



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería

Colegio de Geofísica

Tesis

**Que para obtener el título de Licenciada en Ingeniería en
Geofísica**

Presenta:

Andrea Rosales Domínguez

**Caracterización geofísica somera de una zona
arqueológica mediante tomografía eléctrica resistiva,
en el cerro de Amalucan, Puebla**

Director de tesis

M.C. Julio César González Hernández

Septiembre 2021



BUAP

Oficio No. SAC/1098/2021

C. ANDREA ROSALES DOMINGUEZ
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
GEOFÍSICA
Presente.

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

“CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA SOMERA DE UNA ZONA ARQUEOLÓGICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA, EN EL CERRO DE AMALUCAN, PUEBLA.”

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

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

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 01 de junio de 2021

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



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

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

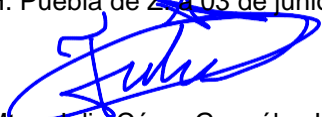
El que suscribe: Mtro. Julio César González Hernández, asesor interno del tema de tesis:

“CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA SOMERA DE UNA ZONA ARQUEOLÓGICA
MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA, EN EL CERRO DE AMALUCAN,
PUEBLA.”

Presentada por la C. Andrea Rosales Domínguez, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/1098/2021 con fecha de emisión 01 de junio de 2021, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

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

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. A 03 de junio de 2021



Mtro. Julio César González Hernández
Asesor de tema

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

Agradecimientos

A mi mamá:

Irene, por todo el amor, comprensión y cuidados que siempre me has proveído, pero sobre todo por alentarme a cumplir con mis metas, responsabilidades y sueños. Gracias por darme una palabra de aliento cuando la necesito, un abrazo cuando lo requiero y sobretodo felicidad, aun cuando no la espero.

A mi hermana:

Cris, por ser un ejemplo para mí en las situaciones más inesperadas de la vida, por ser mi compañera, cómplice y mejor amiga. Por todos esos consejos y lecciones, por todos esos bailes y momentos que aún nos quedan por compartir.

A mi papá:

Arturo, por ser el mejor maestro que Dios me pudo haber concedido, por seguir enseñándome a pesar de todas las adversidades y circunstancias de la vida.

A mi familia:

Inla y Ricardo, por abrirnos las puertas de su casa para convivir, pelear y reír, pero sobre todo para cuidarnos y amarnos mutuamente.

Domínguez y Rosales, por apoyarnos a las tres, enseñarme cuán lejos se puede llegar con determinación y trabajo duro, este logro también es de ustedes.

A mis amigos:

Sara y Bris, por compartir tantas cosas en común, por resolver dudas tanto académicas como existenciales, pero sobre todo por llegar hasta este punto culminante conmigo compartiendo todos los momentos que pasamos juntas.

Sonia, Micaela, Lourdes y Tubas, por estar siempre presentes a pesar de la distancia o el lugar, por siempre proponer reencuentros y seguir en contacto a pesar de tantos años.

A mis compañeros de generación y generaciones allegadas, por las enseñanzas y debates, por todos los gratos momentos compartidos a lo largo de estos años.

A mi tutor:

Maestro Julio, gracias por ser una guía en este camino tan insólito que es la universidad, gracias por su paciencia y tiempo al revisar y dar forma a este proyecto desde el inicio.

Al jurado de tesis:

Por compartir sus conocimientos a lo largo de esta carrera universitaria y por tomarse el tiempo de revisar este proyecto, así como también por su asesoría con la manipulación de los programas usados en este proyecto.

A mi alma máter:

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en particular a la Facultad de Ingeniería y colegio de Geofísica, por ser un segundo hogar para mí y darme la oportunidad de convertirme en profesionista. También por brindarme las herramientas para poder llevar a cabo esta meta.

Y por último, al arqueólogo Arnulfo Allende, que me brindó información y la oportunidad de realizar este estudio, facilitando la colaboración con el Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Gracias a todos y cada uno de ustedes por enseñarme, guiarme e inspirarme.

Tabla de Contenido

Agradecimientos.....	I
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	4
Resumen	5
Abstract.....	7
Capítulo 1: Introducción.....	9
Planteamiento del problema.....	10
Justificación	10
Objetivos.....	11
General.....	11
Específico	11
Antecedentes.....	11
Geofísica aplicada a la arqueología	14
Antecedentes arqueológicos de la zona	18
Capítulo 2: Ubicación y Geología	21
Localización de la zona de estudio	21
Geología de sitio	22
Provincia fisiográfica	24
Provincia local: División de la Zona y Tipos de Suelo.....	26
Capítulo 3: Marco Teórico	28
3.1 Fundamentos de prospección eléctrica	28
3.2 Conceptos y ecuaciones generales	28
3.2.1 Intensidad de corriente eléctrica	28
3.2.2 Voltaje.....	29
3.2.3 Resistencia	29
3.2.4 Resistividad	30
3.2.5 Campo eléctrico.....	32
3.2.6 Ecuaciones de Maxwell	33
3.3 Fundamentos teóricos de la medición de resistividades	35
3.3.1 Arreglo electródico.....	35
3.3.2 Factor Geométrico.....	37
3.3.3 Teoría del arreglo electródico	37
3.3.4 Resistividad en función del arreglo.....	38

3.3.5 Inversión de datos	39
3.3.6 Mínimos cuadrados	41
3.3.7 Factor de Suavizamiento	43
Capítulo 4: Instrumentación y Metodología de campo	44
4.1 Equipo utilizado.....	44
4.1.1 Resistivímetro.....	44
4.1.2 GPS	45
4.1.3 Material auxiliar y kit de campo	45
4.2 Procesamiento de datos	47
Capítulo 5: Resultados	51
5.1 Interpretación	55
5.2 Litología	56
Visualización en planta y 3D de las tomografías y correlación con mapa de anomalía magnética	58
5.3 Correlación con prospección magnética.....	59
Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones	63
6.1 Conclusiones.....	63
6.2 Recomendaciones.....	64
Bibliografía.....	65
Anexos.....	68
Pasos de procesamiento	70
Tablas de Referencia	72

Índice de Figuras

FIGURA 1. PARTE EXPUESTA DE LA SUPUESTA PIRÁMIDE EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	19
FIGURA 2. UBICACIÓN DEL CERRO DE AMALUCAN, QUE RECIBE EL NOMBRE DE “PARQUE CERRO DE AMALUCAN” (GOOGLE EARTH, 2020).....	21
FIGURA 3. PUNTO CENTRAL DEL PARQUE DE AMALUCAN CON VISUALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE MEDICIÓN DE CAMPO (GOOGLE EARTH, 2020).	22
FIGURA 4. EXTRACTO DE LA CARTA GEOLÓGICA DE PUEBLA QUE MUESTRA EL CERRO DE AMALUCAN Y SUS ALREDEDORES CON LA RESPECTIVA GEOLOGÍA DEL ÁREA CON LA SIMBOLOGÍA DE ROCAS ÍGNEAS Y SEDIMENTARIAS EXISTENTE EN LA ZONA DE ESTUDIO SEGÚN LA CARTA GEOLÓGICO MINERA E13-B43 (INEGI, 1985).....	23
FIGURA 5. PROVINCIA FISIAGRÁFICA DE PUEBLA. LOS PUNTOS MUESTRAN LA RECOLECTA DE CAMPO Y LA REVISIÓN DE CATÁLOGOS DE COLECCIONES CIENTÍFICAS (INEGI, 1987).....	24
FIGURA 6. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA FVTM (INEGI, 2019).....	25
FIGURA 7. SIMBOLOGÍA DE LOS SUELOS EXISTENTES EN LA ZONA DEL CERRO DE AMALUCAN (INEGI, 1985).....	26
FIGURA 8. ARREGLO CONVENCIONAL DE CUATRO ELECTRODOS PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD DEL SUBSUELO (LOKE, 1999).	35
FIGURA 9. ARREGLOS MÁS COMUNES USADOS EN RESISTIVIDAD Y SUS FACTORES GEOMÉTRICOS (LOKE, 1999).	36
FIGURA 10. ARREGLOS MÁS COMUNES USADOS EN RESISTIVIDAD Y SUS FACTORES GEOMÉTRICOS (IRIARTE SIERRA, 2011)	37
FIGURA 11. CONFIGURACIÓN ELECTRÓDICA WENNER-SCHLUMBERGER (IRIARTE SIERRA, 2011).....	39
FIGURA 12. PSEUDOSECCIÓN DE RESISTIVIDAD APARENTE CALCULADA DE LA TOMOGRAFÍA 1.....	40
FIGURA 13. PSEUDOSECCIÓN DE RESISTIVIDAD APARENTE MEDIDA DE LA TOMOGRAFÍA 1.....	40
FIGURA 14. IMAGEN DEL MODELO INVERSO DE RESISTIVIDAD DE LA TOMOGRAFÍA 1	40
FIGURA 15. MODELO DE RESISTIVÍMETRO SARIS	44
FIGURA 16. CARATULA DE GPS MAGELLAN [®] (GOOGLE, 2020).....	45
FIGURA 17. PUNTOS DE INICIO Y FIN DE CADA LÍNEA PARA PROSPECCIÓN ELÉCTRICA (GOOGLE EARTH, 2020).....	46
FIGURA 18. IMAGEN DE LA VENTANA PARA EXTERMINAR LOS PUNTOS MALOS DE LA TOMOGRAFÍA 1	49
FIGURA 19. IMAGEN DE LA VENTANA FINAL DE RES2DINV [®] CON EL MODELO DE RESISTIVIDAD PARA LA TOMOGRAFÍA 1	50
FIGURA 20. IMAGEN DEL MODELO INVERSO DE RESISTIVIDAD DE LA TOMOGRAFÍA 1, CON ORIENTACIÓN NOROESTE.....	51
FIGURA 21. IMAGEN DE LA TOMOGRAFÍA DE LA LÍNEA 1 CON LA TOPOGRAFÍA DE LA MISMA	51
FIGURA 22. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES GEOELÉCTRICAS DE LA TOMOGRAFÍA 1	52
FIGURA 23. IMAGEN DEL MODELO INVERSO DE RESISTIVIDAD DE LA TOMOGRAFÍA 2, CON ORIENTACIÓN SUROESTE.....	53
FIGURA 24. IMAGEN DE LA TOMOGRAFÍA DE LA LÍNEA 2 CON LA TOPOGRAFÍA DE LA MISMA	53
FIGURA 25. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES GEOELÉCTRICAS DE LA TOMOGRAFÍA 2	53
FIGURA 26. SECCIÓN LITOLÓGICA A PARTIR DE LA TOMOGRAFÍA 1	56
FIGURA 27. SECCIÓN LITOLÓGICA A PARTIR DE LA TOMOGRAFÍA 2	56
FIGURA 28. SECCIÓN LITOLÓGICA A PARTIR DE LA TOMOGRAFÍA 1 CON ANOTACIONES.....	57
FIGURA 29. SECCIÓN LITOLÓGICA A PARTIR DE LA TOMOGRAFÍA 2 CON ANOTACIONES.....	57
FIGURA 30. UBICACIÓN DE AMBAS TOMOGRAFÍAS EN LA ZONA DE ESTUDIO CON VISTA AÉREA DE LA ZONA	58
FIGURA 31. VISUALIZACIÓN FRONTAL DE LA INTERSECCIÓN DE AMBAS TOMOGRAFÍAS A PROFUNDIDAD A PARTIR DE LA SUPERFICIE	58
FIGURA 32. VISUALIZACIÓN POSTERIOR DE LA INTERSECCIÓN DE AMBAS TOMOGRAFÍAS A PROFUNDIDAD A PARTIR DE LA SUPERFICIE	59
FIGURA 33. MAPA DE ANOMALÍA MAGNÉTICO CON LA ZONIFICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO (GARCÍA AGUILAR, 2021).....	59
FIGURA 34. VISUALIZACIÓN EN PLANTA DE LA SOBREPOSICIÓN DEL ESTUDIO MAGNÉTICO CON EL ESTUDIO ELÉCTRICO (AMBAS TOMOGRAFÍAS) EN LA MISMA ZONA.....	60
FIGURA 35. VISUALIZACIÓN DEL ESTUDIO ELÉCTRICO Y EL ESTUDIO MAGNÉTICO EN LA MISMA ZONA DE MEDICIÓN	61

Índice de Tablas

TABLA 1. RESISTIVIDAD DE ALGUNAS ROCAS Y MINERALES (AUGE, 2008)	31
TABLA 2. PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE DATOS POR PERFIL ELÉCTRICO	46
TABLA 3. MUESTRA DE TABLA PARA PROCESAMIENTO DE DATOS SEGÚN EL TIPO DE ARREGLO, CON LOS DATOS ESPECÍFICOS DE ESTE ESTUDIO PARA LA LÍNEA 1 DE MEDICIÓN.	47
TABLA 4. ASOCIACIÓN DE RESULTADOS ENTRE RESISTIVIDAD Y LITOLOGÍA	51
TABLA 5. TABLA DE DATOS TOTALES DE LA MUESTRA PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS SEGÚN EL TIPO DE ARREGLO (TABLA 3).	70
TABLA 6. MUESTRA DE CÓMO INTRODUCIR LOS DATOS PARA EL PROCESAMIENTO CON TOPOGRAFÍA EN SURFER [®]	71
TABLA 7. RESISTIVIDADES MÁS COMUNES DE VARIAS ROCAS, MATERIALES Y AGUA (ORELLANA & MOONEY, 1966)	73
TABLA 8. RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS (TELFORD W. M., 1976)	74
TABLA 9. TABLA DE RESISTIVIDAD DE MATERIALES EN CORTE GEOELÉCTRICO (REYES SERRANO, 2013)	74

Resumen

La presente investigación tiene lugar en el cerro de Amalucan, en la ciudad de Puebla, donde se encuentra ligeramente expuesto un vestigio de construcción antigua, que sugiere la presencia de una zona arqueológica y que aparentemente se vio afectada con los trabajos de construcción para la instauración de un parque recreativo en el sitio. Estas labores así como las actividades de excavación que se tienen contempladas para descubrir por completo la estructura, podrían ocasionarle un deterioro mayor.

Gracias a la geofísica, se pudo delimitar la profundidad de dichas estructuras y el tipo de material del que están constituidas, sin invadir o dañar algún vestigio de la misma. En particular, mediante la técnica de prospección eléctrica. A su vez, se hizo una correlación con un estudio de prospección magnética (García Aguilar, 2021), en la misma zona, para verificar la presencia de la estructura arqueológica y profundidad de la misma.

Con ayuda de los programas RES2DINV®, Surfer® y Voxler®, se realizaron secciones 2D de resistividad, con la finalidad de poder visualizar la profundidad de la estructura y el tipo de material de la que se conforma, auxiliándose de cartas geológicas de la zona de estudio.

La supuesta estructura arqueológica está cubierta por tobas de dos tipos: riolíticas y andesíticas, ubicadas principalmente desde la superficie y a una profundidad aproximada de 4 metros, con un cambio de material a esa profundidad. Mediante el material expuesto observado en la superficie y según las tablas de resistividad, se determinó que el material que subyace a las tobas corresponde a basaltos, muy comunes y ubicados a una profundidad a partir de los 4 metros.

Los resultados de la prospección eléctrica de este estudio demostraron que la estructura en el cerro alcanza una profundidad aproximada de 20 metros, compuesta de dos unidades geoelectricas con los materiales antes mencionados.

Los resultados de la prospección magnética con la que se correlacionó este estudio demuestran que hay un cambio de material a los 6 metros, cubriendo la porción somera visualizada en las tomografías eléctricas, asimismo se demostró que la zona arqueológica en realidad abarca el contorno del cerro en la zona de interés.

Ambos estudios presentan la visualización de los datos adquiridos en campo de la estructura.

Abstract

The present research takes place in the Amalucan hill, in the city of Puebla, where a vestige of ancient construction is slightly exposed, which suggests the presence of an archaeological zone which apparently was affected for the establishment of a recreational park in the zone. These situation, as well as the excavation activities that are contemplated to discover the structure, could also cause further damage.

Due to geophysics, it was possible to delimit the depth of these structures and the type of material they are made of, without invading or damaging any vestige of archeological structure; what was addressed in this research, through the electrical prospecting technique. Additionally, a correlation was made with a magnetic prospecting survey (García Aguilar, 2021), at the same area to verify the presence of the archaeological structure and its depth.

With the RES2DINV®, Surfer® and Voxler® softwares, 2D resistivity sections were made, in order to be able to visualize the depth of the structure and the type of material from which it is formed, using geological information of the survey zone.

This archaeological structure is covered by two types of rocks: rhyolitic and andesitic, principally located from the top of the shallow level and at a depth of approximately 4 meters, with a change of material in that depth. Through the visual exposed material and according to the resistivity tables, it was determined that the material underlying the tuffs corresponds to basalts, very common and located from 4 meters depth.

The results of the electrical prospecting showed the structure on the hill reaches an approximate depth of 20 meters, composed of two geoelectric units with the materials mentioned before.

The results of the magnetic survey with which this study was correlated shows that there is a change of material at 6 meters, which is covering the shallow

portion visualized in the electrical tomographies, it was also demonstrated that the archaeological zone actually covers the hill contour in the survey area.

Both studies present the visualization of the data acquired in the field of the structure.

Capítulo 1: Introducción

A consecuencia de los trabajos de habilitación del parque recreativo en el cerro de Amalucan, en el estado de Puebla en el año 2018, se descubrieron accidentalmente elementos de construcción que aparentemente exponen rasgos arquitectónicos que corresponderían a una estructura arqueológica. Posteriormente, mediante trabajos de excavación realizados por parte del INAH, fue confirmado que podría tratarse de una zona arqueológica, ubicada en el cerro, motivo por el cual se optó por construir el parque recreativo en una zona más baja respecto a su ubicación inicial (Allende, 2019).

Debido a estos labores, las estructuras corren el riesgo de que al ser expuestas se desgasten y debiliten aún más de lo que ya se encuentran, por ello, el uso de los métodos geofísicos en la zona son adecuados, ya que disminuyen dicho riesgo por ser métodos no invasivos, lo que permite conocer la forma de la estructura sin dañar la misma, para futuras excavaciones y conocer donde se debe de hacer esto exactamente.

Los métodos geofísicos tienen un uso extenso para la arqueología, depende del objetivo de la zona, pero generalmente agilizan el tiempo de estudio del área, facilitan la toma de datos para hacer modelos que muestran cómo están las estructuras internas y cómo es que se pueden abordar para su exposición sin el riesgo de dañar a la misma. Existen factores a considerar, como los responsables de llevar a cabo las excavaciones, la ubicación de la zona, el tiempo y el recurso económico que se invertirá en el estudio, según sea el caso, pero los beneficios a futuro son más eficientes que con métodos antiguos.

La caracterización geofísica puede prevenir daños estructurales si es que se ejecuta de manera adecuada con la parte arqueológica de excavación, entre más precisos sean los datos tomados en campo, más precisos serán los modelos, y a su vez, la explicación será mejor para determinar la ubicación de la estructura y conocer los puntos fuertes y débiles que hay en el lugar.

Con el fin de complementar y precisar el estudio de la zona, se hará una correlación de métodos geofísicos, esto con el método de prospección eléctrica, que se empleará para conocer la profundidad de la estructura de estudio y el tipo de material que tiene dicha estructura. El estudio a correlacionar será de prospección magnética, que se realizó en el mismo día y en la misma zona, y que aportará a la investigación la visualización de la profundidad que mostraría un cambio de material en la zona y a su vez, reafirmará la presencia de la estructura.

Esta investigación sentará un precedente de la zona para que en un futuro, si se desea descubrir por completo la estructura, se sepa exactamente donde hacerlo a fin de evitar daños, asimismo, proponer las zonas adecuadas para la continuación de la investigación geofísica. Esto también ayuda a la estimación de la inversión de recursos económicos y tiempo de excavación.

Planteamiento del problema

Los trabajos de arqueología siempre han sido muy riesgosos para las estructuras a estudiar, esto debido, principalmente, a que en los trabajos de excavación en campo generalmente se echa mano de herramientas y técnicas, que muchas veces pueden ser perjudiciales para la conservación de las estructuras, dado que por no tener conocimiento exacto de la ubicación de los supuestos hallazgos, suelen dañar e incluso destruir los vestigios de interés.

Justificación

Las técnicas geofísicas otorgan la oportunidad de determinar cómo está compuesto el subsuelo, la ubicación espacial de las estructuras enterradas, forma y composición de las mismas, todo esto, sin dañar, alterar o modificar la naturaleza de la estructura actual; dando así, una gran ventaja con respecto al trabajo de campo convencional en la arqueología.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se opta por la exploración geofísica ya que emplea técnicas no invasivas, pues con la adquisición de datos por medio de la prospección eléctrica, en su modalidad de tomografía eléctrica de

resistividad (TER), se obtendrán modelos que permitan caracterizar el subsuelo, teniendo también en cuenta la información geológica de la zona, a fin de obtener interpretación mayormente acertada.

Objetivos

General

Caracterizar la posible estructura arqueológica en el cerro de Amalucan, a partir de mediciones de resistividad eléctrica con el método de TER en el área, para determinar la profundidad a partir de la que se manifiesta el tipo de material que la conforma.

Específico

- Determinar la profundidad de la estructura arqueológica, por medio de los datos obtenidos, para proveer información de utilidad a los trabajos de excavación.
- Interpretar los resultados obtenidos, con base en valores típicos de resistividad establecidos, considerando además los antecedentes geológicos del sitio, para caracterizar la composición de la estructura.
- Confirmar la presencia de un cuerpo por medio de la correlación con prospección magnética y enfatizar la relación de profundidad entre ambos estudios.

Antecedentes

Cuando el ser humano busca conocimiento acerca del pasado de sí mismo y de su cultura, recurre a dos vías principales: la antropología física, como la “ciencia que trata de los aspectos biológicos del hombre”, y a la arqueología, como la ciencia que “estudia los restos materiales producidos por el hombre”. Estas son ciencias que se caracterizan por ser disciplinas complejas, ambas con el objetivo de conocer integralmente el pasado (García Moll, 2010). En México, la arqueología comienza antes de que esta se defina como “disciplina científica”, con estudios sobre el pasado prehispánico en Xochicalco en el año

1971 (Nalda, 1998). En este estudio se habla de la existencia de terrazas y fosos en el sitio, lo cual llevo a Xochicalco a verse como una fortificación, permaneciendo esa idea por los hallazgos en la excavación posterior del sitio.

Los trabajos fueron avanzando poco a poco desde 1792, con trabajos similares al de Antonio de León y Gama, quien en ese año publicó un análisis iconográfico de dos monolitos de la cultura mexicana (Nalda, 1998), sin embargo, las investigaciones se quedaban con muchas incógnitas ya que no había los medios para responderlas, pero sentaba el precedente para su futuro reconocimiento. Se realizaron muchas exploraciones en la época que posicionaron a la arqueología como ciencia en México, en lugares como Mitla, Teotihuacán y con el descubrimiento de la tumba 7 en Monte Albán, en Oaxaca, cuando el antropólogo Alfonso Caso Andrade y su equipo hallaron numerosos objetos de oro, piezas trabajadas en hueso o turquesa y cráneos adornados, esto a principios del siglo XX (INFOBAE, 2021).

Antiguamente, la arqueología se valía únicamente de técnicas que hacen análisis y trabajos por especialistas de la rama, como arqueólogos, antropólogos pero también por etnólogos, químicos, físicos, en ocasiones hasta astrónomos, entre otros más (Pérez & Santillan, 2019). Todos estos especialistas tienen una labor distinta dependiendo de los trabajos que requiere la zona, puesto que, a veces no se sabe realmente lo que se está viendo. Según Bernardo Fahmel (2019), es necesario tener vocación e interés para ver más que solo piedras.

Por ejemplo, la arqueoastronomía es la mezcla de dos ramas que tiene como fin comprender como la astronomía influencia y participa en el desarrollo de las culturas en la antigüedad y la actualidad, esto según el doctor Jesús Galindo Trejo, investigador titular de la UNAM, quien en 2009 realizó investigaciones para sitios en la Huasteca y el centro de México, donde desde el punto de la cosmovisión, analizó la estela labrada más grande de Mesoamérica.

Una de las técnicas que también se usó mucho en la antigüedad en distintas zonas arqueológicas en México fue la de la cal, la cual se basa en su

identificación² y uso en las construcciones antiguas de conjuntos arquitectónicos completos. El óxido de calcio hidratado también se encontró en obras civiles y religiosas, así que, el motivo de revitalizar la cal ayuda a conservar el patrimonio y consolidar los recubrimientos agrietados para adherir materiales (INAH, 2010). La técnica fue usada en Yucatán, como técnica pionera, para posteriormente usarse en zonas de Oaxaca y Teotihuacán (Pérez & Santillan, 2019).

En sí, la arqueología toma como pauta las asociaciones de la estratigrafía natural y cultural como preámbulo, por ejemplo: “los enterramientos y las tumbas son evidencias materiales de un acto social concreto ligado al ritual de la muerte en una época dada” (García Moll, 2010); no importando los detalles sabidos o no, de las creencias y si es que corresponde, las ceremonias. La presencia de elementos arqueológicos se han perdido tanto por saqueos como por causas naturales, esto se ve representado por la escultura prehispánica en el área norte de Guerrero, con cinco esculturas provenientes de la población de Ichcateopan de Cuauhtémoc, donde tres de ellas fueron conservadas en el poblado, una de ellas fue llevada al Museo Nacional de Antropología de la Ciudad de México y la última fue saqueada de su repositorio conocido (Medina Martínez & Berrera Rodríguez, 2012). Otro factor importante a considerar es la diversidad de restos en el ambiente, ya sean frutos, restos de madera o algún mineral, hojas o material botánico.

Según sea el contexto, se deben de preservar los signos de cada ritual, por lo tanto, con las técnicas y los métodos adecuados es posible resaltar la importancia de la definición en cuanto al tiempo. Así que, la excavación no solo es para descubrir las zonas y extraer objetos, es indispensable para poder conservar y llevar un registro de los detalles del hallazgo y de su entorno, para su ubicación en el espacio y tiempo (García Moll, 2010).

Por este motivo, la zona de estudio es ideal para una relación entre ciencias arqueológica y geofísica, lo que ayuda también a fortalecer colaboraciones entre instituciones, para este caso en específico entre el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) y la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

(BUAP), pues el presente estudio contribuye a la exploración arqueológica de sitios potenciales en el estado de Puebla. Esta colaboración se da a partir de la necesidad de los estudiantes de buscar dónde aplicar los métodos aprendidos, pero también de que se estudien lugares de asentamientos potenciales que no cuentan con la tecnología para no destruir el sitio mismo.

Para la arqueología, los métodos geofísicos son de gran utilidad, ya que al ser métodos que no afectan las edificaciones y estructuras, tanto subterráneas como superficiales, se manifiestan como ideales para delimitar estas zonas, conocer su estructura, e incluso con ello, inferir su historia. También, en el ámbito científico, puede proporcionar un precedente para determinar si es que se explota a futuro un área o se descarta, esto al refutar hipótesis creadas para cada zona que a veces se piensa que poseen potencial de desarrollo.

Según Argote (2002), los métodos de fotografía aérea e imágenes por satélite representan métodos que los arqueólogos suelen utilizar para obtener ciertos rasgos del suelo y de las áreas a estudiar. Aunque al principio hubo incertidumbre si es que estos funcionarían, lo que se ha podido descubrir y redescubrir a partir de estas es un avance significativo en el detalle de la zona y cómo es posible explorarse. Por ejemplo, los estudios realizados en la gran pirámide y la Esfinge, tomados por el satélite IKONOS, muestran imágenes de 1 metro por pixel en gran resolución. Podría suponerse que ya están descubiertas en su totalidad, pero la visualización de su contorno y forma desde otra perspectiva es importante para la descripción de un nuevo estudio, por ejemplo, con un método geofísico.

Geofísica aplicada a la arqueología

La prospección geofísica se caracteriza por utilizar técnicas no destructivas y es relativamente ágil, por lo tanto, en las zonas en las que se requiere de una rápida caracterización o en las que no pueden realizarse excavaciones, por diferentes problemas como los de tipo patrimonial, suelen ser estudiadas y

modeladas por métodos geofísicos, para evitar una posible pérdida de información importante y el deterioro de las estructuras arqueológicas (Argote Espino, 2002).

La geofísica y la arqueología son ciencias que desde hace algunas décadas se han empleado en conjunto, sin embargo, los estudios que se han realizado terminan siendo confidenciales como en el caso de Andalucía, donde se usan múltiples estudios geofísicos como gravimétrico, magnético, eléctrico, sísmico y electromagnético, con el fin de encontrar yacimientos arqueológicos, pero gran parte de la investigación geofísica aplicada a la arqueología es investigación contratada, que en la mayoría de los casos tiene cláusulas de confidencialidad, que van de tres hasta diez años, por lo cual, cuando podría ser novedoso termina siendo perdido en la actualidad por ser publicado un estudio semejante o solo ser publicada una parte de la investigación. Algunos de los trabajos se usan para resolver algún problema puntual y, generalmente, no queda constancia de la intervención (Peña, 2011).

No obstante, existen estudios que preceden la importancia de su uso en conjunto, como lo fue en 2005 en España, donde se tenía como objetivo catalogar hasta dónde ha llegado la colaboración entre geofísica y arqueología y el cómo la utilización de los métodos geofísicos es más eficiente porque no perturba los registros, hace que bajen los costos y que aumente la precisión de toma de datos o muestras.

Como se mencionó en la sección anterior, la arqueología tomó en principio los métodos de fotografía aérea e imágenes satelitales para detallar los estudios con más precisión. Según Carreras (2005), muchos satélites de imágenes multiespectrales han sido desarrollados para el uso arqueológico porque aportan más información, que puede ser manipulable y digitalizada. Un ejemplo de esta aplicación fue en Guatemala, donde se usaron las imágenes de bandas espectrales para ubicar pantanos que estaban inundados estacionalmente en el norte del país. Esta investigación, uso la tecnología de sensores remotos para verificar hallazgos de sitios, caminos, canales y depósitos de agua que fueron usados en la antigüedad por los mayas (Server & Irwin, 2003).

Existen múltiples aplicaciones de la geofísica en arqueología, por ello, se destacan los métodos geofísicos que pueden diferenciar y distinguir situaciones y objetos como un estrato con artefactos arqueológicos, o si los restos de una estructura de construcción son de piedra o ladrillo; como la reconocida Casa de las Águilas, un edificio parte del templo mayor de Tenochtitlan, donde se requería establecer desde la superficie la existencia de etapas constructivas enterradas pero respetando la integridad de los pisos así como obtener toda la información posible sobre el hallazgo de una estructura cívico ceremonial para su estudio arquitectónico. Se aplicaron estudios magnéticos y eléctricos, los cuales detectaron la presencia de acumulaciones de piedra volcánica bajo el piso (Barba, et all, 1998).

Estos métodos también ayudan a delimitar el contorno de un yacimiento o distinguir los hábitats subterráneos de depresiones geológicas, inclusive identificar el trazado de antiguas carreteras o la acumulación de conchas y huesos, suelos compactados o excavados por actividades humanas, de la misma forma, para identificar las distintas fases de un yacimiento con múltiples periodos de ocupación. Además, se pueden emplear incluso cuando la zona de estudio arqueológica se sitúa dentro de una zona urbana, por lo cual, es limitada su excavación (Brito Schimmel & Carreras, 2005).

En 2017, se realizó un estudio con técnicas de inducción electromagnética en el municipio de Victoria, en Caldas, en Colombia; donde había una zona con potencial de yacimiento arqueológico. Se tomaron las condiciones físicas del terreno, como microtopografía, temperatura y humedad para tener como resultado un perfil estratigráfico de suelos, para la correlación de variables geofísicas, estratigráficas y las características climáticas (Blandon, Meza, & Castañeda Salazar, 2018).

Con toda esta información como preámbulo, Argote Espino (2002) denomina una nueva técnica, que es usada como mezcla, en parte de arqueología y en parte de geofísica. A esta denominación se le conoce como arqueofísica, la cual, se propone para describir el uso de métodos geofísicos terrestres de alta

resolución para medir muchas propiedades físicas útiles en aplicaciones del mapeo arqueológico. Aunque el término prospección arqueológica es más usado en Europa para definir la técnica antes descrita, el término empleado mayormente entre los arqueólogos de Norte América es el de sensores remotos; el problema con este último término es que, para los geofísicos, los sensores remotos conllevan la idea del uso de aeronaves o satélites para obtener imágenes de la superficie terrestre. Por lo tanto, el término correcto y que será empleado será el de prospección arqueológica. (Argote Espino, 2002).

Según Argote (2002), los métodos eléctricos empezaron a ser utilizados inclusive antes que los métodos magnéticos para la arqueología, pero por ser un trabajo lento y tedioso, fueron descartados por imprácticos. En la actualidad el método de resistividad se ha modernizado y automatizado, lo que ha llevado a que la toma de datos sea más eficiente en cuanto a tiempo e información, sin embargo, la inversión de tiempo en cada estudio depende del equipo y el área a cubrir en la medición. En México, los primeros levantamientos geofísicos que se realizaron fueron para encontrar túneles, en Teotihuacán, en el estado de México. Se usaron varios métodos, entre ellos el eléctrico que sirvió para correlacionar con el método gravimétrico y el método magnético y así precisar la localización de los túneles.

Generalmente, los métodos eléctricos muestran de manera visual lo que se encuentra en el subsuelo. En un estudio en Los Tételes de Ocotitla, al noreste del estado de Tlaxcala, el método eléctrico se usó para determinar la distribución espacial de las estructuras arqueológicas no visibles, así como para determinar zonas potenciales para realizar excavaciones arqueológicas. Se lograron detectar cuatro zonas de interés con sus respectivas profundidades. Según López García (et al, 2019), el método geofísico eléctrico es un procedimiento no destructivo de procedimiento rápido, autosuficiente, útil para determinar la ubicación y la forma de las anomalías detectada desde la superficie del suelo.

Actualmente, los métodos geofísicos son de gran ayuda a estas situaciones, principalmente por las dimensiones de la región. Al aplicar las

prospecciones geofísicas a la arqueología, se evalúa la zona antes de comenzar la excavación y así medir su potencial de excavación, lo cual, estima el ahorro de tiempo y dinero que se va a invertir, dejando un mapa bien detallado del sitio (Carreras Monfort, 2000).

Antecedentes arqueológicos de la zona

Durante mucho tiempo, Amalucan ha sido una colonia importante de la ciudad de Puebla; que poco a poco ha ido ampliando su población, y en consecuencia su extensión territorial, pero sobretodo ha sorprendido con su historia.

Desde hace tiempo se cree que Amalucan fue parte de un asentamiento prehispánico, habitado desde aquellos tiempos remotos y que no deja de estarlo, esto según pobladores aledaños al cerro (Canizal, 2018).

Mediante un análisis arqueológico en la zona, se han podido encontrar estructuras que se presume están en forma de un conjunto ceremonial, formado con montículos de dimensiones considerables, y alrededor de una plaza en su cúspide. También, se encontraron lo que parece ser ofrendas, con vasijas y algunos objetos de piedra verde en sus laderas. La temporalidad aproximada de estos descubrimientos se determinó desde el 200 AC al 600 DC, justamente cuando Cholula logró su apogeo (García Huerta, 2018).

Además de dichos descubrimientos, en el año de 1863, el ejército francés estableció trincheras y parapetos para atacar la ciudad poblana en la falda poniente del cerro de Amalucan (El Universal, 2018), lo que indica que las actividades en las faldas del cerro eran intermitentes y existentes. De cierta forma, los sucesos en la zona han sido importantes e intermitentes, por esto y por el paso del tiempo, el gobierno del estado de Puebla, en conjunto con el Instituto Nacional de Antropología e Historia, iniciaron trabajos de exploración y restauración para su conservación, así mismo de todos los vestigios arqueológicos encontrados.

Con todos estos antecedentes, el antropólogo Víctor Hugo Valencia Valera, quien fue delegado del INAH en el año 2018, notificó que el sitio no estará abierto al público, a pesar de los hallazgos como ocurre con otras zonas arqueológicas, pues reiteró que muchas de las estructuras aún están bajo montículos de tierra; lo cual requiere de un presupuesto, esto para poder trabajar en el área, es decir, hacer las investigaciones y excavaciones pertinentes (Mirón, 2018).

Al mismo tiempo, se propuso la restauración de las áreas verdes del cerro, también la contención de reservas de agua para la temporada de secas, incluyendo un patrón de siembras y rescate de las especies de la zona (El Universal, 2018).



Figura 1. Parte expuesta de la supuesta pirámide en la zona de estudio

En la figura 1, se puede observar el material por el que estaría compuesta la supuesta estructura, pero principalmente, que con los trabajos de excavación, se afectó una parte que parece estar escalonada. Para mantener su forma aparente, los arqueólogos que participaron en el descubrimiento de la estructura, colocaron cemento en la parte superior, esto con

el fin de contener la estructura y para evitar algún deslave del material en la época de lluvias o por la acción del aire, para que en un futuro que se inicien los trabajos de excavación, se puedan guiar con la tendencia observada en la parte expuesta (Allende, 2019).

Según Myriam Arabián (2019), presidenta de la Comisión de Infraestructura y Obra Pública Municipal, las propuestas anteriores son un conjunto de esfuerzos de diferentes instituciones para un fin común, pues aunque está en el mismo cerro, el rescate de la construcción del parque Amalucan es independiente, ya que por el descubrimiento de la pirámide, está fuera del proyecto para instalar infraestructura y mobiliario en la zona.

Después de todas estas indagaciones y afirmaciones de expertos, se sobreentiende que la zona arqueológica es importante en la historia de la ciudad, pues presenta una similitud a la ya descubierta en Cholula, en el mismo estado de Puebla, y que podría ser expuesta al público en un futuro, sin embargo, tomaría alrededor de doce años su destape con el método tradicional de arqueología (Allende, 2019).

Capítulo 2: Ubicación y Geología

Localización de la zona de estudio

Como se ha mencionado anteriormente, el trabajo de campo se desarrolló en el cerro de Amalucan de la Heroica Puebla de Zaragoza, capital del estado de Puebla.



Figura 2. Ubicación del cerro de Amalucan, que recibe el nombre de “Parque Cerro de Amalucan” (Google Earth, 2020)

Las coordenadas de ubicación del Parque de Amalucan son 14590708 E y 2106408 N.

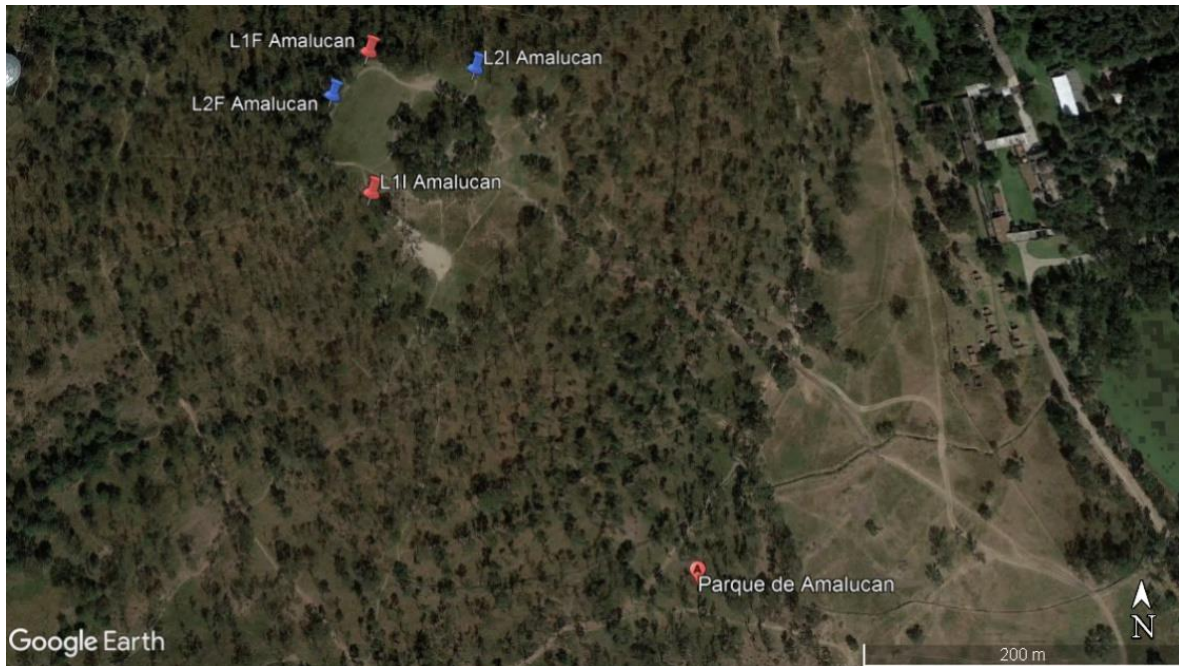
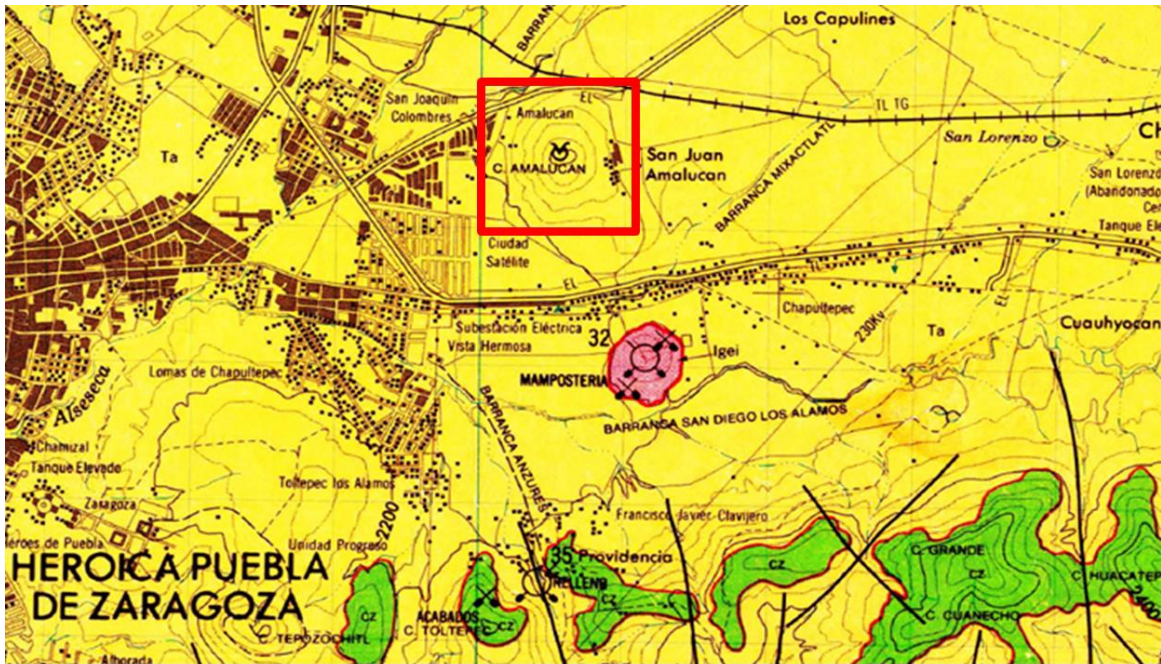


Figura 3. Punto central del Parque de Amalucan con visualización de las líneas de medición de campo (Google Earth, 2020).

Geología de sitio

En la historia geológica de Puebla encontramos predominantemente material volcánico, debido a la cercanía que existe de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y la Malinche. La mayoría de los cerros y zonas altas de la ciudad están formados por material que generalmente emiten rocas de composición y textura diferente en las últimas etapas del vulcanismo, lo cual hace que arenas y cenizas volcánicas provenientes de magmas que tuvieron un enfriamiento rápido, den lugar a la formación de estructuras dómicas, como las presentes en diferentes cerros (INEGI, 2000).

Para este estudio, se usó la carta geológica de Puebla E14-B43, obtenida de INEGI, donde está representado el material de la ciudad y de la zona de estudio con sus componentes geológicos respectivos, como se observa en la figura 4, la zona muestra la ubicación del cerro de Amalucan con sus características geológicas, compuestas de material volcánico, principalmente toba y brecha; también se pueden apreciar los suelos existentes en la zona y el símbolo que indica que el cerro es un aparato volcánico.



Granito		Basalto		Brecha volcánica riolítica		Toba riolítica	
Diorita		Riolita		Brecha volcánica andesítica		Toba andesítica	
Gabro		Andesita		Brecha volcánica basáltica		Toba basáltica	
Ígnea intrusiva básica				Lutita		Caliza	

Figura 4. Extracto de la carta geológica de Puebla que muestra el cerro de Amalucan y sus alrededores con la respectiva geología del área con la simbología de rocas ígneas y sedimentarias existente en la zona de estudio según la carta geológico minera E13-B43 (INEGI, 1985)

Sin importar la ubicación o extensión territorial, es importante conocer la información geológica la zona de estudio, ya que sin ella, la interpretación podría ser inadecuada o errónea. Las cartas geológicas sirven para aclarar lo antes mencionado pues presentan elementos estructurales de la zona, como rumbo y echado, domos, fallas (inversas, normales, laterales, entre otras) y demás estructuras para reconocer la zona de interés y así precisar aún más la interpretación. Las cartas geológicas del territorio mexicano son proporcionadas por INEGI y el Servicio Geológico Mexicano, estas son de libre adquisición en internet.

Provincia fisiográfica

La provincia fisiográfica es la visión general de las formas del relieve, identificadas y definidas a partir del análisis integral de la información topográfica, geológica, hidrológica y edafológica, para formar unidades relativamente homogéneas, representado las diferentes provincias y subprovincias en las que se ha dividido al país, de acuerdo con su geología y topografía (INEGI, 2019).

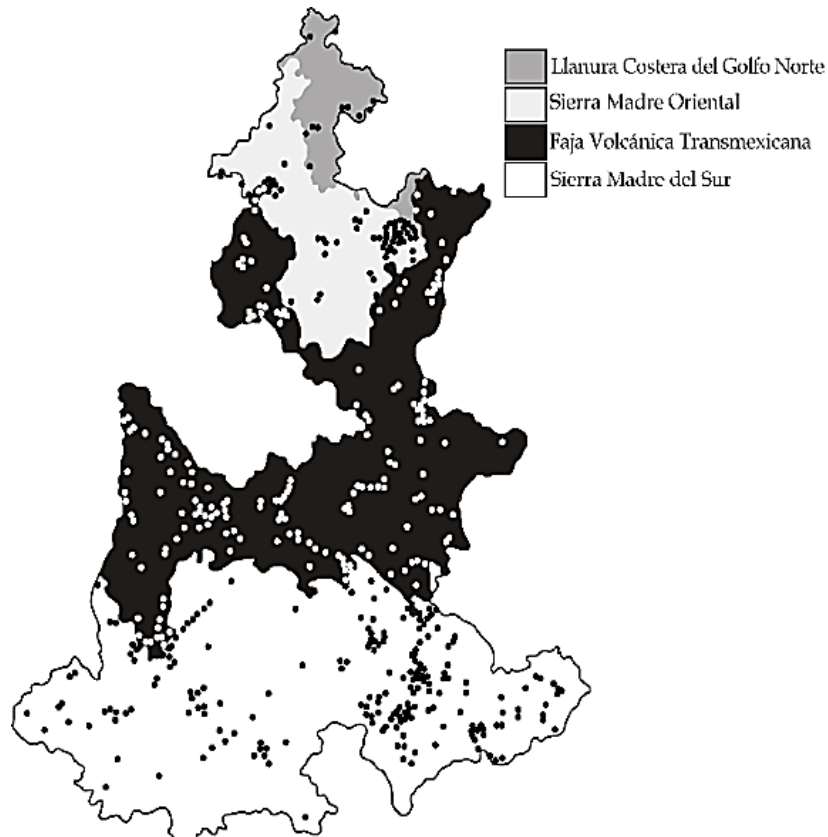


Figura 5. Provincia fisiográfica de Puebla. Los puntos muestran la recolección de campo y la revisión de catálogos de colecciones científicas (INEGI, 1987)

La figura 5 muestra la provincia fisiográfica a lo largo de todo el estado de Puebla. La figura 6 muestra la ubicación de la división de la faja volcánica transmexicana, mostrando las características de la misma y su posición en el estado. Esto explica cómo el arco volcánico está constituido sobre el margen meridional de la placa norteamericana, lo que presenta características específicas, como la fuerte variación del estilo volcánico y la composición química, la pendiente

de su parte central y oriental con la trinchera y la enorme variación del ancho del arco (Ferrari, 2000).

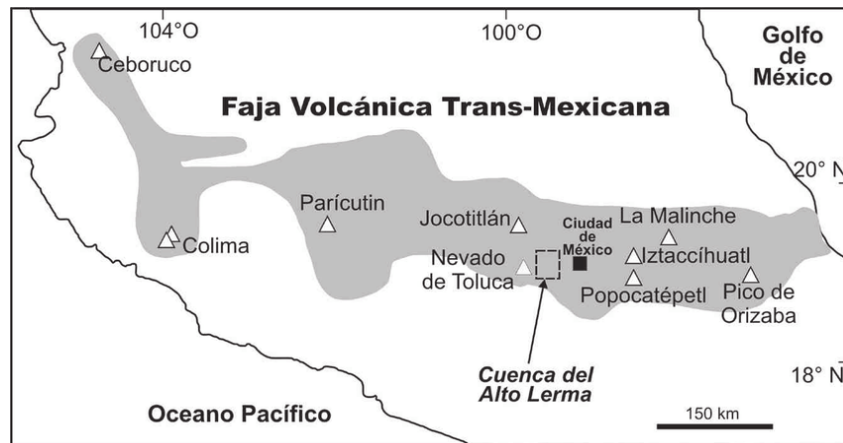


Figura 6. Ubicación y características de la FVTM (INEGI, 2019)

Por ello, Puebla tiene extensas formaciones rocosas con amplio material volcánico, muchos cerros dentro de la ciudad y en sus orillas, y por supuesto, el borde por los volcanes más importantes en el país.

La Faja Volcánica Transmexicana tiene características que constituyen a uno de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-pacífica, entre los cuales se resaltan:

- a) la gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo del arco,
- b) la presencia de un volcanismo alcalino de tipo intraplaca (asimilado a los basaltos de la Isla Oceánica) espacialmente asociado al volcanismo dominante relacionado con la subducción,
- c) la oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera, y
- d) la notable variación del ancho del arco.

Según Luca Ferrari, en su artículo “Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década” (2000), la cartografía geológica se ha apoyado en nuevas edades isotópicas, lo que ha llegado a esclarecer la evolución del espacio temporal del vulcanismo central en México central.

Provincia local: División de la Zona y Tipos de Suelo

Con la distribución existente en la zona, según el extracto de carta geológica (figura 4), se encuentran los siguientes tipos de suelos y estructuras geológicas:



Figura 7. Simbología de los suelos existentes en la zona del cerro de Amalucan (INEGI, 1985)

En la zona de estudio el suelo se puede caracterizar como residual, aluvión y piamonte, debido a la resolución y antigüedad de la carta, se puede complicar la selección de solo una o de varias características en la zona de estudio, sin embargo, la definición de cada una de ellas lo dejará claro. También, se cuenta con una acotación en el cerro que lo describe como aparato volcánico.

Algunas de las características del suelo residual se derivan de la meteorización y descomposición de la roca en el sitio, el cual no ha sido transportado de su localización original, esto hace que sus partículas con frecuencia, sean agregados o que posean cristales de mineral meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente más pequeños si el suelo es manipulado.

El aluvión es material que fue depositado en un ambiente por la acción de un curso de agua o un río sobre el terreno, generalmente acumulado en abanicos aluviales, cauces de corrientes o llanuras de inundación.

El piamonte, como su nombre lo indica, es un terreno en la base o cerca de una montaña o cadena de ellas. También, en el apartado de rocas ígneas, se observó que el color amarillo tiene la siguiente caracterización en la zona:

Las rocas piroclásticas son fragmentos que son lanzados al aire y se precipitan a diferentes distancias del foco de erupción. Según su tamaño será su clasificación, en este caso, las más finas son las arenas, cenizas y polvos, las cuales, al endurecerse se transforman en tobas, por consolidación o cementación.

Las tobas son cenizas volcánicas, que se consideran rocas ígneas extrusivas, pues se caracterizan por su consistencia porosa y liviana. Estas contienen granos que las forman, y pueden ser cristalinos, vítreos o cenizos; también, pueden estar constituidas por una gran variedad de minerales y es lo que hace que se diferencien de otros tipos de rocas.

Dentro de la carta hay dos divisiones de las tobas, las riolíticas y las andesíticas. Como su nombre lo indica, las primeras se caracterizan por ser una mezcla con riolitas, las cuales son típicamente porídicas, con presencia de grano fino, que a veces presenta micas o minerales ferromagnesianos; y las segundas son mezcla con andesita, que es la segunda roca volcánica más común en la tierra, después del basalto y se compone de minerales félsicos máficos (López Ramos, 2018).

Capítulo 3: Marco Teórico

3.1 Fundamentos de prospección eléctrica

Para el estudio del subsuelo, los métodos eléctricos funcionan aplicando una corriente eléctrica continua (DC), medida en amperes (Amp), que va directa al subsuelo por medio de un par de electrodos, con los cuales, se va midiendo su diferencia de potencial (en voltios), juntos con otro par de electrodos. Al relacionar estas dos magnitudes, se determina la distribución resistiva vertical y horizontal del subsuelo, esto mediante las lecturas tomadas desde la superficie de la misma. La resistividad del suelo se relaciona con varios parámetros geológicos como el mineral, contenido de fluido, porosidad de la roca y saturación de agua (EGYES, s.f.).

3.2 Conceptos y ecuaciones generales

Dentro de esta investigación, se usarán parámetros y terminología para sustentar los métodos, que a continuación se describen.

3.2.1 Intensidad de corriente eléctrica

A la cantidad de electricidad que posee un cuerpo se le denomina carga eléctrica, la cual, atraviesa la sección recta de un conductor en cierta unidad de tiempo:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

La unidad de medida es el Amperio en el sistema internacional, la cual, circula por dos conductores rectilíneos muy largos y paralelos, situados en el vacío, a la distancia de un metro; en el cual se produce una fuerza de 2.10^{-7} Newton.

$$Q = (I)(t) \quad (2)$$

Donde Q es la carga que se expresa en Culombios (C); I es la intensidad de corriente eléctrica que es expresada en Amperios o miliamperios (mAmp) y t representa el tiempo, expresado en segundos. Tenemos que la expresión equivale a 1 Culombio = 1 Amperio x 1 segundo (Aguado Benedí, 1998).

3.2.2 Voltaje

El voltaje se define como la diferencia de potencial eléctrico que hay en un circuito. Su unidad es el voltio:

$$V = R \cdot I \quad (3)$$

Donde V es el voltaje, expresado en voltios (V); R es la resistencia del material expresada en Ohms (Ω) e I es la Intensidad de corriente eléctrica expresada en Amperes (Amp).

El voltio es la diferencia de potencial que debe existir entre dos puntos, para que al pasar de uno a otro la carga de un Culombio realice el trabajo de un Julio.

3.2.3 Resistencia

Es la oposición que presenta un material al flujo de la corriente eléctrica. La unidad de resistencia es el Ohmio (Ω):

$$R = \frac{V}{I} \quad (4)$$

Donde R representa la resistencia que es expresada en ohmios (Ω); V el voltaje que es expresado en voltios (V); I , como se mencionó anteriormente, la intensidad de corriente (expresada en Amperios (A)).

Un conductor eléctrico tendrá una resistencia de un ohmio, si la diferencia de un potencial entre sus extremos es de un voltio, cuando la intensidad de corriente en el mismo es un amperio:

$$1 \Omega = \frac{1V}{1A} \quad (5)$$

3.2.4 Resistividad

La resistividad es una propiedad inversa a la conductividad eléctrica, por lo tanto, se expresa en ohm por metro. Lo siguiente queda demostrado reemplazando R en la ecuación de la ley de ohm, la cual 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, por su equivalente de la ecuación de resistencia, se tiene que:

$$\Delta V = (I) \left(\frac{(\rho)(L)}{s} \right) \quad (6)$$

Donde ΔV es igual a la Intensidad de corriente eléctrica multiplicada por la resistividad a lo largo de la longitud de medición entre la sección.

La resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores, o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, lo que genera una disminución de la resistividad, o lo que es lo mismo, un aumento en la capacidad de conducción de la corriente eléctrica.

Además del grado de saturación, también incide en la resistividad del medio el contenido salino del agua; a mayor salinidad, menor resistividad y viceversa. Todos los contrastes en los rangos de las resistividades medidas en campo son los que permiten aplicar correctamente los métodos de prospección geoelectrica, por medio de la inyección de corrientes continuas (Auge, 2008).

Son pocos los componentes geológicos subsaturados o secos, que presentan baja resistividad o alta conductividad, pero entre ellos se pueden mencionar a los minerales metálicos como calcopirita, piritita, magnetita, galena, pirrotina, etc. El grafito también presenta elevada conductividad eléctrica, pero la mayoría de los minerales no metálicos, al igual que las rocas, tienen resistividades

significativamente mayores, en general entre 2 y 6 órdenes de magnitud superiores.

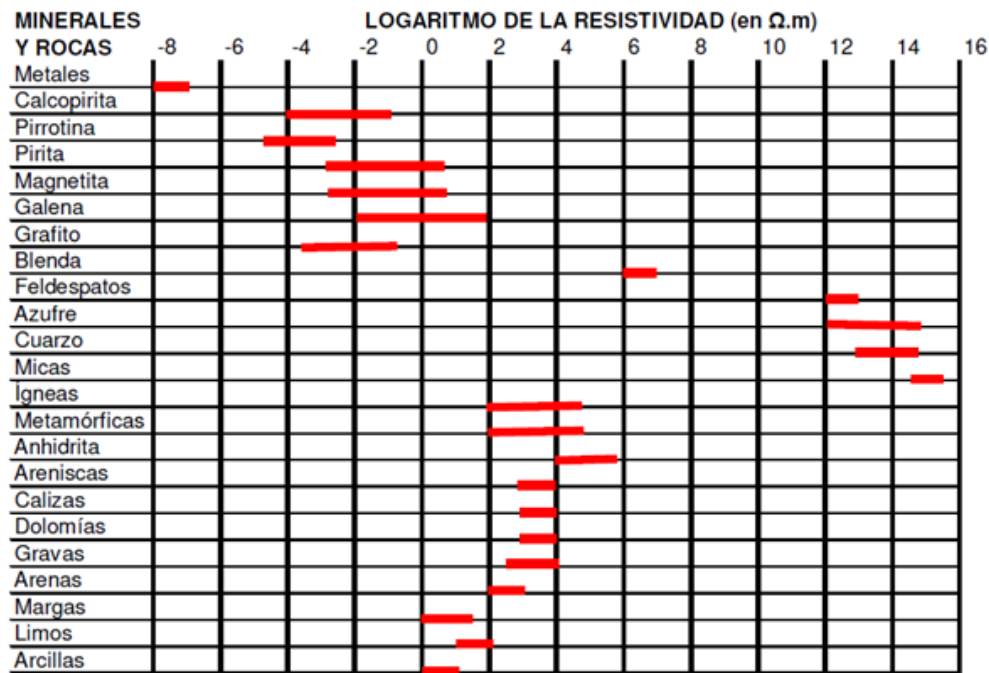


Tabla 1. Resistividad de algunas rocas y minerales (Auge, 2008)

En la tabla anterior se puede apreciar cómo se indican las resistividades que caracterizan a los minerales, a las rocas y a los sedimentos, y dentro de estos últimos también se aprecian diferencias notorias entre los de grano fino (margas, limos, arcillas), los de grano mediano (arenas) y grueso (gravas) (Auge, 2008).

El método de resistividad considera un cuerpo semi-infinito con una resistividad uniforme, en donde se colocan cuatro electrodos, dos de corriente y dos de potencial. El gradiente de potencial es medido por un voltímetro o potenciómetro (Díaz Anaya, 2010).

3.2.4.1 Resistividad verdadera

Se le conoce como resistividad verdadera a la medida de resistividad que no involucra factores adicionales. Es el efecto obtenido de quitar todas las distorsiones inducidas. Considere un cubo, que es eléctricamente uniforme de una longitud L , a través del cual, pasa una corriente. El material que está dentro del

cubo resiste la conducción de electricidad que pasa a través de él, lo que muestra una caída de potencial entre dos caras opuestas (Reynolds, 1997).

3.2.4.2 Resistividad aparente

Para los trabajos de campo, esta se obtiene de manera directa en el suelo, con el equipo pertinente y de la mano de un arreglo de cuatro electrodos, de acuerdo a un método de medición en un esquema geométrico definido. Esta resistividad recibe el nombre de resistividad aparente (EPM, 2009).

Esta resistividad es una relación directa de la ley de ohm sobre el voltaje medido que se aplica con una corriente, es decir, la resistividad aparente es igual a una variable k , que recibe el nombre de factor geométrico, multiplicada por el cociente del voltaje entre la intensidad de corriente eléctrica. Dicho factor geométrico depende del antes mencionado arreglo electródico (SEG, 1996).

3.2.5 Campo eléctrico

El concepto de campo fue desarrollado por Michael Faraday (1791-1867) en el contexto de las fuerzas eléctricas. Se dice que el campo eléctrico existe en una región del espacio alrededor de un objeto cargado: la fuente a cargar. Cuando otro objeto cargado (la carga de prueba) entra en este campo eléctrico una fuerza eléctrica actúa en él. Suponiendo una pequeña carga positiva de prueba q_0 colocada cerca de un segundo objeto que lleva una carga positiva mucho mayor Q . Definimos el campo eléctrico debido a la carga de origen en la ubicación de la carga de prueba q_0 como la fuerza eléctrica en la carga de prueba por unidad de carga, o para ser más específico, el vector del campo eléctrico E en un punto en el espacio se define como la fuerza eléctrica F_e que actúa sobre una carga de prueba positiva q_0 colocada en ese punto dividida por la carga de prueba:

$$E = \frac{F_e}{q_0} \quad (7)$$

Se debe de tener en cuenta que E es el campo producido por alguna carga o distribución de carga separada de la carga de prueba; no es el campo producido

por la carga de prueba en sí. Además, de que la existencia de un campo eléctrico es una propiedad de su fuente; la presencia de la carga de prueba no es necesaria para que el campo exista. La carga de prueba sirve como detector del campo eléctrico (Jewett, 2004).

3.2.6 Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son cuatro de las ecuaciones más influyentes en la ciencia: la ley de Gauss para campos eléctricos, la ley de Gauss para campos magnéticos, la ley de Faraday y la ley de Ampere-Maxwell. Durante miles de años, las únicas fuentes conocidas de campos magnéticos fueron ciertos minerales de hierro y otros materiales que habían sido magnetizados accidental o deliberadamente.

La ley de Ampere relaciona una corriente eléctrica constante con una corriente circulante del campo magnético, sin embargo, se sabía que dicha ley se aplicaba solo a situaciones estáticas que involucraban corrientes constantes. Fue la adición de Maxwell, un flujo eléctrico cambiante, lo que extendió la aplicabilidad de la ley de Ampere a las condiciones dependientes del tiempo, y más importante aún, fue la presencia de este término lo que le permitió a Maxwell discernir la naturaleza electromagnética de la luz y desarrollar una teoría integral del electromagnetismo (Fleisch, 2008).

La forma diferencial de la ley de Ampere-Maxwell generalmente se escribe:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (8)$$

El lado izquierdo de la ecuación es la descripción matemática del rizo del campo magnético y los dos términos del lado derecho representan la densidad de corriente eléctrica y la tasa de tiempo de cambio de un campo eléctrico. Es decir, el vector del operador nabla ($\vec{\nabla}$) por el producto cruzado del vector del campo magnético dado en teslas (\vec{B}) convierte el operador nabla en el rizo; lo que es igual, a la permeabilidad magnética del espacio libre (μ_0), multiplicado por el vector

de la densidad de corriente eléctrica (\vec{j}) medidos en amperios por metro cuadrado, más la permitividad eléctrica del espacio libre (ϵ_0) multiplicado por la tasa de cambio del campo eléctrico con el tiempo ($\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$).

Un campo magnético circulante es producido por una corriente eléctrica y por un campo eléctrico que cambia con el tiempo, así las ecuaciones matemáticas de Maxwell explican el fenómeno físico que rige el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos (Díaz Anaya, 2010).

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = -\left(\frac{\partial \vec{B}(\vec{r})}{\partial t}\right) \quad (9)$$

Para los regímenes estacionarios no existen cambios temporales, por lo tanto:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad (10)$$

En los métodos eléctricos de corriente continua, la ecuación anterior es de interés, pues si se considera una fuente puntual, es decir, un electrodo de corriente, las ecuaciones que rigen al campo eléctrico son:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}) = I\rho\delta(\vec{r}) \quad (12)$$

Suponiendo

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla V(\vec{r}) \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación 13 en 12 tenemos:

$$\nabla^2 V(\vec{r}) = -I\rho\delta(\vec{r}) \quad (14)$$

En una región donde no existe la fuente el potencial satisface:

$$\nabla^2 V(\vec{r}) = 0 \quad (15)$$

Que es la ecuación de Laplace donde también la divergencia de $\vec{E}(\vec{r})$ es cero. La ecuación de Laplace será válida en todo el semiespacio conductor, excepto en los electrodos.

$$R = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (16)$$

$$-dV = RI \quad (17)$$

Estas ecuaciones sirven para explicar el arreglo eléctrico más adelante.

3.3 Fundamentos teóricos de la medición de resistividades

Ahora bien, los estudios eléctricos tienen como propósito determinar la distribución de resistividad en el subsuelo haciendo mediciones en la superficie del mismo. Esta resistividad está relacionada con varios parámetros geológicos, como el contenido de minerales y fluidos, la porosidad y el grado de saturación de agua en la roca. Los estudios de resistividad eléctrica se han utilizado durante muchas décadas en investigaciones hidrogeológicas, mineras y geotécnicas. Más recientemente, se ha utilizado para estudios ambientales (Loke, 1999).



Figura 8. Arreglo convencional de cuatro electrodos para medir la resistividad del subsuelo (Loke, 1999).

Las mediciones de resistividad se realizan normalmente inyectando corriente en el suelo a través de dos electrodos de corriente (C1 y C2 en la Figura 8), y midiendo la diferencia de voltaje resultante en dos electrodos potenciales (P1 y P2 también en la Figura 8).

3.3.1 Arreglo eléctrico

Los arreglos comúnmente más utilizados para los levantamientos de resistividad se muestran en la figura 9. La elección del arreglo adecuado para un

levantamiento de campo depende del tipo de estructura a mapear, la sensibilidad del medidor de resistividad y el nivel de ruido de fondo. En la práctica, los arreglos que son más utilizados para las imágenes en 2-D son (a) Wenner, (b) dipolo-dipolo (c) Wenner-Schlumberger (d) polo-polo y (d) polo-dipolo (Loke, 1999).

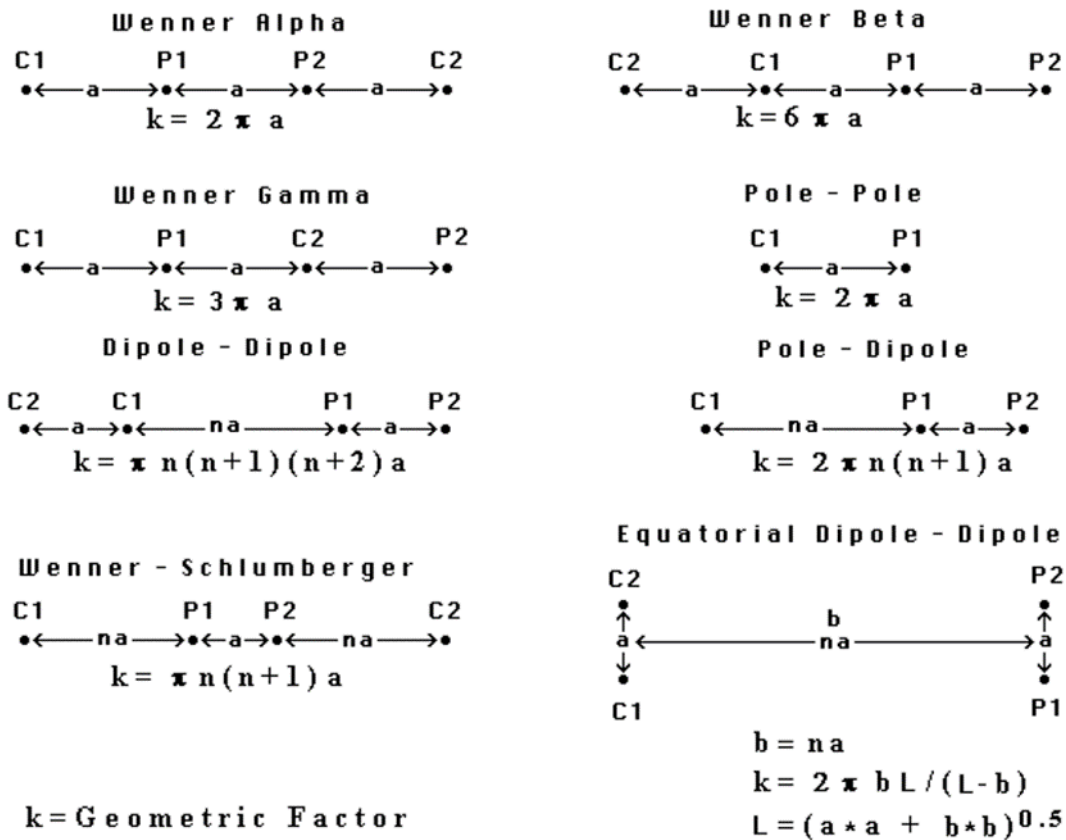


Figura 9. Arreglos más comunes usados en resistividad y sus factores geométricos (Loke, 1999).

Entre las características del arreglo que deben considerarse se encuentran la sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales en la resistividad del subsuelo, la profundidad de la investigación, la cobertura de datos horizontales y la fuerza de la señal (Loke, 1999); y también, la mejor elección de configuración para realizar un estudio de campo depende del tipo de estructura a ser mapeada (forma, dimensiones), profundidad, sensibilidad del aparato y nivel de ruido de fondo de la zona de estudio (Díaz Anaya, 2010).

3.3.2 Factor Geométrico

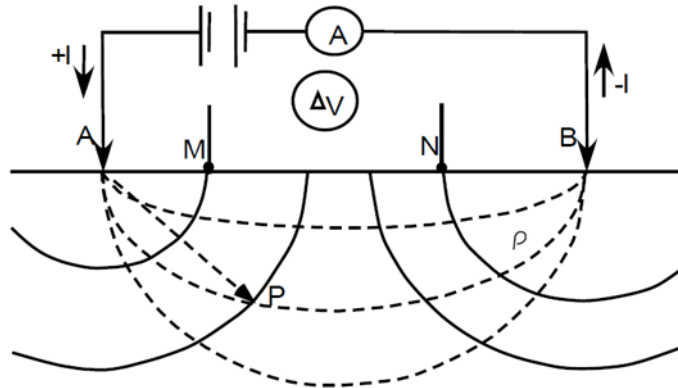


Figura 10. Arreglos más comunes usados en resistividad y sus factores geométricos
(Iriarte Sierra, 2011)

Un conjunto de cuatro electrodos recibe el nombre de dispositivo electródico. La medición del potencial eléctrico en un semiespacio homogéneo se hace mediante un dispositivo electródico o un arreglo geométrico de electrodos. Consta de cuatro electrodos, A y B los electrodos de corriente, positivo y negativo respectivamente, M y N los electrodos de potencial, entre los cuales se mide la diferencia de potencial del campo eléctrico creado por A y B.

Existen diversos tipos de dispositivos, lineales, simétricos, asimétricos, ecuatoriales. En principio, los cuatro electrodos pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno (Díaz Anaya, 2010).

3.3.3 Teoría del arreglo electródico

Sustituyendo la ecuación 16 en la ecuación 17 e integrando, se obtiene:

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (18)$$

Por lo tanto la diferencia de potencial entre los puntos M y N está indicada por:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (19)$$

Donde AM es la distancia que existe entre el electrodo de corriente A y el electrodo de potencial M, BM es la distancia que existe entre el electrodo de corriente B y el electrodo de potencial M, AN es la distancia que existe entre el electrodo de corriente A y el electrodo de potencial N y BN es la distancia que existe entre el electrodo de corriente B y el electrodo de potencial N.

Despejando la resistividad:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (20)$$

Donde:

$$K = \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (21)$$

Esta última ecuación se le conoce como el factor geométrico del potencial medido entre MN, y sólo depende de la posición relativa de los cuatro electrodos (Díaz Anaya, 2010).

3.3.4 Resistividad en función del arreglo

Existen numerosas configuraciones de campo para los métodos eléctricos, la diferencia entre cada una de ellas está en el tipo de transmisor y de receptor de corriente utilizados en el campo, y en cómo se sitúan en el campo dichos transmisores o receptores. Los métodos eléctricos tienen la ventaja de ser mucho más sencillos en el procesado y la interpretación, siendo los predilectos para una gran gama de aplicaciones por ser una técnica geofísica muy versátil, sin embargo, su mayor desventaja es que cualquier material aislante o muy conductivo puede enmascarar los materiales que lo rodean.

Los valores de resistividad tienen un alto rango de valores, comparado a otras cantidades físicas obtenidas por otros métodos geofísicos, lo que significa que la resistividad de las rocas y el suelo en un área de estudio pueden variar por varios órdenes de magnitud.

3.3.4.1 Aspectos teóricos del arreglo Wenner-Schlumberger

Este es un arreglo híbrido entre los arreglos Wenner y Schlumberger, el cual combina características de ambos para que sea moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales. Dentro de las ventajas de este arreglo esta la alta intensidad de la señal y la gran profundidad que alcanza para investigación (Loke, 1999).

Las distancias entre A y M y entre N y B van variando a razón de “n”, dependiendo de la profundidad de interés y la longitud del tendido (Iriarte Sierra, 2011).

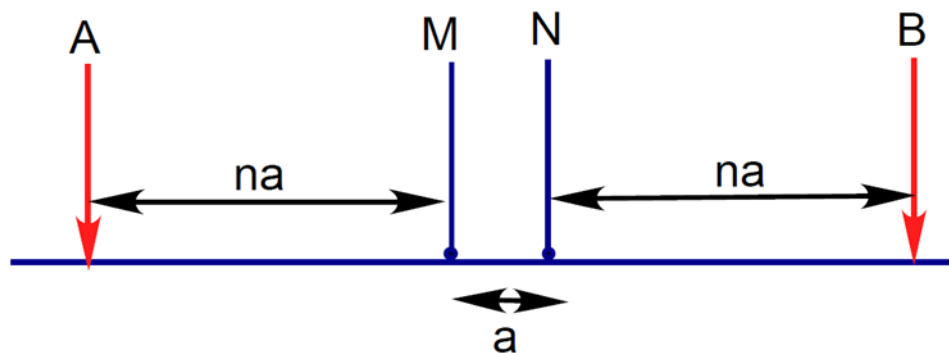


Figura 11. Configuración eléctrica Wenner-Schlumberger (Iriarte Sierra, 2011)

3.3.5 Inversión de datos

La inversión de datos se hace para obtener un modelo en 2D, el cual primero muestra un mapa de resistividades aparentes, después un mapa de resistividades aparentes calculado hasta obtener el modelo inverso de resistividades.

La construcción de una sección en 2D de resistividades aparentes, requiere el total de datos de resistividad horizontal como una sección a profundidad, en la cual, cada valor de resistividad *aparente* es graficado como si fuera la resistividad *verdadera* de un punto, en una profundidad proporcional al espacio de los electrodos. La configuración preliminar de los datos proporciona una imagen de la distribución de la resistividad en aproximación.

Se formará una sección con el conjunto de datos de resistividad *aparente*: como se muestra en la figura 12, se generará un mapa a partir de las mediciones de variación de resistividad aparente calculada, que a su vez generará otro mapa de resistividades aparentes medidas, como se muestra en la figura 13, para finalmente obtener un modelo de la distribución espacial en el subsuelo como el de la figura 14 (en dichas figuras los ejes x representan la longitud del tendido y los ejes y la profundidad del mismo, ambos en metros). Todo método de inversión debe determinar un “modelo idealizado” del subsuelo que reproduzca los parámetros medidos de manera adecuada.

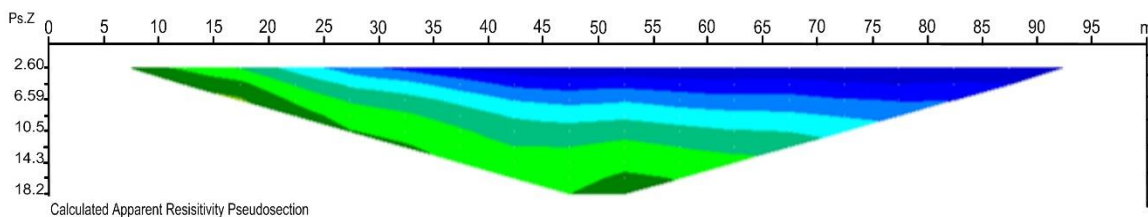


Figura 12. Pseudosección de resistividad aparente calculada de la tomografía 1

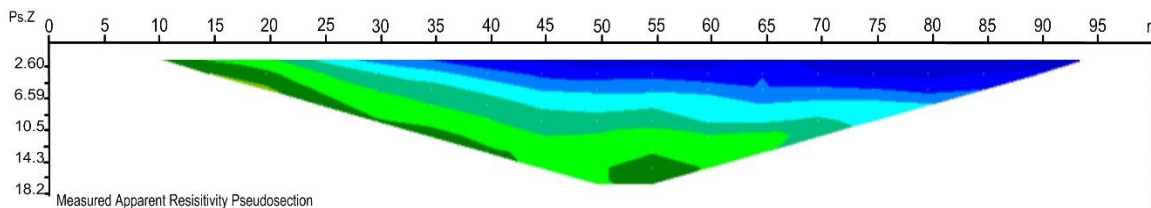


Figura 13. Pseudosección de resistividad aparente medida de la tomografía 1

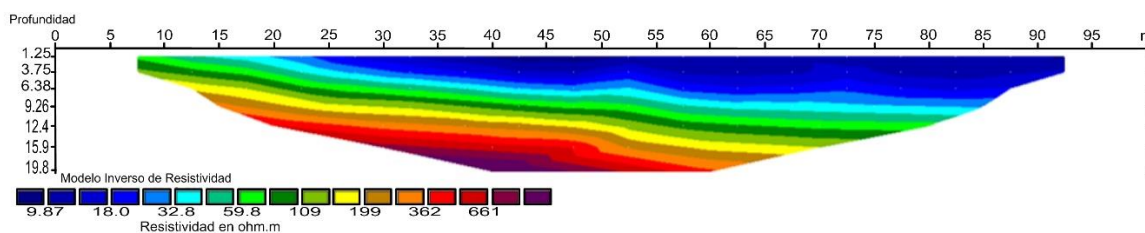


Figura 14. Imagen del modelo inverso de resistividad de la tomografía 1

Estos algoritmos de inversión constan de un proceso iterativo con el fin de obtener un modelo de resistividades reales a partir de las resistividades aparentes, a fin de que el modelo sea lo más parecido a la sección con estas resistividades en 2D, las cuales fueron medidas en campo (Díaz Anaya, 2010).

Este modelo es el que recibe el nombre de pseudosección inversa de resistividad, que se da de la inversión de los datos y es el que se usa para hacer la interpretación. Esta imagen se presenta en la Figura 17 más adelante.

“Todos los métodos de inversión intentan encontrar un modelo para el subsuelo, cuya respuesta concuerde con los datos medidos” (Loke, 1999).

En el método utilizado por los programas RES2DINV® y RES3DINV®, los parámetros del modelo son los valores de resistividad de los bloques del modelo, mientras que los datos son los valores de resistividad aparente medidos. Para el mismo conjunto de datos, existe una amplia gama de modelos, cuyos valores de resistividad aparente calculados concuerdan con los valores de resistividad medidos. Este método de inversión, además de tratar de minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados, también intenta reducir otras cantidades que producirán ciertas características deseadas en el modelo resultante. Las restricciones adicionales también ayudan a estabilizar el proceso de inversión.

Los programas RES2DINV® y RES3DINV® utilizan un método que es iterativo, por el cual, a partir de un modelo inicial, el programa intenta encontrar un modelo mejorado cuyos valores de resistividad aparente calculados estén más cerca de los valores medidos (Loke, 1999).

Un método de inversión iterativa bien conocido es el método restringido de suavidad, explicado en el apartado de factor de suavizamiento.

3.3.6 Mínimos cuadrados

“El método de deconvolución de mínimos cuadrados separa el efecto de la geometría de la matriz de electrodos sobre los valores de resistividad aparente de lo que resulta de la resistividad subsuperficial” (Loke, 1995).

El método de mínimos cuadrados parte del modelo utilizado para hacer la inversión de datos de resistividad en 2D, lo que comprende varios bloques de

resistividad constante en forma rectangular. Lo más conveniente es usar un método iterativo de optimización no lineal para determinar la resistividad de dichos bloques. El método de mínimos cuadrados con restricción de suavidad se puede utilizar para determinar la resistividad de los bloques rectangulares (los parámetros del modelo) que minimizarán las diferencias entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos (Loke, 1995).

La ecuación de mínimos cuadrados utilizada es:

$$(J^T J + \lambda C^T C)p = J^T g \quad (22)$$

Donde J es la matriz Jacobiana de derivadas parciales, λ es el factor de amortiguamiento, g es el vector de discrepancia que contiene las diferencias logarítmicas entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados, y p es el vector de corrección para los parámetros del modelo, el superíndice T indica que es la matriz traspuesta de esa variable (Loke, 1995).

El efecto del filtro de planitud 2D es restringir la suavidad de los parámetros del modelo a un valor constante (Sasaki, 1992). Los logaritmos de los valores de resistividad del modelo se utilizan en el cálculo del vector de corrección del modelo p .

El método de inversión puede dividirse en tres pasos principales:

- Calcular los valores de resistividad aparente para el presente modelo, esto normalmente se hace utilizando el método de diferencias finitas o elementos finitos,
- Calcular la matriz Jacobiana J de derivadas parciales, y
- Resolver el sistema de ecuaciones lineales en la ecuación (22)

Se hace énfasis en que al existir un número moderado de datos (preferentemente menos de 500), el tiempo que llevan los dos primeros pasos puede ser mucho mayor que el que lleva el tercer paso, por lo que el método propuesto, reduce el tiempo de cálculo necesario al evitar los dos primeros pasos,

es decir, el cálculo de los valores de resistividad aparente y sus derivadas parciales (Loke, 1995).

3.3.7 Factor de Suavizamiento

Cuando se tiene un número grande de parámetros, el modelo se debe de modificar para que se minimicen las variaciones espaciales que existen en el mismo, pero debe de hacerse de una manera suave y gradual para obtener un buen modelo de resistividad (Iriarte Sierra, 2011).

Este suavizamiento gradual es limitado por el método de mínimos cuadrados, el cual tiene la siguiente forma matemática:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (23)$$

La ecuación 23 también intenta minimizar el cuadrado de los cambios espaciales, o robustos, de los valores del modelo de resistividad. Este es el método de optimización que produce el suavizado restringido, es la versión de minimización del error cuadrático, MCE por sus siglas en inglés.

Capítulo 4: Instrumentación y Metodología de campo

4.1 Equipo utilizado

4.1.1 Resistivímetro

Para el estudio se usó equipo geofísico de prospección eléctrica llamado resistivímetro, de la marca Scyntrex®, modelo Saris, el cual, permite conocer cómo está la estructura interna de la zona a partir de datos de resistividad aparente, los cuales muestran la variaciones de resistividad en el área para determinar los tipos de rocas existentes en el área.



Figura 15. Modelo de resistivímetro Saris

El modelo de resistivímetro Saris es el que se utilizó para la toma de los datos en el cerro, como el que se muestra en la figura 15. Como ya se ha mencionado, este cuenta con 4 electrodos que se distribuyen a lo largo de la zona de estudio para la adquisición de datos según el arreglo a usar.

Cada aparato es un instrumento muy versátil, ya que por su tamaño compacto, es fácil de transportar y colocar en las zonas de estudio. Tiene características que dan una visualización de la resistividad a manera de mapeo para diferentes aplicaciones, también proporciona información básica de las propiedades físicas que pudiesen existir en el suelo y los tipos de rocas. El funcionamiento de este equipo es a través de corriente eléctrica, por lo cual, se debe de apoyar de una fuente que proporcione la necesaria durante el trabajo de campo.

4.1.2 GPS

Para conocer las coordenadas de latitud y altitud se ocupa un instrumento llamado GPS; que es un sistema de posición global, llamado así por sus siglas en inglés. Este aparato permite determinar un punto de la posición de la tierra en la que se encuentra el aparato, con un margen de error de unos cuantos metros e inclusive en ocasiones, de centímetros.

Las coordenadas son importantes para la ubicación y procesamiento de los datos de la zona. Para este estudio se utilizó un GPS Magellan®, similar al que se muestra en la figura 16.



Figura 16. Caratula de GPS Magellan® (Google, 2020).

4.1.3 Material auxiliar y kit de campo

- ✚ Batería para resistivímetro
- ✚ Electrodo
- ✚ Cables de corriente y potencial
- ✚ Marro o Martillo
- ✚ Cinta de aislar y pinzas eléctricas
- ✚ Cinta métrica

Como ya se mencionó, el equipo que se usó fue un resistivímetro, de la mano del arreglo denominado Wenner-Schlumberger que tiene una resolución

media (en comparación con otros arreglos) pero es el ideal para la zona debido a que esta resolución se extiende a lo largo de manera horizontal y a lo profundo de manera vertical. Los perfiles sondeados fueron realizados como se muestra en la figura 17:



Figura 17. Puntos de inicio y fin de cada línea para prospección eléctrica (Google Earth, 2020).

Puntos	Niveles	Arreglo	N° Electroodos	Espaciado	Longitud	Coordenadas		
							E	N
1: Rojo	9	W-S	21	5	100 mts	Inicio	590486	2106663
Orientación	N-O					Fin	590480	2106764
2: Azul	9	W-S	21	5	100 mts	Inicio	590554	2106752
Orientación	S-O					Fin	590456	2106732

Tabla 2. Parámetros de adquisición de datos por perfil eléctrico

4.2 Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos, se recurre a varios programas que permiten hacer una secuencia que finalmente muestran de manera gráfica los datos adquiridos.

El primer programa que se utiliza es Excel ®, un programa de Microsoft Office ®, en el cual generalmente se hace la base de datos, recolectados en campo. Se ordenan por columnas empezando por la *localización de los puntos de atribución* (del punto de inicio al fin), *separación eléctrica* (cada cuantos metros se iban separando los electrodos entre sí), *nivel* de medición correspondiente a la separación de los electrodos A y B, y *resistividad* (la resistividad aparente, que es la lectura dada por el equipo de resistividad).

Posteriormente, se usa Surfer ®, un programa de Golden Software ® que permite procesar datos para una interpretación visual, por medio de mapeo. Lo primero que se genera es una tabla con celdas que contengan el nombre, la separación eléctrica, el tipo de arreglo, el número de datos totales, la posición de puntos de atribución, el potencial espontaneo y la cantidad de los datos totales; todo esto en forma de columna y sucesivamente. Esto se utiliza para generar el encabezado, en el formato que pide el software RES2DINV ®, como se muestra en la siguiente tabla:

L1Amalucan			
5			
7			
90			
1			
0			
7.5	5	1	89.9
12.5	5	1	72.88
17.5	5	1	59.87

Tabla 3. Muestra de tabla para procesamiento de datos según el tipo de arreglo, con los datos específicos de este estudio para la línea 1 de medición.

Este nuevo archivo se usa en el programa de nombre RES2DINV ®, de la compañía Geotomo ®, una empresa que se dedica a desarrollar software de inversión de datos para dos y tres dimensiones, con datos de resistividad.

El software RES2DINV ® está diseñado para interpolar (obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto de puntos) datos de campo, para su posterior interpretación, en los métodos de prospección geofísica eléctrica (sondeo 2D), de resistividad eléctrica (conductividad) y polarización inducida. La inversión de los datos de resistividad se realiza mediante el método de mínimos cuadrados que involucra métodos de diferencias finitas.

El software puede manejar datos de cualquier arreglo de electrodos, incluidos Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo en línea, polo-polo, Wenner-Schlumberger, polo-dipolo ecuatorial y arreglos no convencionales; también, interpola datos de estudios de tierra, bajo el agua y pozos cruzados (Landviser, 2016).

Una vez abierto el documento en RES2DINV ®, se revisa el número de iteraciones para adaptar al modelo. Normalmente se debe de seleccionar entre 5 y 10 iteraciones para la subrutina de inversión de mínimos cuadrados. El programa generalmente convergerá en 4 a 6 iteraciones. También se puede cambiar el número de estas dentro de la subrutina de inversión de mínimos cuadrados.

Una vez verificadas las iteraciones, así como los demás parámetros, se procede a exterminar los puntos malos. El o los puntos malos se exterminan a criterio del intérprete, siempre y cuando se note un comportamiento coherente en las líneas del mapa. Por ejemplo, en la figura 18 se puede observar el comportamiento de los datos medidos con respecto a la resistividad aparente $ohm \cdot m$, los puntos que se exterminan se marcan con una cruz roja sobre el punto a remover. Posteriormente se cierra la ventana.

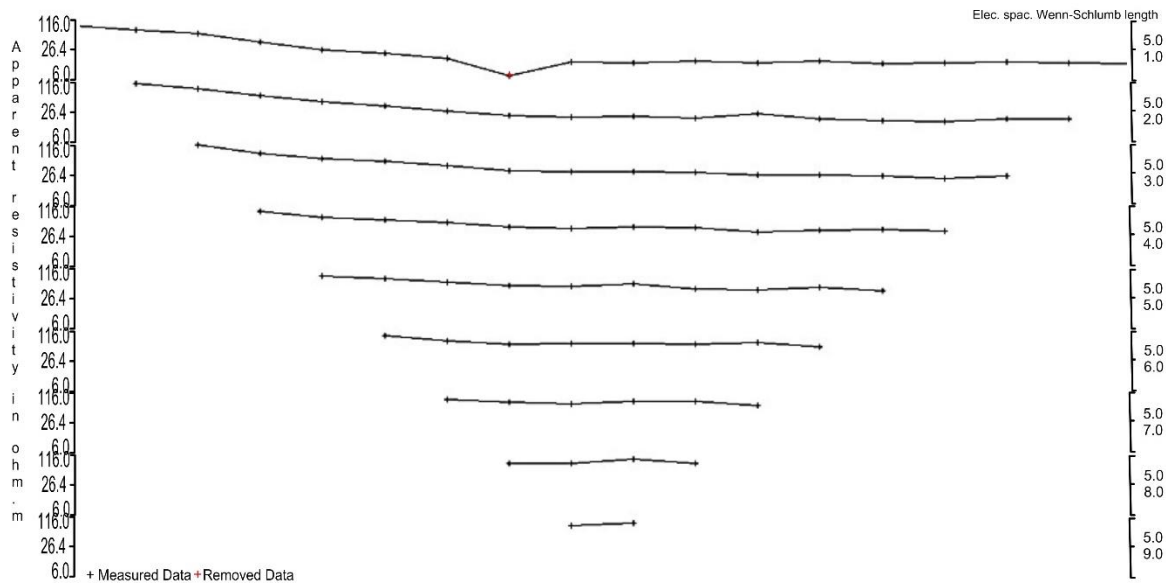


Figura 18. Imagen de la ventana para exterminar los puntos malos de la tomografía 1

Después, se hace la inversión del modelo de resistividades en el apartado *Inversión, Least-Square Inversion*. Si es necesario, se puede marcar un número nuevo de iteraciones en el recuadro que aparece, pero cuidando que la escala numérica coincida con los colores del mapa, y a su vez, concuerde con la resistividad aparente.

Los resultados de la inversión son muy importantes, ya que estos pueden presentar una variación abrupta con respecto a las resistividades que fueron tomadas en campo, y a su vez, pueden bajar mucho el valor del porcentaje de error, pero que este porcentaje sea mínimo no significa que los valores de resistividad sean adecuados para el modelo. Se debe conocer la geología del lugar para poder hacer una interpretación adecuada y tener presentes los rangos de resistividad, para que estos coincidan entre sí, ya que de esta forma se determina que esperar en cuanto al material de la zona y sus características.

En la figura 19 se muestra la ventana del programa, con tres gráficos, los primeros dos corresponden a los mapas de resistividad aparente calculada y medida (presentados de forma individual en las figuras 12 y 13 respectivamente) y finalmente el último gráfico que representa el modelo inverso de resistividad (figura 14), este mapa es el que se modelara en Voxler ®, ya con las inversiones para

una visualización en 3D. Se puede ubicar el valor máximo y el mínimo en el documento de la base de datos de Excel ®, para poder hacer la correlación entre los valores.

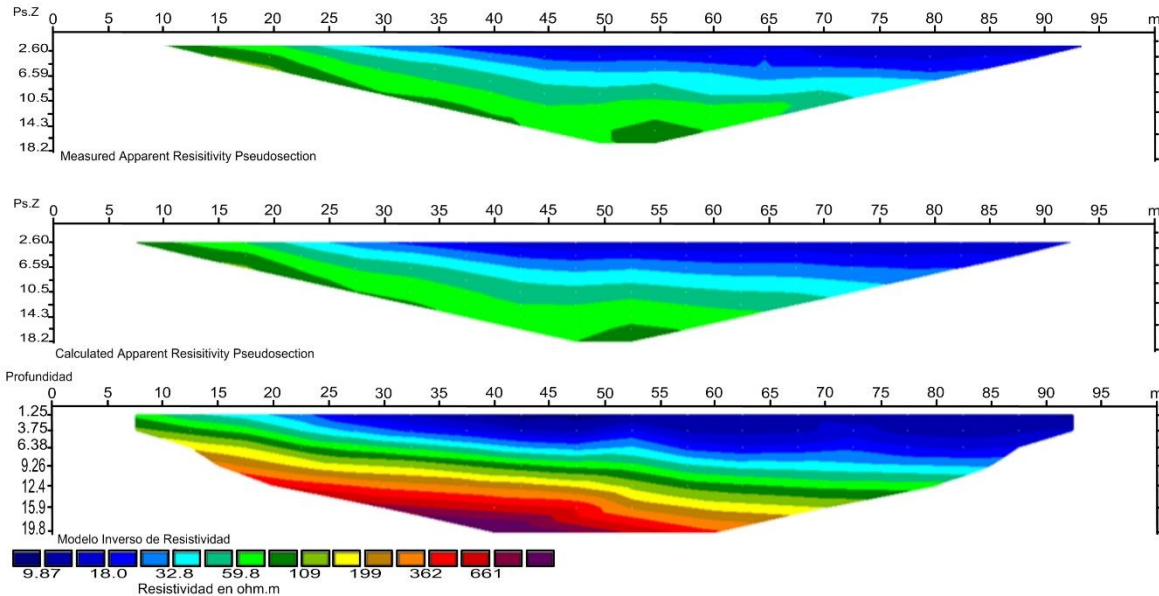


Figura 19. Imagen de la ventana final de RES2DINV ® con el modelo de resistividad para la tomografía 1

Se utilizó mano del programa Voxler ®, de Golden Software ®, en el cual, se abre el nuevo documento para crear un mapa en 3D de la zona de estudio. Este permite observar la tomografía resistiva en las coordenadas x , y , z en la zona de estudio por medio del documento creado anteriormente.

Finalmente, se georeferencia un mapa de la zona de estudio (en el programa de geolocalización de preferencia), esto con el fin de que se pueda hacer el modelo 3D en Voxler ® con la ubicación precisa de la zona de estudio, gracias a las coordenadas de la misma. Posteriormente se guardan las imágenes de la sobreposición de las tomografías con en el mapa para su mejor visualización.

Capítulo 5: Resultados

Las dos líneas de estudio arrojan un rango de valores semejantes, en la siguiente tabla se muestran los rangos de resistividad obtenidos en el estudio y la asociación geológica que lleva cada unidad geoelectrica según dicho rango:

Asociación Geológica	Rango de resistividad ($ohm \cdot m$)	Unidad geoelectrica
Tobas (Andesíticas y Riolíticas)	8.49 – 99	A
Basalto	100 – 1399.60	B

Tabla 4. Asociación de resultados entre resistividad y litología

Los materiales presentes se distribuyen de la siguiente manera:

Línea 1

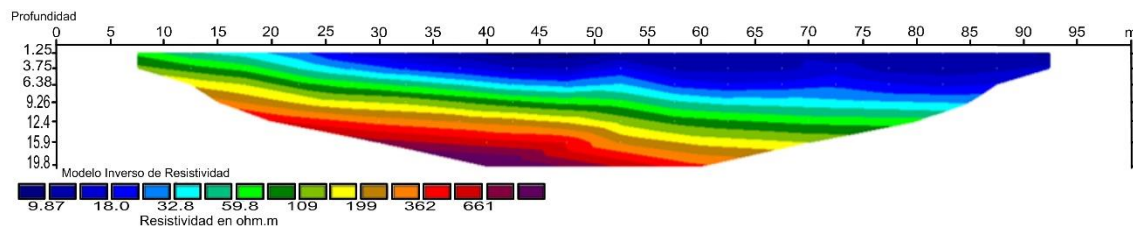


Figura 20. Imagen del modelo inverso de resistividad de la tomografía 1, con orientación Noroeste

En la tomografía de la línea 1 las resistividades se representan por los colores que se aprecian en la figura 20, donde las tonalidades azules representan las resistividades más bajas y las tonalidades rojas los valores más altos. Cada separación indica el cambio entre los valores en la zona, reconociendo valores de resistividad más altos a mayor profundidad.

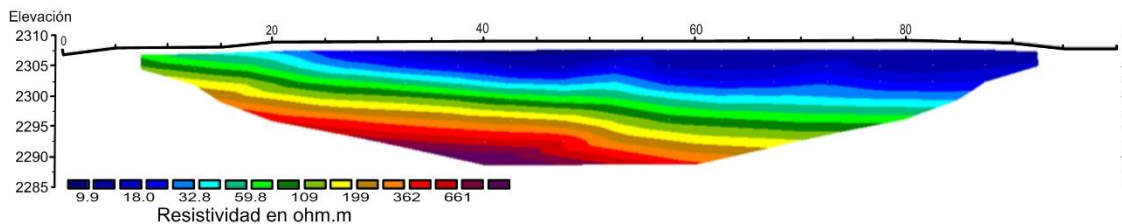


Figura 21. Imagen de la tomografía de la línea 1 con la topografía de la misma

En la figura 21, se puede notar la distribución de las resistividades como en la figura 20, pero se agrega la topografía existente en la zona a lo largo de la línea de medición. En esta imagen, no se pueden notar cambios abruptos en la topografía de la línea 1 de estudio, esto debido a que se midió en un área que no tenía grandes pendientes.

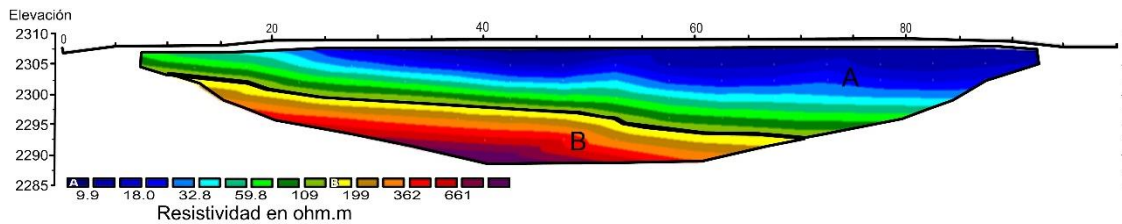


Figura 22. Clasificación de las unidades geoelectricas de la tomografía 1

La unidad geoelectrica determinada como A en la tomografía 1, va desde la superficie hasta los 13.5 metros de profundidad aproximadamente, con una extensión de 85 metros de longitud a lo largo de la superficie. Está representado en colores que van de azul marino hasta verde pasto, con tendencia transversal, siendo la parte más profunda la que está a los 70 metros de longitud en superficie de medición, con valores de resistividad que van alrededor de los $8.49 \text{ ohms} \cdot \text{m}$, considerados como bajos para este estudio, hasta pasando los $99 \text{ ohms} \cdot \text{m}$, considerados como medios también para este estudio.

La unidad geoelectrica B en la tomografía 1 comienza a una profundidad de 4.5 metros, llegando hasta los 18.5 metros, teniendo un espesor de 13.5 metros, donde el valor más profundo se encuentra a los 40 metros de medición en la superficie en dirección noroeste. Esta unidad cuenta con una extensión de 60 metros y se determina desde el color amarillo al color vino, con valores de resistividad que van desde los $100 \text{ ohms} \cdot \text{m}$ hasta los $1399.60 \text{ ohms} \cdot \text{m}$.

La longitud de medición de la línea es de 100 metros, el modelo de resistividad, obtenido mediante la inversión de datos, tiene un margen de error de 5.9%, lo que es considerable en el modelo debido al ajuste de la escala de resistividad, para que esta sea congruente con los datos reales de resistividad aparente que fueron tomados en campo.

Línea 2

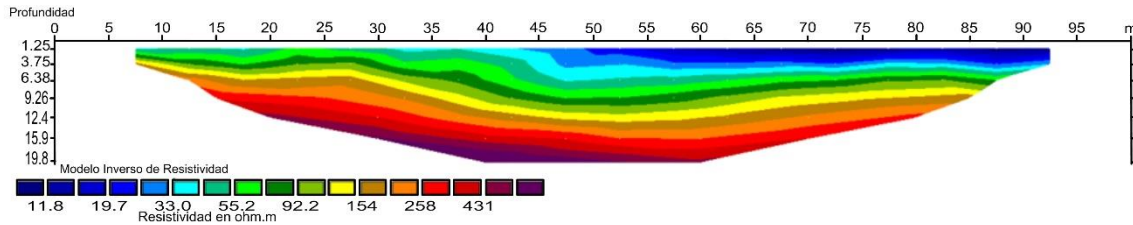


Figura 23. Imagen del modelo inverso de resistividad de la tomografía 2, con orientación Suroeste

En la figura 23, se pueden percibir contrastes con un comportamiento similar a la tomografía 1, inclusive, el rango en la escala de resistividades es similar al de la figura 20.

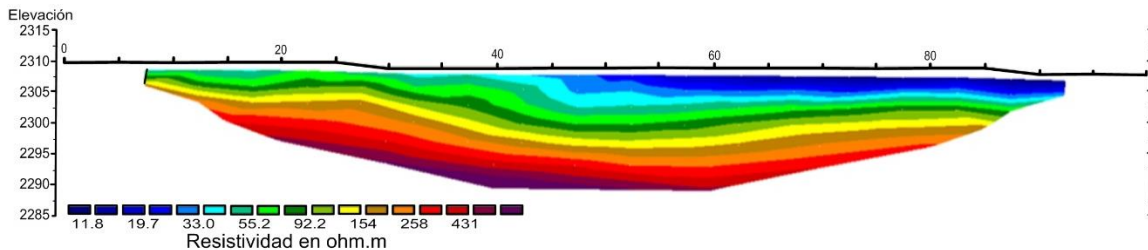


Figura 24. Imagen de la tomografía de la línea 2 con la topografía de la misma

En la figura 24, se puede notar la distribución de las resistividades como en la figura 23, pero se agrega la topografía existente en la zona a lo largo de la línea de medición. Al igual que en la tomografía uno, se pueden notar los ligeros cambios en la topografía, sin embargo tampoco existían pendientes abruptas, por lo que, ocurrirá lo mismo que la tomografía anterior para la interpretación.

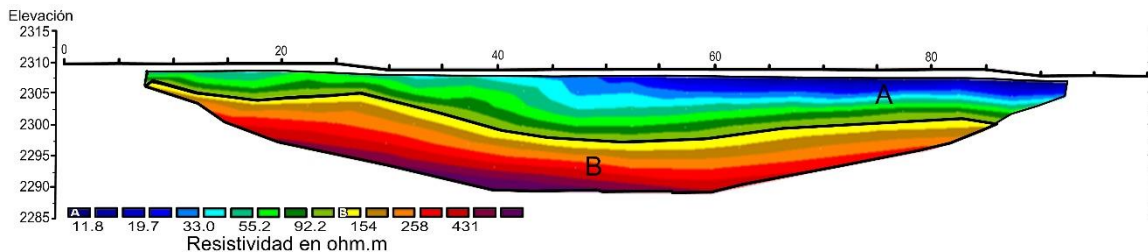


Figura 25. Clasificación de las unidades geoelectricas de la tomografía 2

La unidad geoelectrica A en la tomografía 2, tiene una extensión de 95 metros y se encuentra delimitada en la línea de estudio a partir de los 7.5 metros

hasta los 92.5 metros, a una profundidad que va desde la superficie hasta los 3 metros en su punto menos profundo y hasta los 10 metros en su punto más profundo, aproximadamente. Esta unidad geoelectrica está determinada con los mismos colores que la unidad geoelectrica A en la tomografía 1, es decir, del azul marino al verde pasto, pero representando por los valores de resistividad de la figura 24, que van desde los $10.38 \text{ ohms} \cdot m$ hasta aproximadamente los $92.2 \text{ ohms} \cdot m$.

La unidad geoelectrica B en la tomografía 2, se limita de los 7.5 metros hasta los 86 metros en la superficie, por lo que tiene una extensión de 78.5 metros. Dicha unidad comienza a una profundidad aproximada desde los 3 metros, llegando hasta su punto más profundo a los 20 metros con un espesor de 18.5 metros, está representada desde el color amarillo hasta el color vino, al igual que la tomografía 1, con resistividades de entre los $100 \text{ ohms} \cdot m$ hasta los $819.62 \text{ ohms} \cdot m$.

La longitud de medición de la línea es de 100 metros, el modelo de resistividad se obtuvo con un error cuadrático medio de 6.3%, como el primer modelo, este margen de error es considerable debido al ajuste de la escala de resistividad, para que esta sea congruente con los datos reales de resistividad aparente que fueron tomados en campo.

Como se puede notar, el comportamiento de ambas líneas de medición tienen una tendencia similar en cuanto a los valores de resistividad y el margen de error, a mayor profundidad aumenta el valor de resistividad. Estos cambios son graduales en las imágenes de las tomografías, sin embargo, están ubicadas en diferentes puntos de la zona de medición, lo que indicaría que cada color en cada línea tiene la misma característica del material pero en diferente posición.

Ambas líneas de medición muestran valores parecidos para las unidades geoelectricas A, que van desde los $8.49 \text{ ohms} \cdot m$ hasta los $99 \text{ ohms} \cdot m$.

5.1 Interpretación

Según la tabla 7 de resistividades (Ver anexos), la unidad geoelectrica A se asocia a tobas volcánicas por los valores de resistividad, las cuales tienen un valor que va de los $20 \text{ ohms} \cdot m$ hasta los $99 \text{ ohms} \cdot m$, lo que es representado por los tonos azules a verdes en las figuras 20 y 23. La geología del sitio sugiere la existencia de tobas volcánicas de dos tipos: tobas riolíticas y tobas andesíticas. El factor para la diferencia de estas está en los valores de resistividad que existe en la unidad geoelectrica A, esto aunado a que conforme aumenta la profundidad aumenta el valor de resistividad, lo que sugiere diferentes características en el suelo, esto sin ser muy abrupto, pero indicaría que la unidad geoelectrica A se compone de dos materiales similares (los dos tipos de tobas), correspondiendo la parte de la sección en azules a un tipo de toba riolítica y la parte de la sección en verdes al tipo de toba andesítica.

Para las unidades geoelectricas B, que tienen una resistividad mayor, con valores que oscilan entre los $100 \text{ ohms} \cdot m$ hasta los $1399.60 \text{ ohms} \cdot m$, según la tabla 7 de resistividades en el apartado de anexos, se podrían considerar la transición entre la unidad geoelectrica A con tobas andesíticas a la unidad geoelectrica B compuesta de basalto, ya que este material tiene un rango de resistividad que es mayor y va en aumento. Este material se determina debido a que la zona presenta composición volcánica, y que además se pueden apreciar en la parte expuesta (figura 1) cuando se iniciaron los trabajos de construcción del parque, siendo un tipo de material existente muy común. La aseveración anterior se sustenta con la tabla 7, debido a que los basaltos tienen una resistividad que va desde los $100 \text{ ohms} \cdot m$ hasta el orden de $1.3 \times 10^7 \text{ ohm} \cdot m$, que es el rango de resistividad de la unidad geoelectrica B en ambas tomografías.

5.2 Litología

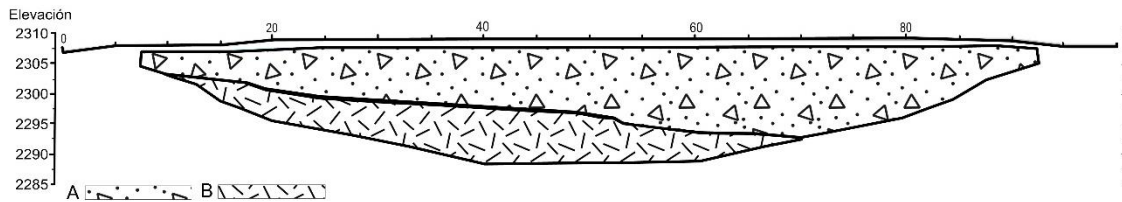


Figura 26. Sección litológica a partir de la tomografía 1

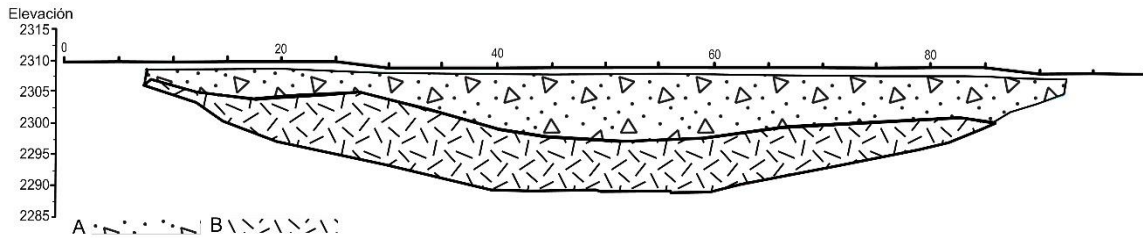


Figura 27. Sección litológica a partir de la tomografía 2

Los valores de resistividad obtenidos en ambas tomografías, sugieren la presencia de diferentes materiales en la zona. Dentro de los valores de resistividad, los basaltos y las tobas son los que más se adecuan al estudio. Esto también es confirmado por el tramo descubierto, de lo que se supone son vestigios de la zona arqueológica, ya que se observa la forma de lo que parece ser una escalinata, lo cual da la pauta para reafirmar la composición de dicho material a simple vista, y es corroborado a partir de los valores de resistividad anteriores.

La unidad geoelectrica A pertenece a material depositado a través del tiempo, que posteriormente sirvió de relleno, que por la zona, se define como rocas volcánicas. La composición de la zona, gracias a la carta geológico minera, se define en una mezcla de tobas: las tobas andesíticas y las tobas riolíticas. Según la tabla 6 en la parte de anexos, las andesitas tienen valores de resistividad del rango de $1.7 \times 10^2 \text{ ohms} \cdot m$ y según la tabla 7, las tobas riolíticas tienen un rango de resistividad de 6 a $73 \text{ ohms} \cdot m$. Con estos valores, se define que desde la superficie de la unidad geoelectrica A está formada por tobas riolíticas, y la zona más profunda de la misma sección, está formada por tobas andesíticas.

Dentro de la unidad geoelectrica B, encontramos valores de resistividad que coinciden con el rango de los basaltos, como se observa en la tabla 7. Esta sección es interesante porque marca un cambio en la resistividad de la zona de estudio, la cual tiene un aumento gradual pero no exponencial. Sin embargo, es suficiente para determinar un cambio de material en la zona.

Esta unidad geoelectrica se determina en material basáltico, pues coincide con la geología de la cual se supone está compuesta la estructura. Según la figura 1, se observa el material expuesto en una parte, que es confirmado por los valores de resistividad en la unidad geoelectrica.

Las figuras 28 y 29 muestran los límites de cada unidad geoelectrica con la representación litológica y algunos puntos de referencia:

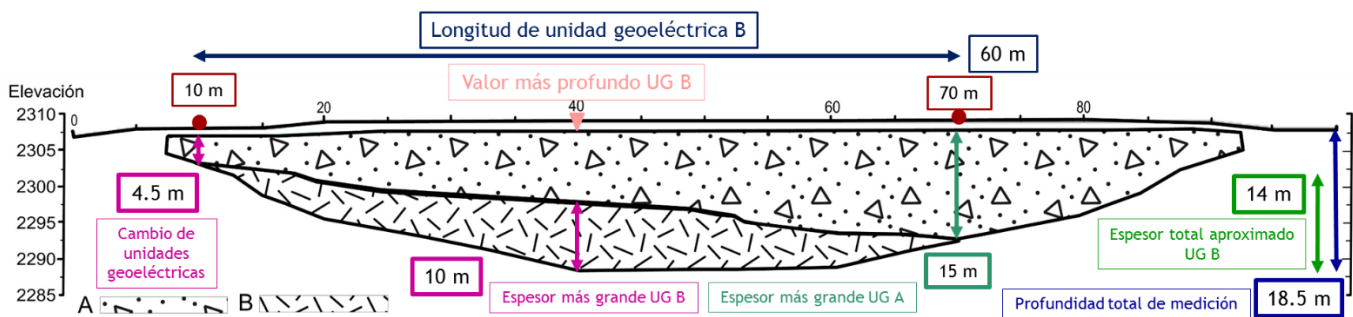


Figura 28. Sección litológica a partir de la tomografía 1 con anotaciones

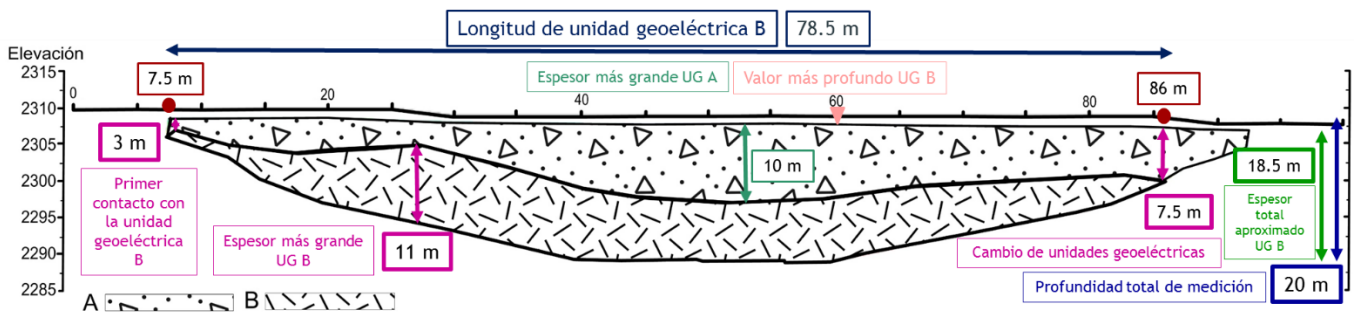


Figura 29. Sección litológica a partir de la tomografía 2 con anotaciones

Visualización en planta y 3D de las tomografías y correlación con mapa de anomalía magnética

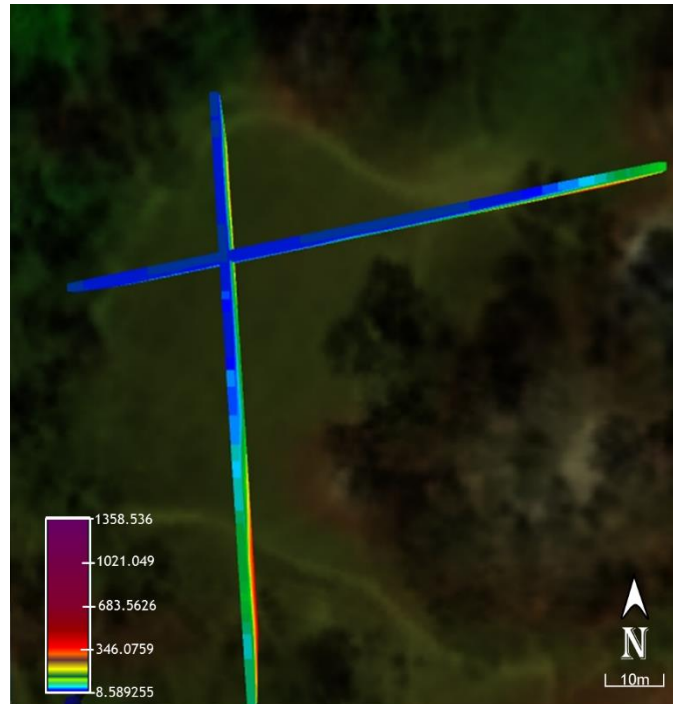


Figura 30. Ubicación de ambas tomografías en la zona de estudio con vista aérea de la zona

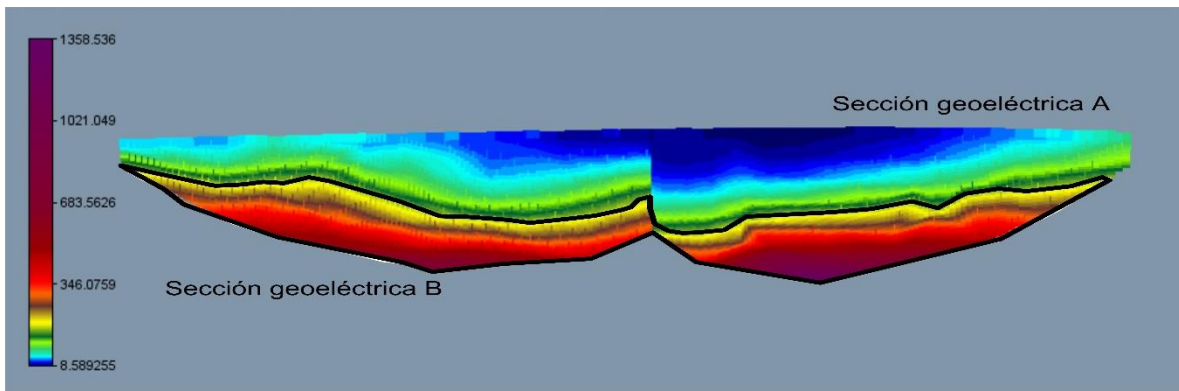


Figura 31. Visualización frontal de la intersección de ambas tomografías a profundidad a partir de la superficie

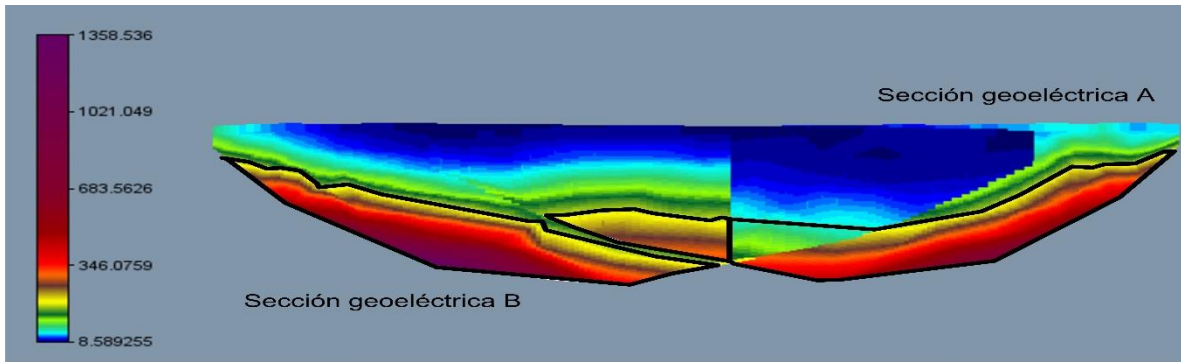


Figura 32. Visualización posterior de la intersección de ambas tomografías a profundidad a partir de la superficie

En las figuras 30, 31 y 32, se nota como coinciden las tomografías entre sí. Cada imagen muestra los colores respectivos a los altos, medios y bajos resistivos, es decir, las unidades geoelectricas A con los bajos, las unidades geoelectricas B con los medios y las unidades geoelectricas C con los altos. Aquí se pueden observar como los colores se unen entre sí, manteniendo la misma tendencia entre las tomografías, es decir, que los materiales son iguales en las mismas áreas.

5.3 Correlación con prospección magnética

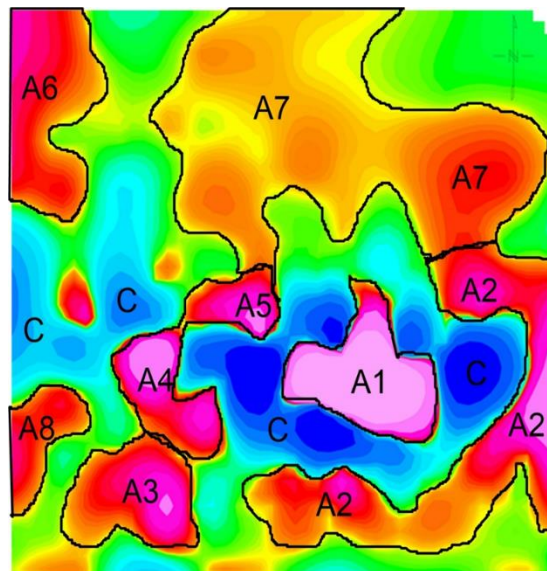


Figura 33. Mapa de anomalía magnético con la zonificación del área de estudio (García Aguilar, 2021)

Según García Aguilar (2021), los mapas de derivada vertical acentúan las anomalías de cuerpos someros y están representados por anomalías positivas. Para este estudio, dichas anomalías derivan en tonos que van desde el color amarillo hasta colores rosados, presentando un cambio de tonalidad debido a un cambio de material, que se puede asociar a un cuerpo grande que corresponde a la estructura arqueológica presente en el interior del cerro con características del contorno de una estructura piramidal. En la figura 33 se observa como las tonalidades amarillas a rosadas, definidas por García Aguilar (2021) como zona A, asociadas a la formación de vestigios arqueológicos y los contrastes de estas tonalidades, llamados zona C, están formados por el relleno de materiales de la zona debido a huecos o material pobremente consolidado.

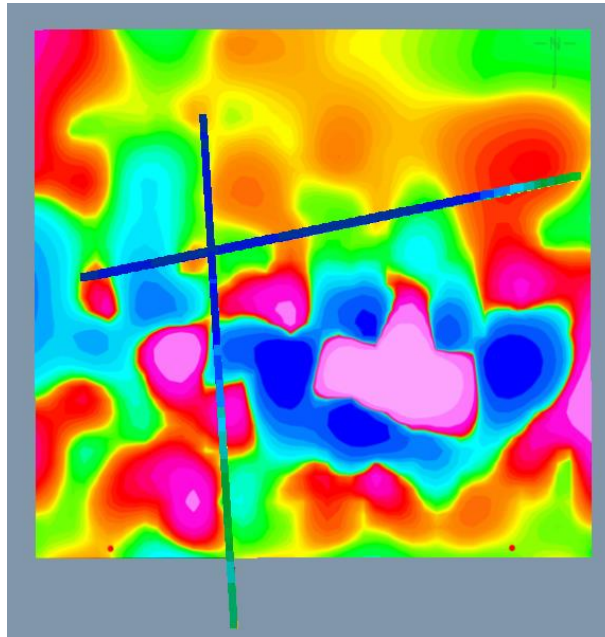


Figura 34. Visualización en planta de la sobreposición del estudio magnético con el estudio eléctrico (ambas tomografías) en la misma zona

En la figura 34 se observa la sobreposición de las tomografías con el mapa magnético con la intención de correlacionar hallazgos en cada uno de estos resultados. Se debe de considerar que al ser estudios diferentes, tienen parámetros diferentes, es decir, que mientras para el estudio eléctrico se usa la resistividad, el estudio magnético usa el campo magnético, sin embargo para este

caso, los valores de resistividad que pertenecen a las unidades geoelectricas B de ambas tomografías son valores altos, los cuales se relacionan con los altos magnéticos observados en la zona, es decir, las tonalidades rojas en la figura 35 del levantamiento magnético, coinciden con las tonalidades rojas del levantamiento eléctrico en la misma figura.

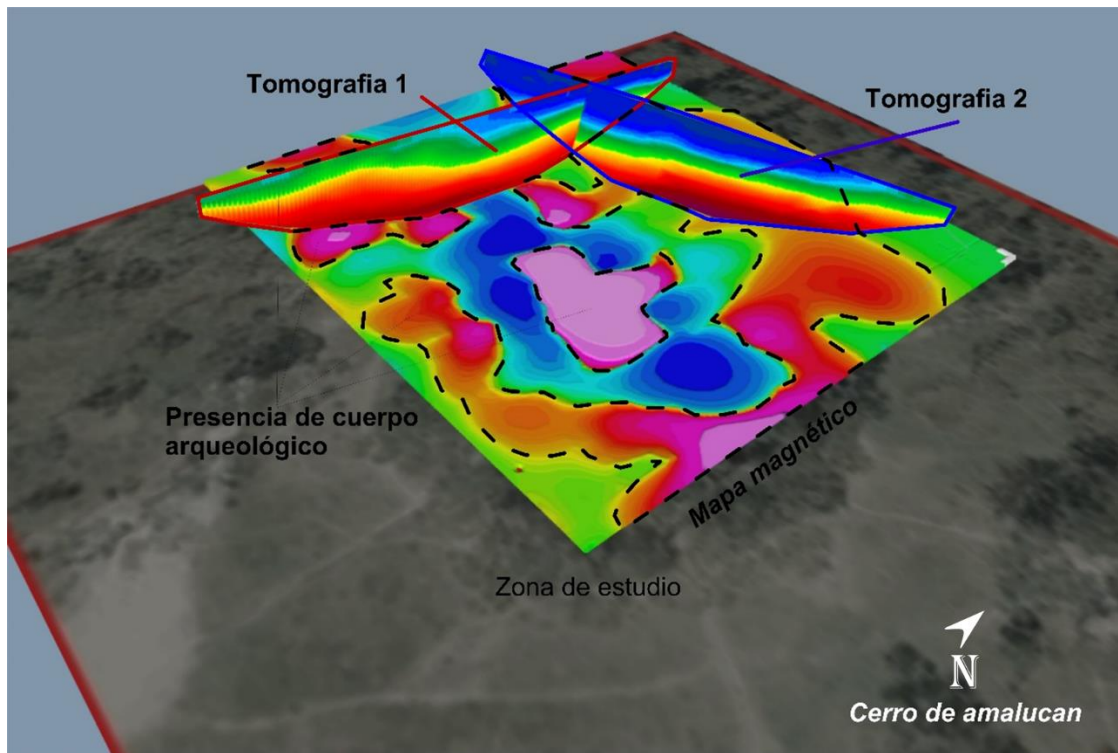


Figura 35. Visualización del estudio eléctrico y el estudio magnético en la misma zona de medición

En la figura 35 se observa otra perspectiva de la figura 34 y se añade la ubicación de la zona de estudio en el cerro de Amalucan, donde se aprecia la tomografía 1, que está contorneada con color rojo; la tomografía 2, contorneada con color azul y las anomalías del mapa magnético. Las anomalías que son significativas para el estudio están contorneadas con línea negra punteada, las cuales indican la presencia de cuerpos arqueológicos en la zona y que coinciden con la ubicación de los valores de resistividad asociados al basalto a profundidad en las tomografías.

En cuanto a la profundidad de la estructura, el método de prospección magnética también permite obtener una medida aproximada de la distribución de las fuentes de anomalías. La estimación de la profundidad de dichas fuentes se llevó a cabo por medio del análisis espectral de potencia promedio. La técnica consiste en transformar datos del dominio espacial al de las frecuencias (k), mediante la transformada de Fourier realizando un promedio del espectro y clasificando fuentes de acuerdo a su pendiente en el dominio de k (García Aguilar, 2021). Lo anterior permite cuantificar la profundidad de las fuentes.

El estudio magnético muestra que a una profundidad de 6.20 metros, se observa una estructura de interés, lo que coincide para las tomografías, con el sitio donde se presenta la separación de unidades geoelectricas A y B.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Las mediciones de resistividad determinaron el material existente en la zona, así como la comparación con la carta geológico minera, para definirla como una mezcla existente de tobas riolíticas, tobas andesíticas y basaltos, debido a la ubicación de la formación de los cerros de la ciudad. La estructura encontrada en la zona está compuesta de basaltos, lo cual fue corroborado por el material expuesto en la zona de la escalinata y por las mediciones de resistividad en la parte superior del cerro.

Para esta investigación se logró visualizar una profundidad aproximada de 20 metros desde la cima del cerro, lo que nos permite reconocer las diferentes unidades geoelectricas que la componen, en este caso, una diferenciación de materiales. Se visualizaron 2 unidades geoelectricas (A y B) con diferentes características: la unidad geoelectrica A comprende los valores de resistividad más bajos del estudio que van desde los $8.49 \text{ ohms} \cdot m$ hasta los $99 \text{ ohms} \cdot m$, que son asociados a tobas, y que por sus rangos de resistividad podrían contener una mezcla entre tobas riolíticas y tobas andesíticas. La unidad geoelectrica B contiene los valores de resistividad que van desde los $100 \text{ ohms} \cdot m$ hasta los $1399.60 \text{ ohms} \cdot m$ y fueron asociados a basaltos. Esta unidad es la que representa la estructura arqueológica; la cual, fue cubierta por material de transporte (unidad geoelectrica A) a lo largo del tiempo que estuvo expuesta la estructura hasta ser cubierta totalmente. La estructura en la tomografía 1 mide 14 metros de espesor y se encuentra a una profundidad desde los 4.5 metros. La estructura en la tomografía 2 mide 18.5 metros de espesor y se encuentra a una profundidad desde los 3 metros.

La estructura se podría presentar entre los 3 y 4.5 metros de profundidad y llegar hasta aproximadamente los 20 metros con dirección Noroeste. La variación entre las profundidades de las tomografías indica que el material se encuentra a lo largo de las líneas de medición pero en diferente distribución en el subsuelo. Las

dimensiones de la estructura de interés corresponden a una medida aproximada de 60 metros de longitud para la tomografía 1 y a 78.5 metros para la tomografía 2.

La correlación con la prospección magnética permitió visualizar datos de campo magnético en conjunto con datos de resistividad del estudio eléctrico en la misma zona de medición. Los datos de campo magnético permitieron conocer la distribución en la que se podría encontrar la estructura arqueológica en planta y la posible existencia de otro material en las llamadas zona C de la zona de estudio.

Para calcular la profundidad con el estudio magnético, se utilizó el espectro de potencia radial, el cual arrojó que a una profundidad de 6.20 metros existía la presencia de una fuente somera. Coincidentemente, se aproxima a la profundidad donde existe una separación entre unidades geoelectricas A y B en el estudio eléctrico, es decir, que a esa profundidad empieza la estructura.

6.2 Recomendaciones

Realizar más estudios eléctricos, del mismo tipo y arreglo (TER con arreglo Wenner Schlumberger) en las diferentes pendientes del cerro para confirmar la existencia de la estructura arqueológica de acuerdo con la distribución de materiales geológicos en la zona.

Asimismo, establecer otras secciones que se puedan correlacionar con los estudios magnéticos ya existentes para reconocer si es que existen más estructuras, a mayor profundidad o que sean parte de la misma.

Bibliografía

- Aguado Benedí, M. J. (1998). *Resistencia de la piel al paso de la corriente eléctrica en adultos trabajadores*. Madrid.
- Allende, A. (02 de Marzo de 2019). Antecedentes de la zona arqueológica del cerro de Amalucan, Puebla. (A. Rosales Dominguez , Entrevistador)
- Argote Espino, D. L. (2002). *Caracterización geofísica de sitios arqueológicos: medio rural y urbano*. México.
- Auge, M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea*. Buenos Aires, Argentina.
- Barba, L., Lazos, L., Link, K. F., Ortiz, A., & López Luján, L. (1998). Arqueometría en la Casa de las Águilas. *arqueología mexicana*, 20-26.
- Blandon, J. A., Meza, F., & Castañeda Salazar, J. A. (2018). *Metodología para la prospección arqueológica mediante la aplicación de inducción electromagnética* (Vol. 23). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Brito Schimmel, P., & Carreras, C. (2005). *Aplicación de Métodos Geofísicos en Arqueología: Una Recopilación sobre el Actual Estado de la Cuestión en España*. Barcelona.
- Canizal, I. (25 de Febrero de 2018). Amalucan, a la defensa del vestigio histórico. *El Sol de Puebla*.
- Carreras Monfort, C. (2000). Aplicacions de les tecnologies de la informació i la comunicació en arqueologia: la prospecció geofísica. *Revista Digital d'humanitats*.
- Díaz Anaya, E. P. (2010). *Implementación del Código Zondres2D para la Modelación Directa e Inversa de Datos de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D*. México.
- EGYES. (s.f.). EGYES S.A. de C.V. Obtenido de Exploración Geofísica Y Estudios del Subsuelo del Centro S.A. de C.V.: <https://www.egyes.mx/metodo-electrico/>
- El Universal. (29 de Junio de 2018). Cerro de Amalucan, parte del patrimonio histórico de Puebla. *El Universal*.
- EPM. (06 de 2009). Medida de Resistividad Eléctrica en el Suelo. Medellín, Colombia.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 9.
- Fleisch, D. (2008). *A Student's Guide to Maxwell's Equations*. UK: Cambridge.
- García Moll, R. (2010). Arqueología y antropología física. *Arqueología Mexicana*.
- García Aguilar, S. (2021). *Caracterización geofísica a partir de Magnetometría para la delimitación de estructuras arqueológicas en el cerro de Amalucan, Puebla*. Puebla.
- García Huerta, E. (29 de Junio de 2018). Cerro de Amalucan, patrimonio cultural. *MILENIO*.

- Google. (2020). *Google*. Obtenido de Google:
https://www.google.com/search?q=gps+magellan&sxsrf=ALeKk010J7LOhioa3mzXRlnwjMGOBg_0Kw:1597858672544&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjq5s-056frAhWDI60KHbHLBbsQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1517&bih=694
- Google Earth. (2020). *Google Earth*. Obtenido de Google Earth:
<https://earth.google.com/web/@0,0,-24018.82718741a,36750128.22569847d,35y,0h,0t,0r/data=KAE>
- Google Maps. (2020). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps:
<https://www.google.com.mx/maps>
- INAH. (14 de Junio de 2010). Retoman uso de cal en monumentos. México, México, México.
- INEGI. (1985). *Carta geologico minera de Puebla E14-B43*. México: INEGI.
- INEGI. (1987). *Provincia Fisiográfica de Puebla*. México: INEGI.
- INEGI. (2000). *Síntesis Geográfica del Estado de Puebla*. México: INEGI.
- INEGI. (2019). *Faja Volcánica Trans-Mexicana*. México.
- INEGI. (2019). *Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática:
<https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>
- INFOBAE. (3 de Febrero de 2021). El hallazgo de una tumba en Monte Albán que detonó el desarrollo de la arqueología mexicana. México, México, México.
- Iriarte Sierra, L. (2011). *Imágenes 3D de Tomografía Eléctrica en la Zona Arqueológica de Pahñú, Edo. de Hidalgo*. México: UNAM.
- Jewett, S. (2004). *Physics for Scientists and Engineers*. California : Thomson Brooks/Cole.
- Koefoed, O. (1979). *Determination of Resistivity Sounding Filters by The Wiener-Hope Least-Squares Method*. UK: European Association of Geoscientists & Engineers.
- Landviser. (2016). *Landviser LLC*. Obtenido de Enlightening Research:
<https://www.landviser.net/content/res2dinv-2d-geophysical-inversion-software-resistivity-induced-polarization>
- Loke, M. H. (1995). Least-Squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics, Vol. 60* (págs. 1682-1690). Maylasia: Free.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical Imaging Surveys for Enviromental and Engineering Studies*. Penang: Geometrics.
- López Ramos, E. (2018). *Geología General y de México*. México: Trillas.
- Medina Martínez, L., & Berrera Rodríguez, R. (2012). Esculturas de Ichcateopan, Guerrero. *arqueología mexicana*, 77-81.
- Mirón, M. (27 de Junio de 2018). Descubren pirámide en el Cerro de Amalucan. *El Sol de Puebla*.

- Nalda, E. (1998). La arqueología mexicana. *arqueología mexicana*, 6-13.
- Orellana, E., & Mooney, H. M. (1966). *Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures*. Madrid .
- Peña, J. A. (2011). Estudios geofísicos en yacimientos arqueológicos andaluces. Periodo 1985-2010. *I Congreso de Prehistoria de Andalucía: la tutela del patrimonio prehistórico*, 131-138.
- Pérez, I., & Santillan, M. L. (2019). *Especial Arqueología Mexicana: ¿Cómo se estudia un sitio? Primera parte*. México: UNAM.
- Reyes Serrano, J. R. (2013). *Estudio Geofísico de Resistividad para definir las Características Eléctricas del Subsuelo que sirvan de apoyo a la Identificación de capas con Posibilidades de Contener Agua en la Zona Oriental del Municipio de Hidalgo de Parral, Estado de Chihuahua*. México: UNAM.
- Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. England: Wiley.
- SEG. (1996). The Society of Exploration Geophysicists. Tulsa, Oklahoma, EUA.
- Server, T. L., & Irwin, D. E. (2003). *Landscape Archaeology: Remote-sensing investigation of the ancient Maya in the Peten rainforest of northern Guatemala* (1 ed., Vol. 14). Cambridge: Cambridge University Press.
- Telford, W. M. (1976). *Applied geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- UNAM. (2009). *El Legado Atronómico de Nuestros Ancestros*. México: UNAM.

Anexos

Tabla completa de los datos tomados en campo con el formato para el procesamiento.

L1Amalucan			
5			
7			
90			
1			
0			
7.5	5	1	89.9
12.5	5	1	72.88
17.5	5	1	59.87
22.5	5	1	38.65
27.5	5	1	26.61
32.5	5	1	21.83
37.5	5	1	16.94
42.5	5	1	7.064
47.5	5	1	14.48
52.5	5	1	13.92
57.5	5	1	14.87
62.5	5	1	13.7
67.5	5	1	15.25
72.5	5	1	13.19
77.5	5	1	13.98
82.5	5	1	14.1
87.5	5	1	13.78
92.5	5	1	13.25
12.5	5	2	109.4
17.5	5	2	87.15
22.5	5	2	60.42
27.5	5	2	44.54
32.5	5	2	35.96
37.5	5	2	27.9
42.5	5	2	22.05
47.5	5	2	20.39
52.5	5	2	21.18
57.5	5	2	19.85
62.5	5	2	23.93
67.5	5	2	18.4
72.5	5	2	16.73
77.5	5	2	16.43

82.5	5	2	18.44
87.5	5	2	18.7
17.5	5	3	115.2
22.5	5	3	75.86
27.5	5	3	58.58
32.5	5	3	50.76
37.5	5	3	39.95
42.5	5	3	31.6
47.5	5	3	30.65
52.5	5	3	30.65
57.5	5	3	28.79
62.5	5	3	25.24
67.5	5	3	25.63
72.5	5	3	24.38
77.5	5	3	21.39
82.5	5	3	23.73
22.5	5	4	92.24
27.5	5	4	68.99
32.5	5	4	60.03
37.5	5	4	52.22
42.5	5	4	41.74
47.5	5	4	39.86
52.5	5	4	41.98
57.5	5	4	41.27
62.5	5	4	33.25
67.5	5	4	35.73
72.5	5	4	36.6
77.5	5	4	33.7
27.5	5	5	82.93
32.5	5	5	71
37.5	5	5	61.13
42.5	5	5	50.61
47.5	5	5	48.78
52.5	5	5	56.19
57.5	5	5	42.11
62.5	5	5	41.3
67.5	5	5	47.48
72.5	5	5	39.2
32.5	5	6	94.03
37.5	5	6	71.64
42.5	5	6	60.25
47.5	5	6	62.41
52.5	5	6	63.89

57.5	5	6	61.37
62.5	5	6	66.18
67.5	5	6	53.56
37.5	5	7	86
42.5	5	7	73.88
47.5	5	7	67.31
52.5	5	7	78.2
57.5	5	7	77.35
62.5	5	7	61.87
42.5	5	8	76.8
47.5	5	8	76.95
52.5	5	8	95.4
57.5	5	8	78.45
47.5	5	9	76.9
52.5	5	9	89.59

Tabla 5. Tabla de datos totales de la muestra para el procesamiento de datos según el tipo de arreglo (Tabla 3).

Pasos de procesamiento

- ❖ A la tabla 3 que se crea en Surfer ® se le adjunta la tabla de Excel ® de la base de datos, desde la primer columna (celda de *datos* en la tabla 3).
- ❖ Para que el mapa sea lo más parecido a la zona de estudio se puede agregar la topografía, que está determinada por las altitudes tomadas en campo. Al momento de procesar los datos, se deben indicar las condiciones para que el mapa que se va a crear contenga la topografía del terreno, para esto se colocara el número “2”.
- ❖ Se pondrá el número de electrodos en topografía y la distancia del primer electrodo (secuenciado por la distancia de los demás), todo esto en el mismo formato que la tabla anterior, en columna de manera descendente. En la celda continua a la distancia de los electrodos, se agregan sus valores en altitud a nivel de mar.
- ❖ Para finalizar la tabla de Surfer ®, se colocan seis ceros a manera de columna:

Distancias		Nivel	ρ_a
Punto inicial	Espaciado		

...
Topografía del terreno	2		
Número de electrodos en topografía			
Distancia del primer electrodo		Altitud	
	0		
	0		
	0		
	0		
	0		
	0		

Tabla 6. Muestra de cómo introducir los datos para el procesamiento con topografía en Surfer®

- ❖ La tabla solo debe de tener datos numéricos, por lo que la única celda que debe de estar escrita es la primera, con el nombre del documento.
- ❖ Con todas las especificaciones anteriores, se guarda en una carpeta con terminación “.dat”.
- ❖ Recién abierto el programa RES2DINV®, en el apartado para editar, se deben de exterminar los puntos malos, a criterio de la persona que este procesando los datos y que concuerden con las tendencias de cada línea de medición.
- ❖ Para rectificar que los datos de inversión correspondan al modelo creado, se revisan en display y luego en inversión de resultados, para posteriormente crear el modelo con topografía, en el apartado de display section.
- ❖ Se debe guardar el nuevo documento con características de Surfer®, se revisa que los datos correspondan al modelo que se acaba de obtener, para continuar con el procesamiento, debe contener la terminación “topres” en formato .dat.
- ❖ Se elimina la primera fila, con los encabezados de las celdas y se guarda el nuevo documento.
- ❖ Se procede a hacer el grid, para el relleno de los puntos de la tomografía y así, tener mayor resolución en la imagen.

- ❖ Se abre el nuevo archivo el *grid* de terminación *surfer grid*, para poder guardar el mapa en terminación *datxyz* y hacer el tratado de los datos en Excel®.
- ❖ Se ordenan los datos de mayor a menor para que se puedan eliminar los datos con exponencial.
- ❖ Se reordena en el formato *x, y, z y resistividad*, en terminación *.dat* para abrir en Voxler® y hacer el mapa 3D.
- ❖ Para hacer el mapa, se abre el documento con formato *x, y, z y resistividad* en el programa Voxler®, para crear un mapa de dispersión. Se pueden agregar ciertos elementos para hacer una visualización completa de la zona de estudio, tales como ejes, colores e intensidades de los mismos, etiquetas, entre otros.

Tablas de Referencia

Roca, Material y Agua	Resistividad ($\Omega.m$)
Arcillas	1 - 20
Arenas	50 - 500
Areniscas	50 - 5 000
Arenas y Gravas Secas	1 000 - 10 000
Arenas y Gravas con agua dulce	50 - 500
Arenas y Gravas con agua salada	0.5 - 5
Arenas arcillosas	50 - 300
Arenas de cuarzo	30 - 10 000
Aguas subterráneas en granito y rocas metamórficas	0.20 - 100
Aguas subterráneas en calizas y acarreos	20 - 50
Aguas salobres	1 - 10
Agua potable superficial	20 - 300
Agua de mar	< 0.02
Agua destilada	> 500
Conglomerado	1 000 - 10 000
Calizas	300 - 10 000
Brecha volcánica	100 - 2 000
Esquistos	0.5 - 5

Esquistos arcillosos o alterados	100 - 300
Esquistos sanos	300 - 3 000
Granito	300 - 10 000
Gneis y granito alterado	100 - 1 000
Gneis sano	1 000 - 10 000
Gravas	100 - 10 000
Basaltos	300 - 10 000
Limos	30 - 500
Margas	50 - 5 000
Pizarras	100 - 1 000
Tobas volcánicas	20 - 100

Tabla 7. Resistividades más comunes de varias rocas, materiales y agua (Orellana & Mooney, 1966)

Tipo de roca	Intervalo de Resistividades (ohm.m)
Granito	3×10^2 a 10^6
Pórfido granítico	4.5×10^3 (húmedo) a 1.3×10^6
Pegmatita	4×10^3 (húmedo)
Albita	3×10^2 (húmedo) a 3.3×10^3 (seco)
Sienita	102 a 106
Diorita	104 a 105
Pórfido de diorita	1.9×10^3 (húmedo) a 2.8×10^4 (seco)
Porfiritita	$10^{-5} \times 10^4$ (húmedo) a 3.3×10^3 (seco)
Pórfido carbonizado	2.5×10^3 (húmedo) a 6×10^4 (seco)
Pórfido de cuarzo	3×10^2 a 9×10^5
Diorita cuarzosa	2×10^2 a 2×10^6 (hum) a 1.8×10^5 (seco)
Pórfidos (varios)	60 a 104
Dacita	2×10^4 (húmedo)
Andesita	4.5×10^4 (húmedo) a 1.7×10^2 (seco)
Pórfido de diabasa	103 (húmedo) a 1.7×10^5 (seco)
Diabasa (varios)	201 a 5×10^7
Lavas	102 a 5×10^4

Gabro	103 a 6×10^6
Basalto	101 a 1.3×10^7 (seco)
Norita de olivino	103 a 6×10^4 (húmedo)
Peridotita	3×10^3 (húmedo) a 6.5×10^3 (seco)
Corneana	8×10^3 (húmedo) a 6×10^7 (seco)
Esquistos	201 – 104

Tabla 8. Resistividad de las rocas (Telford W. M., 1976)

Asociación Geológica	Resistividad (ohm por m)
Toba Riolíticas	6 - 73
Conglomerado polimíctico	96 - 102
Lutita, Caliza	Mayor a 92

Tabla 9. Tabla de resistividad de materiales en corte geoelectrico (Reyes Serrano, 2013)