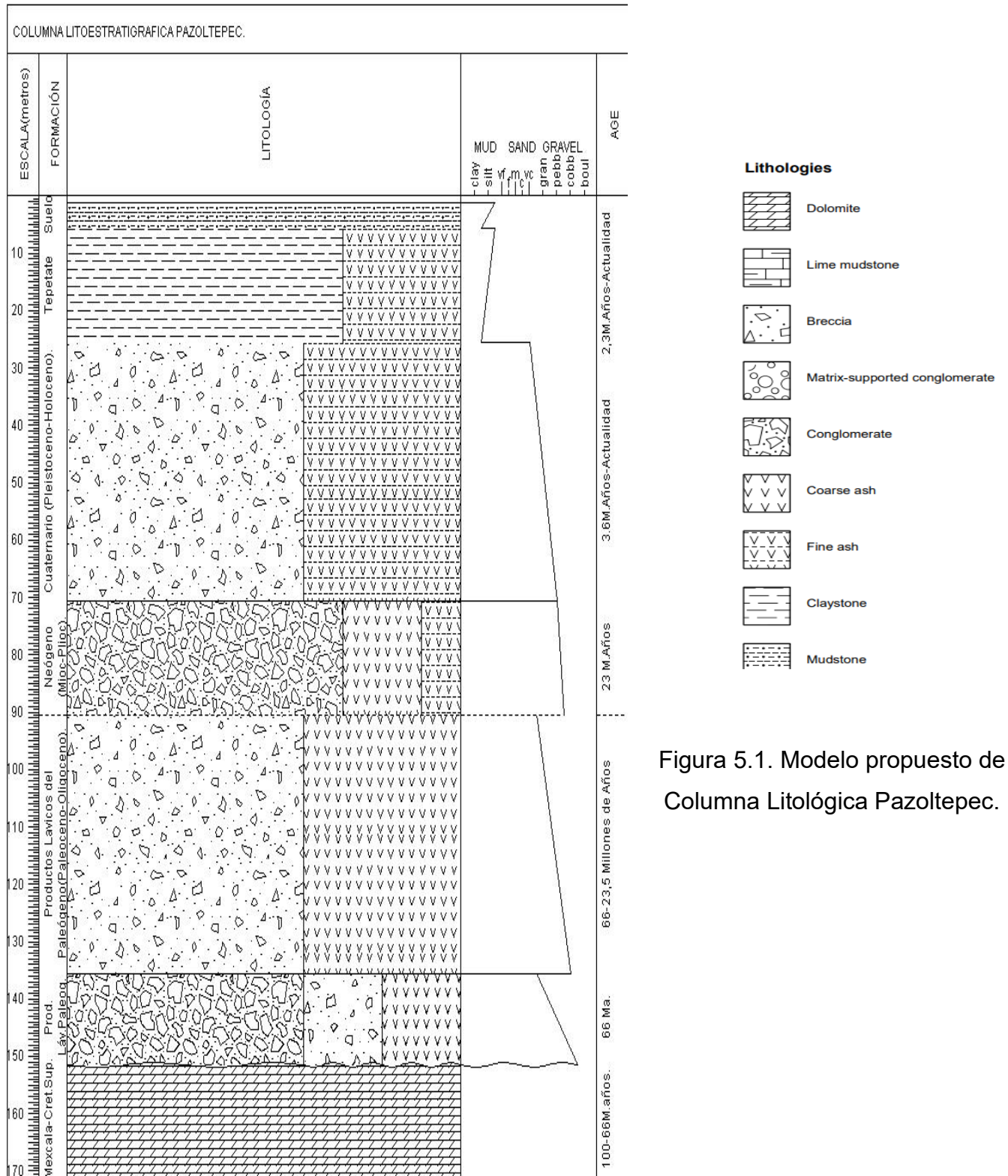


Figura 5.1. Modelo propuesto de Columna Litológica Pazoltepec.

5.3. Modelo de Pozo

A continuación, se presentan los modelos Geoeléctrico y Litoestratigráfico resultado de la inversión de datos adquiridos en campo e interpolados en Surfer; el modelado fue realizado a través de la integración de información geológica, geofísica y la clasificación de los materiales perforados, en la zona de exploración.

5.3.1. Modelo Geoeléctrico estudio del caso Punto 2.

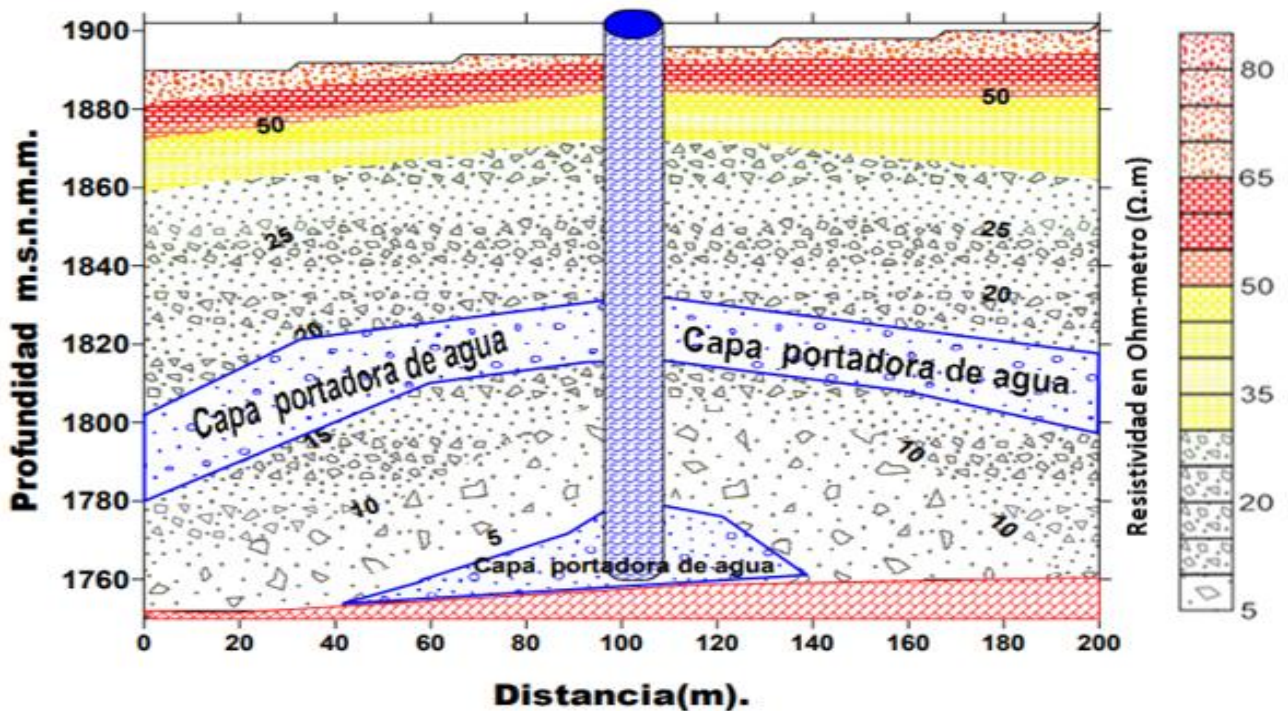


Figura 5.2 Modelo Geoeléctrico.

Se explica que en la parte superior de la figura 5.2 se encuentran resistividades que abarcan de los $50 \Omega \cdot m$ hasta los $80 \Omega \cdot m$ estas relacionadas a materiales compactados y que conforman el suelo en el área de estudio.

En la parte media de la figura 5.2 se define una capa portadora agua con resistividades de $5 \Omega \cdot m$ hasta los $25 \Omega \cdot m$ a una profundidad de 70 m, un espesor promedio de 15 m a lo largo de toda la sección, estas resistividades están relacionadas por el tipo de material suelto o semi-consolidado, con una distribución media y con importante permeabilidad la cual permite el aporte de agua; con características similares en cuanto a resistividades y materiales a una profundidad de 140 m se ubica una zona portadora de agua, relacionada con materiales de porosidad y permeabilidad importante.

Las resistividades más altas de la parte inferior del grafico se relacionan con un material consolidado, de baja porosidad y permeabilidad, por lo que refleja resistividades superiores a los $70 \Omega \cdot m$; este material funciona como sello ante el paso del agua hacia la profundidad.

5.3.2. Modelo Litoestratigráfico.

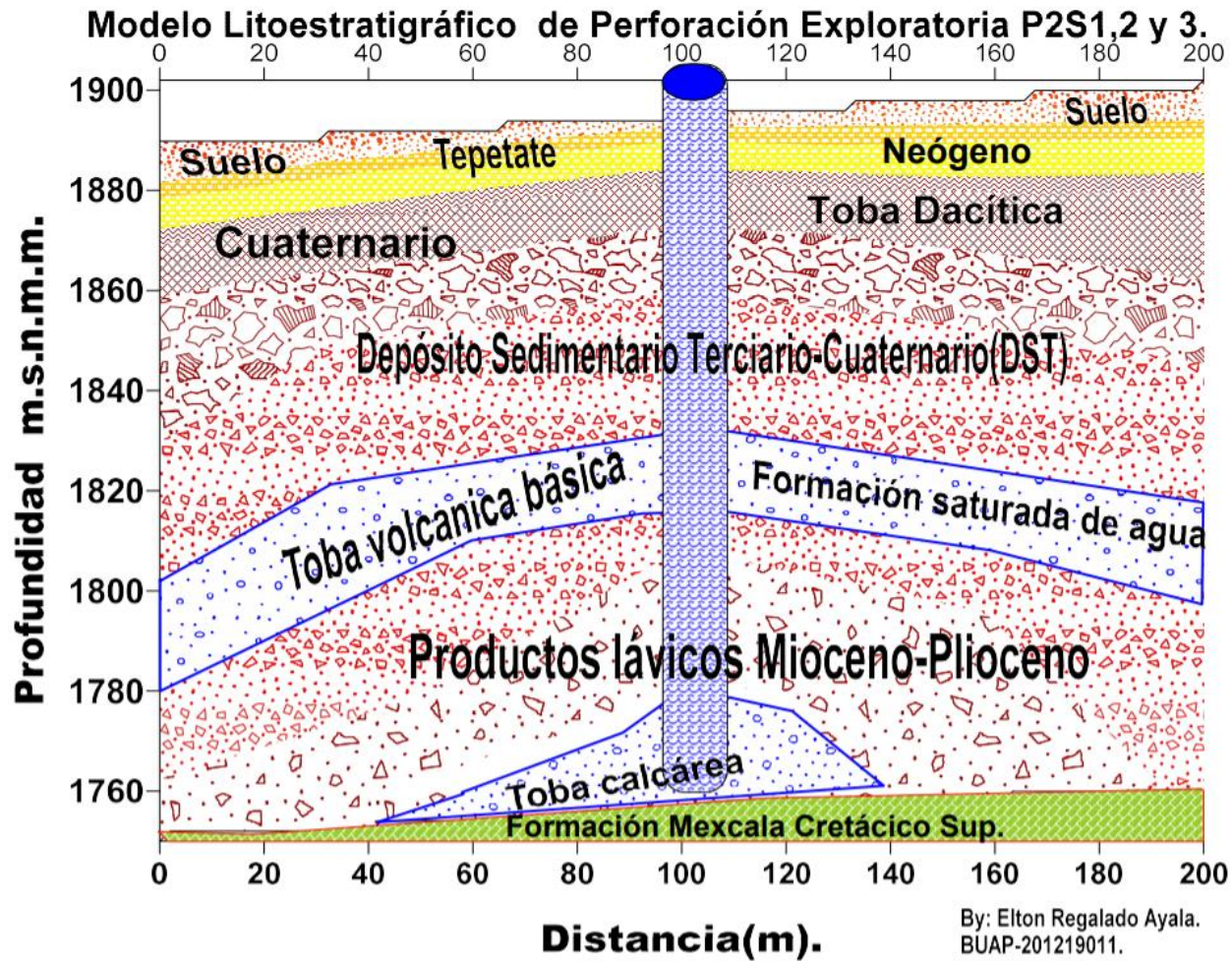


Figura 5.3 Modelo Litoestratigráfico.

A continuación, explicación de la figura 5.3 modelo lito estratigráfico:

A partir de los 150 m de profundidad se encuentra la formación Mexcala originada en el Cretácico superior 100 hasta 66 millones de años de acuerdo con Domínguez, E (2005) está definida como una caliza fina, compacta, con inclusiones de pedernal, de baja porosidad y permeabilidad deficiente; que funciona como roca sello en el área de estudio.

Predomina en la parte media del gráfico entre los 130 hasta los 100 m materiales originados por eventos volcánicos del Mioceno-Plioceno hace 23 millones de años y también depósitos Sedimentarios del Terciario-Cuaternario tobas y brechas semi-consolidadas, esta capa es la portadora de agua en el prospecto.

Coronando el gráfico a una profundidad de 90m hasta el tope de la perforación se encuentran depósitos de pie de monte, conformando los suelos, corresponden a materiales compactados como lo es el tepetate, material originado en el Neógeno.

5.4.1 Correlación Geofísica Punto 2, SEV's 1,2 y 3.

De acuerdo con la figura 5.2 se realizó tomando en cuenta la variación de las curvas de resistividad respecto a la profundidad del estudio, se detectaron dos anomalías contrastantes con resistividades bajas respecto a la roca que la circunda, por lo que se definieron como zonas con aporte de agua.

Debido a las resistividades bajas y que en la perforación exploratoria estas dos zonas el lodo rescatado perdió densidad y viscosidad, tornándose más acuoso; se modelaron y se determinó que constituyen a las zonas de escurrimiento y aporte de agua.

1.-La figura 4.10 modelo geoelectrico se realizó interpolando las resistividades verdaderas respecto de la profundidad de exploración utilizando el método de polinomio local, el resultado fue incorporado junto con los materiales recolectados de la perforación exploratoria; como resultado un gráfico geoelectrico.

Con la información geológica regional se detallan las diferentes unidades geoelectricas correlacionadas de acuerdo con las tablas de materiales 3.3 y 3.4, la distribución litológica se determinó a partir del análisis de muestras de mano extraídas en la perforación exploratoria y caracterizadas con la ayuda del Ing. Manuel Uribe Arriaga.

2.- En la figura 4.12 observamos diferentes áreas contrastantes entre sí, la primera zona contrastante se encuentra en la parte superior unidad Geoelectrica I se localizan resistividades importantes que oscilan desde los 70 Ω .m hasta los 100 Ω .m y están relacionadas a materiales muy compactos que conforman el suelo denominado "tepetate".

3.- En la parte media del gráfico 4.12 denominada Unidad Geoelectrica II contrasta una capa de resistividades bajas 5 Ω .m hasta los 20 Ω .m relacionadas a la zona de aporte de agua en contraste con los materiales conglomerados de origen volcánico,

tobas y material de arrastre; subangulosos y semi-compactados, con resistividades de 15 Ω .m a 40 Ω .m que prevalece en la zona de estudio.

4.-En la parte inferior de la figura 5.2 se observan contrastando entre sí dos capas geoelectricas; la primera con resistividades bajas de 1 Ω .m - 10 Ω .m y relacionadas al aporte de agua a una profundidad de 145 m; la segunda capa contrastante exhibe resistividades muy elevadas que oscilan entre 50 Ω .m hasta 100 Ω .m, relacionados a material compacto del tipo sedimentario. De acuerdo con información estratigráfica regional corresponde a la formación Mexcala, caliza compacta con nódulos de pedernal.

Capítulo VI

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Se definió la superficie freática para el punto SEV 1 a los 150 m de profundidad y para el punto SEV 2 se calculó a 70 m, con la perforación exploratoria en el punto SEV 2 el nivel freático se perforó a los 72 m de profundidad.

Con la aplicación de Sondeos eléctricos Verticales en la comunidad de Pazoltepec se identificaron tres unidades geoeléctricas en el Punto 2, la unidad geoeléctrica I de espesor de 0 a 30 m y resistividades de 70-100 Ωm interpretada en la parte superior como suelo arcilloso semicompacto y a profundidad como toba dacítica del Cuaternario y travertino o tepetate y suelo del Neógeno.

Se identificó como material vulcanoclástico y fluvial de Terciario-Cuaternario la Unidad geoeléctrica II de color amarillo, con espesor de 30 a 70 m de profundidad y con resistividades que oscilan entre los 20 a 70 Ωm .

A una profundidad de 70-150 m se localizan resistividades de 5-20 Ωm que son muy bajas y contrastantes respecto a la unidad geoeléctrica II, corresponde a material aluvial de origen vulcano-sedimentario, arenisca-conglomerado, toba calcárea y productos lávicos del Mioceno-Plioceno, materiales sueltos con alta porosidad y permeabilidad, debido a que se trata de materiales de pie de monte, subangulosos y reclasificados en guijas y guijarros mayores a 2 cm de diámetro.

A 145 m de profundidad se definió la formación Mexcala del Cretácico Superior, roca caliza masiva y compacta, grano fino e inclusiones de pedernal, la cual dio fin a la perforación exploratoria debido a la dureza del material y porque dicha formación se trata de la roca sello del acuífero.

6.2. Recomendaciones

Realizar registros geofísicos de pozos convencionales (potencial espontáneo y resistividad), para definir la naturaleza de las formaciones, identificar las formaciones productoras de agua y definir las secciones ranuradas o lisas de la tubería.

Realizar sondeo de video para identificar las formaciones de roca con aporte de agua, identificar la naturaleza litológica y estructural de la perforación, y discernir las secciones ciegas y ranuradas de la tubería.

Se recomienda realizar la entubación del pozo de manera inmediata debido a los derrumbes y a la dinámica de esfuerzos en la roca perforada.

Realizar aforo del pozo mínimo de 48 horas para definir los rendimientos mínimos y máximos de caudal.

Realizar diseño del equipamiento del pozo, bomba, tubería y subestación eléctrica para la operación del pozo y aprovechamiento de agua.

Realizar métodos de exploración de aguas subterráneas de amplio alcance como los TEM y TDEM para definir estructuras a profundidades superiores a los 300 m del acuífero en el valle de Pazoltepec.



Mapa 6.1 Área de perforación

Capítulo VII

7.1 Referencias bibliográficas

- Barboza-Gudiño, J.R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías, P.R., (2004). Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 21(3), 299-319.
- Böse, E., (1899). Geología de los alrededores de Orizaba; con un perfil de la Vertiente Oriental de la Mesa Central de México: Boletín del Instituto Geológico de México, 13, 52 p.
- Cantos Figuerola, J., (1972). Tratado de geofísica aplicada (p 391-419). Librería de Ciencia e Industria.
- CONAGUA, (1992). Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla. DOF. Ciudad de México.
- CONAGUA, (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Tecamachalco, estado de Puebla. Ciudad de México.
- CONAGUA, (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tecamachalco (2101), Estado de Puebla. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México.
- Cserna, Z. de, Ortega-Gutiérrez, F., Palacios-Nieto, M., (1980). Reconocimiento geológico de la parte central de la cuenca del alto Río Balsas, Estados de Guerrero y Puebla: Libro guía de la excursión geológica a la parte central de la cuenca del Alto Río Balsas, estados de Guerrero y Puebla, en V Convención Geológica Nacional: México, D.F., Sociedad Geológica Mexicana, 33 p.
- CUPREDER, BUAP. Atlas de riesgos del municipio de Tecamachalco, Puebla.2011 (pp 13-29). SEDESOL, Ciudad de México.

- Díaz, E., (2010). Implementación del código ZONDRES2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D. (pp 6, 10, 11, 12). Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Domínguez, E., (2005). Geoquímica del acuífero de Tecamachalco, Puebla. Tesis doctoral. (pp 57, 67, 82). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Eguiza, M., (2001). Geometría y cinemática del Arco estructural Tecamachalco-Tehuacán-Calipam. Tesis de Licenciatura. (pp 84). ESIA, Instituto Politécnico Nacional.
- Esudillo O., (2013). Adaptación de datos de sondeos eléctricos verticales para obtener imágenes eléctricas 2D. (pp.13, 19, 20, 21). Tesis de Lic. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fries, C. Jr., (1960). Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región centro meridional de México: Boletín del Instituto de Geología, 60, 236 p.
- Gama, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. (pág.133-145). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v59n1/1405-3322-bsgm-59-01-133-s1.pdf> el día 20/03/2019
- Imlay, R.W., (1936). Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico. Part IV Geology of the Western part of the Sierra de Parras: Geological Society of America Bulletin, 47(4), 1091-1152. <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/CuestadelCura.pdf> (recuperado el 17/02/2019)
- INEGI, (2014). Sistemas de Información Geográfica. SEGOB. Ciudad de México.
- Keller G.V. and Frischknecht F.C., (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Loke, M.H., (1994). The inversion of two-dimensional resistivity data. Un publ. PhD thesis, Un. Of Birmingham.
- López, A. (2004, 4 noviembre). La tomografía geoelectrica como herramienta de diagnóstico ambiental del subsuelo. Estructuplan. <https://estrucplan.com.ar/la->

tomografia-geoeléctrica-como-herramienta-de-diagnostico-ambiental-del-subsuelo/

- López-Doncel, R., Hernández-Torres, C. A., (2006). Estudio petrográfico-microfacial de una secuencia atípica de la Formación Cuesta de Cura en la Cuenca Mesozoica del centro de México: *Geos*, 26(1), 137-140.
- Lowrie, W., (2006). *Fundamentals of geophysics* (p 252). Second ed. Cambridge University Press. McGraw Hill.
- Martínez, H. (2001) .Informe de la carta Geológico-minera Orizaba E14-6, escala: 1:250,000. (pp 88).Consejo de Recursos Mineros. Pachuca, Hidalgo, México.
- Chelotti, L., Acosta, N., (2018). Métodos de Inyección de Corriente Eléctrica. Cátedra de Geofísica Aplicada, U.N.P.S.J.B. Chubut, Argentina.
- Orellana E., (1972). *Prospección Geoelectrica en corriente continua*. (p. 24 – 72) Paraninfo, segunda edición, Madrid, España,
- Palomino, I. (2014). Unidad Litoestratigráfica Formación Tehuacán. Servicio Geológico Mexicano. Pachuca, Hidalgo, México.
- Pineda, E., (2012).Uso de los sistemas de información geográfica en la ingeniería civil (p.13, 20, 22, 25).Tesis de Lic. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sheriff, R., (1991). *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics* (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Stinnesbeck, W., (1983), Sobre una faunula de amonites de la Formación Cuesta del Cura (Albiano superior Cenomaniano inferior) de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México: *Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León*, 8, 129-132.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., (1976). *Applied geophysics* (p 632-701). Cambridge University Press.
- Tenorio, F., (2008). *Avalancha de escombros del Pleistoceno tardío Cono los pies, complejo volcánico Iztaccíhuatl*. Tesis de Maestría. (pp29-75). Instituto Politécnico Nacional.

- Orellana, E., (1982).Prospección Geoeléctrica en corriente continua, (p.115-117), 2da edición corregida y ampliada. Paraninfo, Madrid, España, 1982.
- De Jesús, M., (2016).Tesis de Licenciatura. Caracterización y determinación del volumen del material presente en los bancos 2 y 3 del llamado Cerro Prieto en el ejido de Balzapote, San Andrés Tuxtla, Ver., Mediante la técnica de Sondeos Eléctricos Verticales.BUAP.Puebla,México.2016.