



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Colegio de Geofísica

Caracterización de estratos con presencia de material fósil, a través de los métodos no destructivos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre en el Ramsar - Valsequillo, Puebla, México.

TESIS

Presentada para obtener el título de:

Licenciatura en Ingeniería Geofísica

Presenta:

Ezequiel López Abraján

Director interno:

M.C. Julio Cesar González Hernández

Director externo:

Dr. Iván Alarcón Durán

Puebla, Pue.

Abril, 2024



Oficio No. SAC/0930/2023

**C. Ezequiel López Abraján -201730836-
Pasante de la Licenciatura en 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, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“CARACTERIZACIÓN DE ESTRATOS CON PRESENCIA DE MATERIAL FÓSIL, A TRAVÉS DE LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE EN EL RAMSAR – VALSEQUILLO, PUEBLA, MÉXICO.”

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 22 de mayo de 2023

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



**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 del tema de tesis:

“CARACTERIZACIÓN DE ESTRATOS CON PRESENCIA DE MATERIAL FÓSIL, A TRAVÉS DE LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE EN EL RAMSAR – VALSEQUILLO, PUEBLA, MÉXICO”

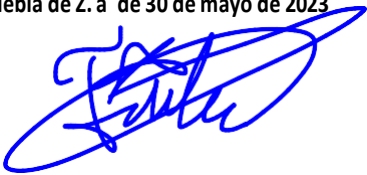
Presentada por el C. Ezequiel López Abraján -201730836-, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0930/2023 con fecha de emisión 22 de mayo de 2023, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

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

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a de 30 de mayo de 2023



**Mtro. Julio César González Hernández Asesor de
Tema**

M'JCGH/BARV

C.c.p. Archivo

Agradecimientos

Quiero agradecer infinitamente a mis padres Ezequiel y Rosa, por darme las enseñanzas de vida que me han permitido llegar a donde estoy, gracias por su apoyo incondicional, por el cariño, regaños y consejos. A mis hermanas por su cariño y compañía en cada momento de vida, siempre estaré agradecido por todos aquellos recuerdos memorables que me han dado. En general a toda mi familia por estar conmigo y apoyarme.

A mis asesores, al Maestro Julio por darme su apoyo en todo momento, guiarme y todas las enseñanzas que me dio a lo largo de toda mi carrera. Al Dr. Iván quien ha confiado en mi como nadie lo había hecho, le agradezco por permitirme realizar mi proyecto de tesis en colaboración con él y el INAH, gracias por la confianza.

A mi universidad que me ha forjado no solo como profesional, sino también como persona. Le agradezco al INAH, por permitirme realizar mi proyecto en sus instalaciones y por recibirme en su programa de servicio social.

No puedo dejar pasar la oportunidad para agradecer infinitamente a mis amigos. A aquellos que conocí en INAH, quienes a pesar de no pertenecer a la misma carrera me dieron su amistad, a todos ellos muchas gracias. A mis amigos de vida (Ahiram, Diana, Víctor) amigos que a pesar del paso del tiempo y la distancia siguen apoyándome. A mis amigos de universidad y nueva familia (Karen, Lilith, Lupita, Limón, Gerardo, Gustavo) si no fuera por ellos no hubiese podido culminar mi carrera, les agradezco por su amistad y apoyo, siempre estaré en deuda por todo lo que han hecho por mí, así mismo, a todos mis compañeros de carrera quienes siempre fueron muy amables y me apoyaron en momentos que lo necesitaba, en especial a Sara quien ha confiado en mí incondicionalmente, gracias por la amistad, cariño y confianza. Un agradecimiento especial a mis mascotas (Kelly y Chata), porque cuando ya no encontraba motivación para seguir adelante, esos pequeños seres fueron un soporte para continuar mi camino, siempre me acompañaron en las noches en vela, en los momentos más tristes de mi vida y también en los más felices.

Índice

Índice de ilustraciones	vi
Índice de tablas	viii
Resumen	ix
Abstract.....	x
Capítulo 1: Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos.....	2
1.4.1 General	2
1.4.2 Específicos	3
1.5 Hipótesis.....	3
1.6 Antecedentes.....	3
1.6.1 Antecedentes Geofísicos	3
Capítulo 2: Marco geológico	10
2.1 Área de estudio	10
2.2 Geología regional	10
2.2.1 Localidad fosilífera Hueyatenco.....	13
2.2.2 Localidad fosilífera Barranca Caulapan.....	13
2.2.3 Zona volcánica Toluquilla.....	14
2.2.4 Cantera cercana a la zona volcánica Toluquilla	14
2.3 Estratigrafía	18
2.3.1 Estratigrafía de localidad fosilífera Barranca Caulapan.....	18
2.3.2 Estratigrafía de zona volcánica Toluquilla	19

2.4 Suelos	20
3.1 Biología regional.....	23
3.1.1 Fauna	23
3.1.2 Flora	24
3.1.3 Endemismo	25
3.2 Paleontología regional.....	26
3.2.1 Localidad fosilífera Hueyatenco.....	27
3.2.2 Localidad fosilífera El Horno.....	27
3.2.3 Localidad fosilífera Tecacaxco	27
3.2.4 Localidad fosilífera El Mirador	27
3.2.5 Localidad fosilífera Barranca Caulapan.....	27
3.2.6 Zona volcánica Toluquilla	28
Capítulo 4: Marco teórico.....	29
4.1 Métodos de prospección geofísica	29
4.1.1 Método gravimétrico	29
4.1.2 Método magnético.....	30
4.1.3 Método sísmico	30
4.1.4 Método eléctrico	31
4.1.5 Método electromagnético	41
Capítulo 5: Metodología.....	49
5.1 Localización de zonas influyentes	49
5.2 Exploración geofísica	50
5.2.1 Planificación GPR y TRE	50
5.2.2 Adquisición TRE.....	51
5.2.3 Adquisición GPR	53

5.3 Interpretación y análisis de los modelos geofísicos.....	55
5.3.1 Procesamiento de datos TRE.....	55
5.3.2 Procesamiento de datos GPR	59
• Capítulo 6: Resultados	61
6.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica	61
6.2 Radar de Penetración.....	67
6.3 Análisis estratigráfico y sedimentológico	74
Discusión	77
• Conclusión.....	78
Bibliografía.....	80
Anexos.....	92

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Modelo inverso 2D obtenido en el perfil de Batallones7 (Carrasco, 2013).	5
Ilustración 2. Perfiles de resistividad (Blancas, 2015).....	6
Ilustración 3. Perfiles GPR (Blancas, 2015).....	7
Ilustración 4. Secciones en planta con profundidad y ubicación de perfiles 5, 7 y 8 (procesamiento 1); Secciones con ubicación de perfiles 7 y 10 (procesamiento 2); Secciones con ubicación de los perfiles 7 y 10 procesamiento 3 de datos con frecuencia de 200 MHz (Larrota 2020).	8
Ilustración 5. Secciones en planta con profundidad y ubicación de perfiles 7 y 10 (procesamiento 4); Secciones con ubicación del perfil 7 (procesamiento 5); Secciones con ubicación del perfil 7, sexto procesamiento de los datos tomados con la frecuencia de 400 MHz (Larrota 2020).....	8
Ilustración 6. Sitio Ramsar Valsequillo.....	10
Ilustración 7. Cuadro compilado a partir de los informes del INAH de archivo abierto de Irwin-Williams (1964, 1966) (Modificado de Malde, 2011).	13
Ilustración 8. (A) Mapa que muestra la ubicación de las muestras. (B) Sección transversal de la cuenca de Valsequillo. (C) Sección estratigráfica revisada, basada en datos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Mark et al., 2010).....	15
Ilustración 9. Mapa de la zona de Valsequillo en el que se muestran las ubicaciones de los sitios de muestreo (Goguitchaichvili et al., 2009).....	17
Ilustración 10. Datos reportados, indicando el tipo de material fechado y el método (González et al., 2006a).....	19
Ilustración 11. Sección transversal de resistividad en la llanura de toba de Xalnene (Urrutia et al., 2013).....	20
Ilustración 12. Superficie relativa de los principales grupos de suelo en México (INEGI, 2007b).....	21
Ilustración 13. Diagrama esquemático (SEV) de un modelo 1D para 3 capas (Sánchez, 2019).....	32
Ilustración 14. Dispositivo electródico (Martínez, 2006).....	33
Ilustración 15. Configuración de un Arreglo Wenner (Pellicer, 2015).	38
Ilustración 16. Configuración de un Arreglo Schlumberger (Álvarez, 2003).....	39

Ilustración 17. Configuración de un Arreglo Dipolo-dipolo (Vargas, 2015).....	40
Ilustración 18. Configuración de un Arreglo Wenner-Schlumberger (Vargas, 2015).	40
Ilustración 19. Funcionamiento del GPR (Ayala, 2009).	44
Ilustración 20. Localización de zonas influyentes y zona prospectiva.	50
Ilustración 21. Zona de estudio “La Taza”, Santo Tomás Chautla, Puebla.	51
Ilustración 22. Distribución de tendidos TRE, perspectiva en campo.	52
Ilustración 23. Instrumentación TRE.....	52
Ilustración 24. Distribución de líneas de estudio GPR.	54
Ilustración 25. Metodología del procesamiento de TRE.....	56
Ilustración 26. Puntos erróneos del tendido T1.....	58
Ilustración 27. Puntos erróneos del tendido T2.....	58
Ilustración 28. Metodología del procesamiento de GPR	60
Ilustración 29. Modelo resistivo del tendido T1.	61
Ilustración 30:Zona de estudio (perspectiva en campo) asociada al modelo resistivo interpretado del tendido T1	62
Ilustración 31: Modelo geológico tendido T1.....	63
Ilustración 32: Modelo resistivo del tendido T2	64
Ilustración 33:Zona de estudio (perspectiva en campo) asociada al modelo resistivo interpretado del tendido T2	65
Ilustración 34:Modelo geológico tendido T.....	66
Ilustración 35. ubicación de líneas de estudio L2 y L2B.	67
Ilustración 36:Radargrama L2 a) procesado, b) procesado con anomalías detectadas asociadas a material fósil, c) perspectiva en campo.....	68
Ilustración 37:Radargrama L2 a) procesado, b) procesado con anomalías detectadas asociadas a material fósil, c) perspectiva en campo.....	69
Ilustración 38:Radargramas L1 y L1B procesados.	70
Ilustración 39:Radargramas L3 y L3B procesados	71
Ilustración 40:Radargramas L4 y L4B procesados	72
Ilustración 41:Radargramas L5 y L5B procesados	73
Ilustración 42:Radargramas L6 y L6B procesados	74
Ilustración 43: Estratigrafía de la zona de estudio "La Taza" Santo Tomás Chautla, Puebla .	76

Ilustración 44. Trabajo en campo. Tomografía eléctrica, tendido 1	94
Ilustración 45. Zona de estudio, perspectiva en campo.	94
Ilustración 46. Trabajo en campo. Radar de Penetración Terrestre	95

Índice de tablas

Tabla 1. Principales unidades estratigráficas de la región Valsequillo (Modificado de Malde et al., 2011).	11
Tabla 2: Dataciones de muestras geológicas en Toluquilla Mark et al., (2010).	16
Tabla 3: Tipos de suelos dentro del Ramsar – Valsequillo (Modificado de INEGI, 2007).	22
Tabla 4. Vegetación (Modificado de: Mangas et al., 2008; Zayas, 2011; Rose, 2011; Aguilar, 2013; H. Ayuntamiento Puebla, 2016).	24
Tabla 5. Métodos Geofísicos de exploración (Modificado de Álvarez, 2003).	29
Tabla 6. Tendidos TRE.	53
Tabla 7. Líneas de estudio GPR.	55
Tabla 8: Arreglo del conjunto de datos (Modificado de Geotomo, 2010).	57
Tabla 9: Zonas resistivas tendido T1	61
Tabla 10: Zonas resistivas tendido T1	64
Tabla 11. Valores resistivos de las rocas (modificado de Vargas, 2015).	92

Resumen

Con la finalidad de obtener las características resistivas y dieléctricas que permitan identificar la presencia de material paleontológico de tamaño macroscópico (mayor a 1 metro de longitud) en zonas sin excavación previa, se aplicaron los métodos geofísicos no destructivos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre, en la zona de “La Taza” en Santo Tomás Chautla, perteneciente al Ramsar - Valsequillo, Puebla.

Con la aplicación de ambos métodos se determinó la presencia de material fósil de un tamaño aproximado de 1.35m de largo por 1.00m de ancho correspondiente a un cráneo de la especie “*Mammuthus*”, así como, su posición aparente. Posterior a la aplicación de ambos métodos se determina que, para el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica se obtuvieron valores de resistividad asociables al elemento paleontológico (cráneo) que corresponden de 26 – 29 Ohms-m (verificable para cada caso en particular), con la aplicación de este método se dio a conocer la dimensión aparente del material mencionado, comprobada por un proceso de extracción, el cual arrojó dimensiones reales. Para el Radar de Penetración Terrestre se detectó la anomalía representativa del material fósil a través de reflectores puntuales, sin embargo, esta anomalía fue detectada en un radargrama de seis que fueron planteados en el estudio.

Fue concluido que ambos métodos son aplicables en la búsqueda de material fósil mayor a 1 metro de longitud, sin embargo, algunos datos pueden verse afectados por condiciones topográficas y técnicas, como el caso de resolución, nivel de profundidad y arreglos electrodomos.

Abstract

In order to obtain the resistive and dielectric characteristics to identify the presence of paleontological material of macroscopic size (greater than 1 meter in length) in areas without previous excavation, the non-destructive geophysical methods of Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar were applied in the area of "La Taza" in Santo Tomás Chautla, belonging to the Ramsar- Valsequillo, Puebla.

With the application of both methods, the presence of fossil material of an approximate size of 1.35m long by 1.00m wide corresponding to a skull of the species "Mammuthus" was determined, as well as its apparent position. After the application of both methods, it was determined that, for the Electrical Resistivity Tomography method, resistivity values associated to the paleontological element (skull) were obtained, corresponding to 26 - 29 Ohms-m (verifiable for each particular case), with the application of this method the apparent dimension of the mentioned material was revealed, verified by an extraction process, which yielded real dimensions. For the Ground Penetrating Radar, the representative anomaly of the fossil material was detected through point reflectors, however, this anomaly was detected in one radargram of six that were proposed in the study.

It was concluded that both methods are applicable in the search for fossil material greater than 1 meter in length, however, some data may be affected by topographic and technical conditions, as in the case of resolution, depth level and electrodynamic arrays.

Capítulo 1: Generalidades

1.1 Introducción

México es un país megadiverso; alberga ecosistemas que, por sus múltiples funciones, valores y atributos, son de gran importancia ecológica y socioeconómica, por lo que, impera la necesidad de implementar estudios geo-científicos que sean la base en la creación de políticas ambientales que promuevan su conservación. Actualmente estos ecosistemas se ven fuertemente afectados, ya que se intensifican proyectos tendientes a controlar, extraer y exportar los bienes naturales, así como, el crecimiento desmedido de las manchas urbanas y sus patrones de consumo, que tienen una influencia directa en la contaminación y transformación de los ecosistemas.

Los sitios Ramsar, son las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros. El sitio Ramsar es área prioritaria a nivel nacional e internacional, sin embargo, se enfrenta a la posible pérdida de información biológica, paleontológica, ambiental, geológica e histórica (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013). Durante el Pleistoceno superior la región de Valsequillo debió ser una fuente de recursos naturales que atraía distintas poblaciones de mamíferos, entre las que probablemente se encontraba el hombre, por lo que, se considera como una zona con información privilegiada en ciencias como la geología, ecología y paleontología. Prueba de ello es que a través del tiempo se han realizado diversos estudios en los cuales se han obtenido datos geológicos, paleontológicos y arqueológicos, sin embargo, su veracidad se ve comprometida debido principalmente a que, no se cuenta con suficiente información formal.

La riqueza de localidades fosilíferas proporciona atributos adicionales para la conservación del Ramsar-Valsequillo, al tiempo que se demuestra que el área tiene alto potencial en la realización de investigación científica en diversos campos, sin embargo, no se cuenta con un método eficaz, formal, no destructivo y actualizado para encontrar dichas localidades. Este documento de investigación pretende encontrar información paleontológica en las localidades fosilíferas a través de los métodos geofísicos no destructivos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Radar de Penetración Terrestre (GPR). Para ello se ha

planteado la búsqueda de información preferentemente geológica y paleontológica, con ella se conocerá la distribución de las zonas con contenido de información relevante, que posteriormente serán la base para conocer el sitio adecuado para la ejecución de dichos métodos.

1.2 Planteamiento del problema

El Ramsar Valsequillo es considerado uno de lugares con información paleontológica más importantes en Puebla, desafortunadamente la búsqueda de este material fósil es por medio de métodos directos que provocan daños a estructuras paleontológicas presentes, debido principalmente a la falta de información sobre la distribución y presencia de los elementos, así mismo, no se prioriza la detección de las características geológicas predominantes en esta zona.

1.3 Justificación

La riqueza geológica y fosilífera proporciona atributos adicionales para la conservación del Ramsar-Valsequillo, al tiempo que se apoya la reacreditación del sitio demostrando que el área tiene alto potencial en la realización de investigación científica en diversos campos. A través de la implementación de métodos no destructivos, es posible determinar zonas con presencia de material fósil de tamaño macroscópico (mayor a 1 metro de longitud) e identificar las características geológicas presentes en el Ramsar, así como comprender la dinámica geológica y fosilífera del mismo. A través de la obtención formal y correcta de las características geológicas, esta tesis pretende contribuir a la conservación del área de estudio al incrementar el conocimiento geológico del sitio Ramsar-Valsequillo.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Identificar las características geológicas, resistivas y dieléctricas presentes en una columna estratigráfica con material fósil, proveniente de la zona del Ramsar Valsequillo, mediante Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre, con el propósito de generar información de valor para la posible extracción del material paleontológico.

1.4.2 Específicos

- Generar modelos 2D del subsuelo a partir de los métodos geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre, para identificar la presencia de material paleontológico en función de sus características resistivas y dieléctricas.
- Identificar las características y comportamiento que generen los materiales paleontológicos en las señales de los métodos geofísicos, a partir de los modelos generados, para identificarlas en estudios posteriores que compartan objetivos similares.

1.5 Hipótesis

La aplicación de métodos no destructivos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Radar de Penetración Terrestre en el sitio Ramsar, son eficientes para la detección de material paleontológico, considerando que su funcionamiento se basa en la detección de anomalías en la superficie terrestre y al ser un ejemplar fósil un material ajeno a la superficie, estos métodos tendrán una respuesta en base con ello.

1.6 Antecedentes

Es indispensable conocer aquellos estudios geo-científicos que compartan información geográfica, paleontológica, geológica y de interés general acerca de la zona de estudio. Al tener conocimiento acerca de todos los antecedentes relacionados con la zona, posteriormente serán la base comparativa con la información obtenida de la aplicación de los métodos geofísicos.

1.6.1 Antecedentes Geofísicos

1.6.1.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica

1.6.1.1.1 Aplicación de TRE en Madrid por Carrasco (2013)

Carrasco (2013) plantea el análisis de la aplicación de las diferentes técnicas geo-eléctricas a la resolución de problemas con el objetivo de mejorar su rendimiento mediante el ensayo de diferentes dispositivos, combinación de parámetros, aplicación de filtros y su implementación en herramientas de gestión de información geoespacial. Siendo el estudio “Prospección geofísica del sistema de yacimientos fósiles miocenos de Batallones (Torrejón de Velasco, Madrid)”, realizado por Morales et. al, (2004) y complementado por los estudios

asociados de Pozo et al., (2003a, 2003b, 2004, 2005a, 2005b, 2006, 2007a, 2007b) el que contempla al material fósil como sujeto de estudio principal.

El Cerro de los Batallones ubicado en la zona divisora existente entre el Valle del Jarama y la Depresión Prados-Guatén al sur de la ciudad de Madrid (Carrasco, 2013), es conocido y de importancia paleontológica por contener el hallazgo de yacimientos de vertebrados fósiles con mayores singularidades: abundancia de restos, excelente conservación, piezas en conexión anatómica, presencia de todas las piezas esqueléticas de los individuos, incluyendo el cráneo, y abundancia de carnívoros (Carrasco, 2013). El descubrimiento del primer yacimiento se produjo de forma casual durante el mes de julio del año de 1991, como consecuencia de las prospecciones de sepiolita realizadas por la empresa TOLSA. Actualmente se han identificado nueve yacimientos de diferentes de vertebrados, todos ellos en proceso de excavación.

Carrasco (2013) determinó que geológicamente los yacimientos aparecen en tres niveles estratigráficos:

Unidad I: Lutitas magnéticas bentoníticas, con contenido de limos arcillosos, lutitas verdes, frecuentes "*slickensides*" y nódulos de calcita.

Unidad II: Lutitas sepiolíticas y ópalos, diferenciada por la existencia de diversas texturas.

Unidad III: Carbonatos, margas y sedimentos siliciclásticos.

Hasta la fecha se han realizado 38 perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica (perfiles TRE) utilizando diferentes tipos de dispositivos Schlumberguer, Polo-Dipolo, Polo-Polo y Dipolo-Dipolo, compuestos por un sistema multicanal de 32 a 24 electrodos de espaciados variables de 1, 2 y 3 metros.

Carrasco (2013) determina que con el análisis conjunto de la prospección geofísica para la localización de sistemas de yacimientos de mamíferos miocenos del Cerro de los Batallones se obtuvo que:

La TRE permitió inferir que los yacimientos con acumulaciones paleontológicas aparecen en rellenos discordantes de diferentes niveles estratigráficos y generalmente

responden a cavidades desarrolladas en los materiales carbonatados y siliciclásticos del techo de la Unidad Intermedia, y se encuentran interconectados por chimeneas verticales adoptando un dispositivo de tipo “reloj de arena”. También permitió la identificación de niveles de sílex (muy resistivos), materiales siliciclásticos finos, rellenos fosilíferos de menor resistividad (que permiten bien su diferenciación), rupturas y curvaturas de los niveles resistivos. Así como la definición de la geometría y extensión espacial de tales yacimientos previos a la explotación, con ello se ha permitido la protección del yacimiento y del patrimonio paleontológico que estos contienen.

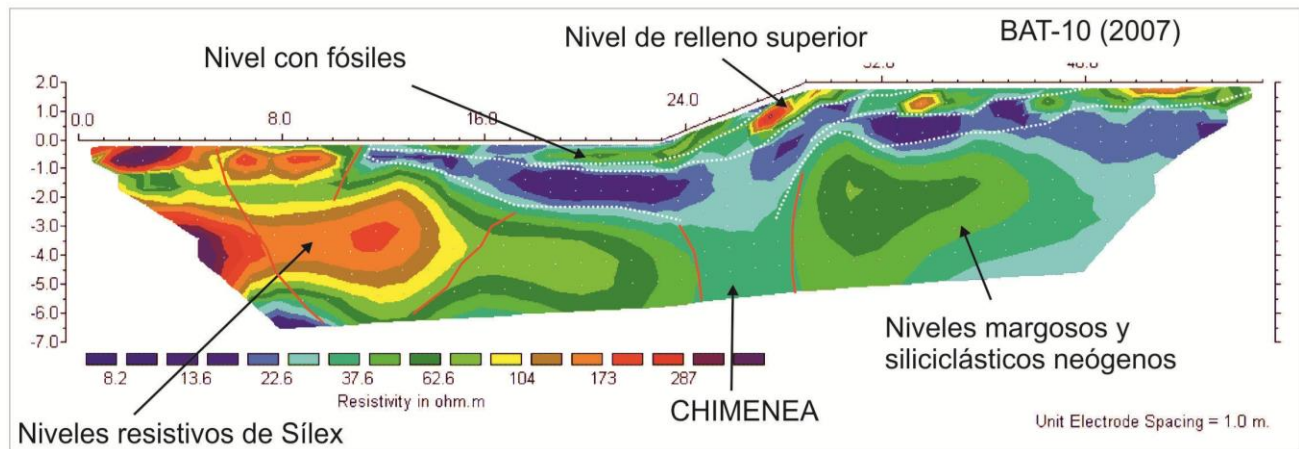


Ilustración 1. Modelo inverso 2D obtenido en el perfil de Batallones7 (Carrasco, 2013).

Este análisis ha mostrado que el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica con dispositivos de medida con espaciado de 1 metro ofrece una buena resolución, que permite inferir la geometría de la distribución de los rellenos de las cavidades fósiles e identificar zonas donde es más probable la acumulación de estos elementos.

1.6.1.1.2 Aplicación de TRE en México por Blancas (2015)

Blancas (2015), quien realizó una serie de estudios geofísicos enfocados en la definición del área de excavación y ubicación de los restos de mamut enterrados en la zona de Santa Ana Tlacotenco, ubicada en la Ciudad de México, México.

En este estudio se aplicó el método de Tomografía de Resistividad, sin embargo, con el arreglo de dipolo – dipolo. En el que se interpreta una anomalía de alta resistividad (3.5 log

Ωm) originada por gran parte de los huesos del mamut mezclados con ceniza, dentro de una matriz aparentemente de ceniza alterada y paleosuelos.

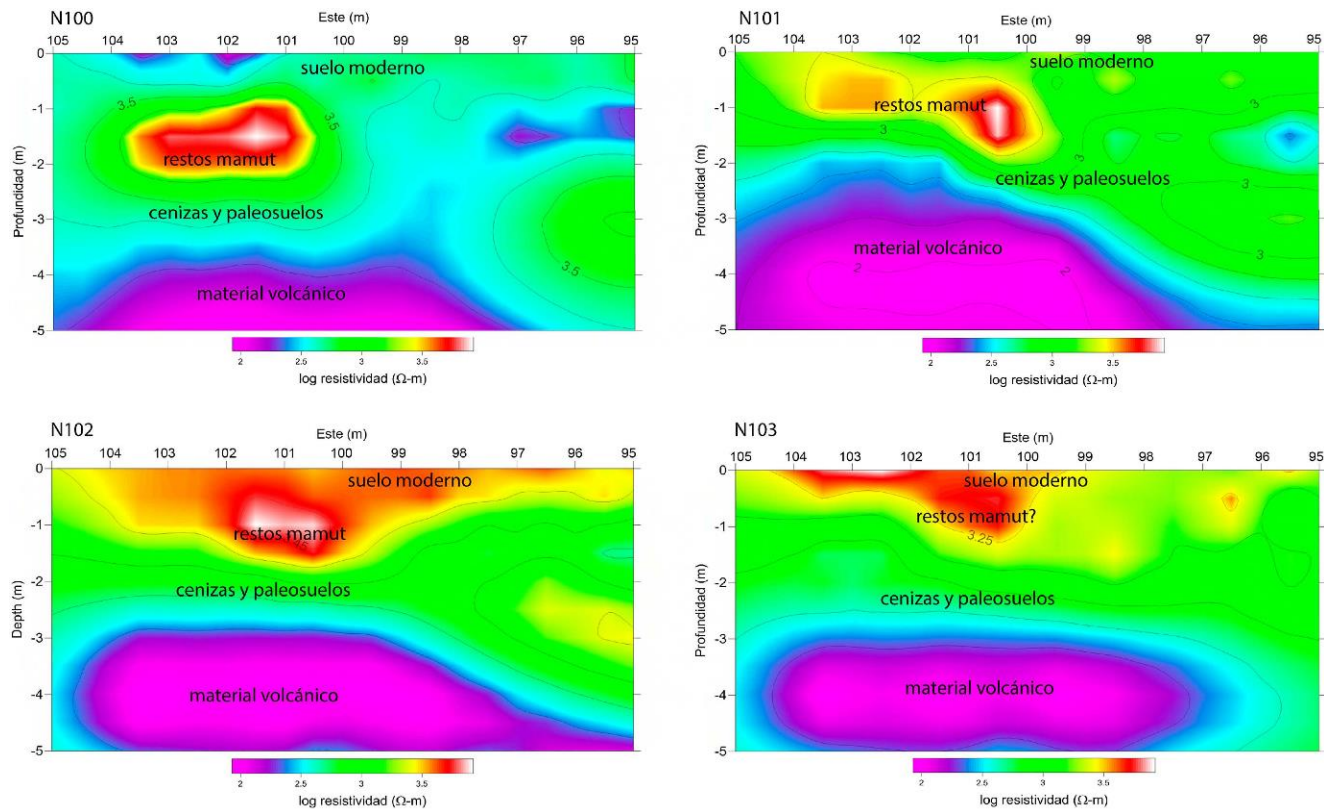


Ilustración 2. Perfiles de resistividad (Blancas, 2015)

En los perfiles se interpretan tres horizontes principales, el suelo moderno en la parte superficial, la mezcla de materiales volcánicos, cenizas y paleosuelos; y a mayor profundidad el material parental, predominando las rocas de tipo volcánica (Blancas, 2015).

1.6.1.2 Radar de Penetración Terrestre

1.6.1.2.2 Aplicación de GPR en México por Blancas (2015)

Blancas (2015), también aplicó el método de GPR en la zona de Santa Ana Tlacotenco. Se obtuvieron resultados que muestran la presencia de una anomalía muy reflectiva en la proximidad inmediata de la fosa excavada. Esto sugiere que las ondas de radar perciben el contraste dieléctrico debido a la presencia de los restos óseos. Las líneas más próximas al lugar del hallazgo son las que registran las reflexiones más intensas de los restos del mamut y coinciden con los huesos excavados más tarde de la cabeza, las defensas y las patas.

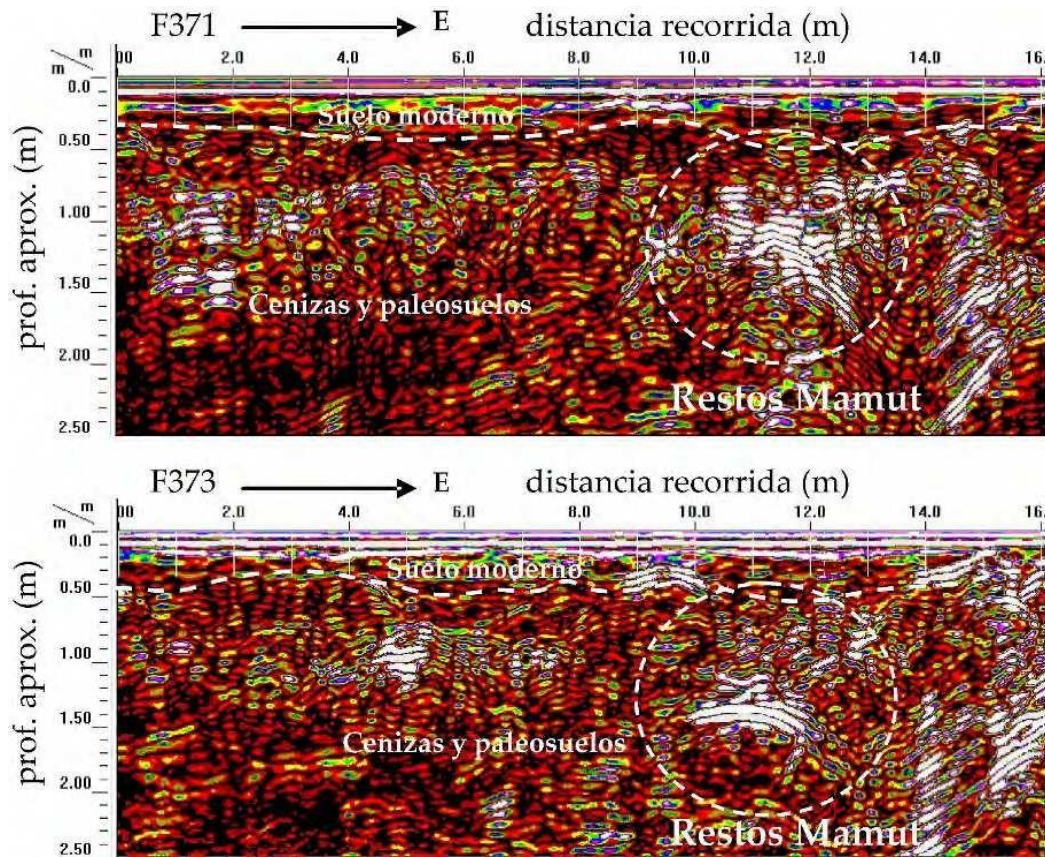


Ilustración 3. Perfiles GPR (Blancas, 2015)

En este caso se hizo un análisis a través del contraste de color, complementado por ciertas marcas curvadas. Interpretación que fue corroborada por un proceso de extracción más tarde.

1.6.1.2.2 Aplicación de GPR en Madrid por Larrota (2020)

Larrota (2020), en su proyecto de grado busca identificar y relacionar las características principales y generales que hacen posible el uso del GPR en el área de la paleontología. Para ello, se procesaron y relacionaron datos de GPR tomados sobre el fósil de un *Pliosaurio* hallado en la Vereda Salto y la Lavandera en el municipio de Villa de Leyva, Colombia en el año 2017, así como, las características estratigráficas y paleontológicas de la zona.

Se tomaron dos tipos de datos de GPR en la misma zona. El primer conjunto de datos se adquirió a una frecuencia de 200 MHz y el segundo conjunto se tomó con una frecuencia de 400 MHz. En dichos procesamientos se aplicaron diferentes filtros y funciones que

permitieron mejorar la visualización de los datos. En ambas tomas de datos se realizó una cuadrícula con 12 perfiles de 10 m de longitud, equiespaciados cada 0.30 m con un área cubierta de 10 m x 3.3 m.

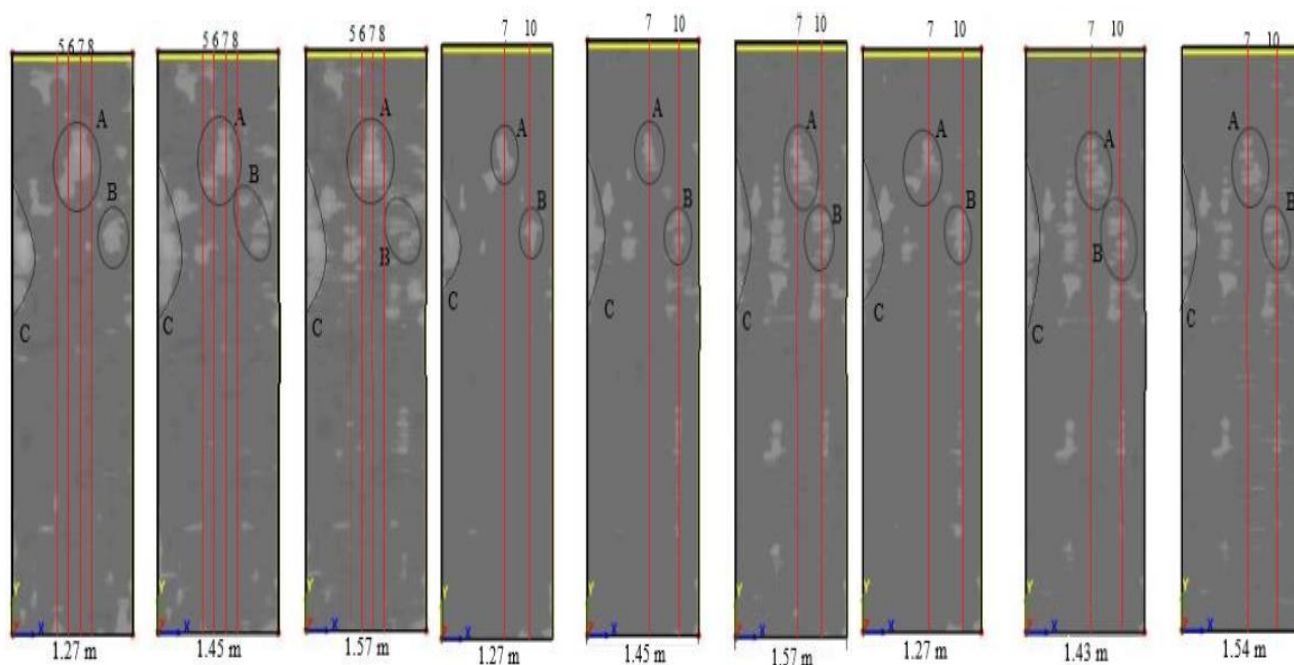


Ilustración 4. Secciones en planta con profundidad y ubicación de perfiles 5, 7 y 8 (procesamiento 1); Secciones con ubicación de perfiles 7 y 10 (procesamiento 2); Secciones con ubicación de los perfiles 7 y 10 procesamiento 3 de datos con frecuencia de 200 MHz (Larrotta 2020).

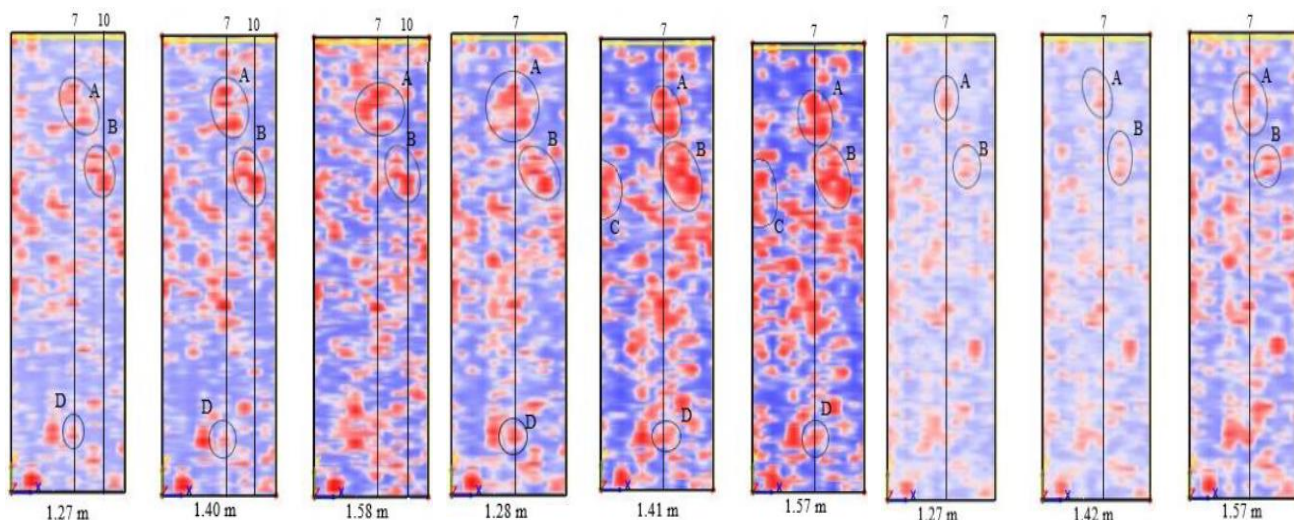


Ilustración 5. Secciones en planta con profundidad y ubicación de perfiles 7 y 10 (procesamiento 4); Secciones con ubicación del perfil 7 (procesamiento 5); Secciones con ubicación del perfil 7, sexto procesamiento de los datos tomados con la frecuencia de 400 MHz (Larrotta 2020).

A pesar de las diferencias entre los dos tipos de procesamiento para cada una de las frecuencias, las anomalías A, B y C se observan en cada una de las secciones de profundidad. Las anomalías A y B pueden corresponder a los restos fósiles del *Pliosaurio*, principalmente al cráneo y vértebras dorsales ya que son las partes del fósil más grandes y masivas. La anomalía C puede deberse a agujeros hechos al inicio de la excavación, mientras que las anomalías paralelas al eje pueden ser el resultado de agrupaciones de concreciones ricas en hierro que se disponen de forma lineal lo cual genera variaciones en las características eléctricas. Adicionalmente, la anomalía D puede corresponder a errores al momento de la adquisición de los datos, ya que se observan sólo en los datos tomados 400 MHz, y en profundidades muy variables (Larrota, 2020).

El uso del GPR con fines paleontológicos es útil siempre y cuando se integre con información geológica de la zona. Además, es importante tener en cuenta la historia paleontológica de la zona con el fin de conocer el tamaño y abundancia de los restos fósiles (Larrota, 2020).

Capítulo 2: Marco geológico

2.1 Área de estudio

La localización del lugar de interés en términos de coordenadas geográficas es: 18,916666 N, -98,182777 W. Colinda al norte con la ciudad de Puebla y colonias circundantes, al noreste con el municipio de Cuautinchán, al este con Tzicatlacoyan, al sur con Huehuetlán el Grande, Teopantlán y al oeste con Ocoyucan.

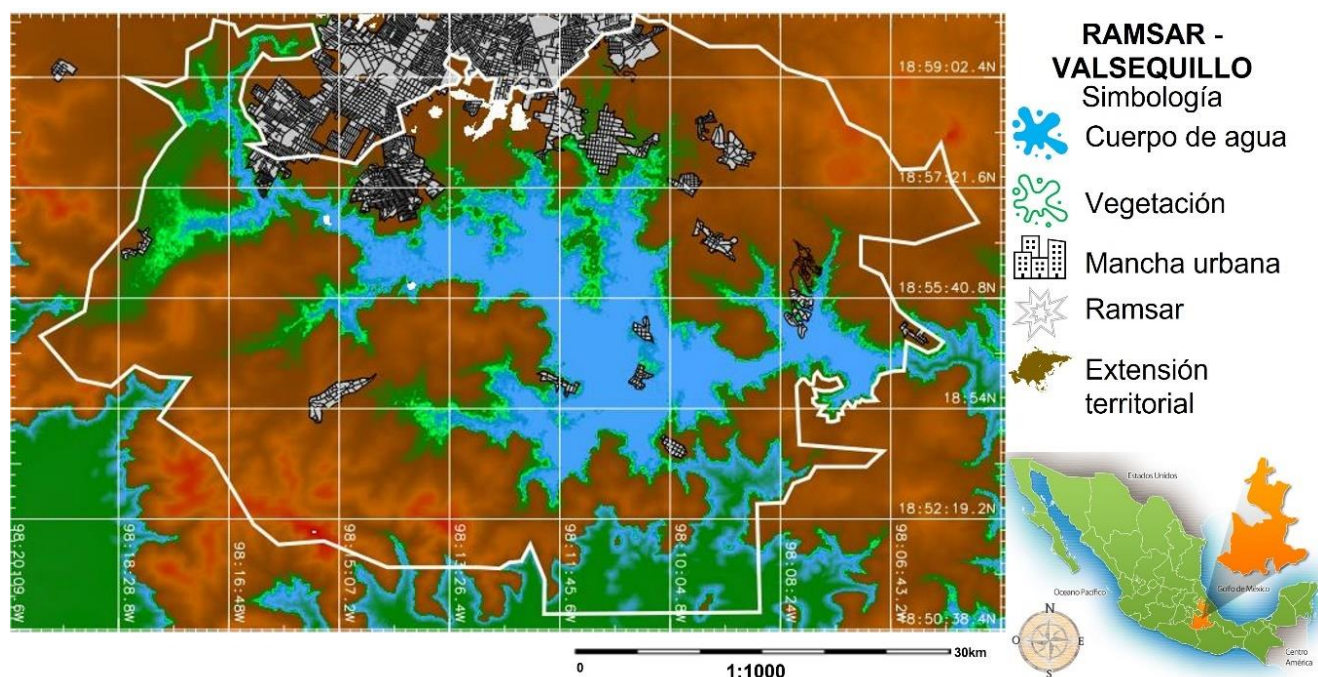


Ilustración 6. Sitio Ramsar Valsequillo

2.2 Geología regional

En 1968 Malde realizó el primer mapa geológico de la cuenca de Valsequillo y posteriormente Malde *et al.*, 2011, describieron los aspectos geológicos más importantes de la zona, destacando:

Tabla 1. Principales unidades estratigráficas de la región Valsequillo (Modificado de Malde *et al.*, 2011).

Principales unidades estratigráficas de Valsequillo		
Edad		Descripción
Reciente	Flujos de lava	Basalto, en parte cubierto por lapilli de piedra pómez
Pleistoceno	Gravas de Valsequillo	Corte de arroyo Arena aluvial, arcilla y grava, 30m de espesor. Miembro de lahar de La Malinche en la parte media y miembro de barro de Tetela con cantos rodados de pómez de Popocatepetl, en la parte superior. Vertebrados y artefactos. Marcadores de ceniza volcánica y lapilli.
	Depósitos de cuenca	Atrincheramiento del valle Arcilla y arena lacustre y subaérea, de 20m. de espesor. Lava basáltica local.
		Flujo de lodo de 25m de espesor, procedente del Popocatepetl.
		Arcilla y arena lacustre estratificada, de 36m. de espesor, en capas masivas de color marrón y gris.
		Toba basáltica de laboratorio de agua procedente de un respiradero subaéreo, coronada por un cono de ceniza subaéreo y lava.
		Arcilla lacustre roja y gris, limo y caliza nodular, de 30m de espesor.

Plioceno	Aguayo Lahar	Desarrollo de caliche grueso Flujo de lodo disecado de 100 m de espesor del Popocatepetl. Otros lahares de posición comparable clasificados como Flujos de lodo indiferenciados.	
	Lava de Ixcalo	Erosión y alabeo suave Flujos de andesita basáltica de 200 m de espesor que forman una cresta de cerros en el límite sur del Valle de Puebla.	Rocas volcánicas no diferenciadas
	Toba de Caulapan	Contacto conformado Toba silíceo bien estratificada a masiva, toba-brecha y conglomerado volcánico de al menos 400m. de espesor que forma una zona alta disecada en el borde sur del Valle de Puebla.	
Mioceno	Rocas ígneas intrusivas	Erosión Tapones volcánicos félsicos en el Cerro Coatepec y el Cerro Navajas.	
Oligoceno y Eoceno.	Grupo balsas	Plegamiento y erosión importantes Conglomerado calcáreo; matriz de lodolita roja.	

Las unidades geológicas de mayor predominio son las denominadas gravas de Valsequillo pleistocénicas, su origen es relacionando a que el Río Atoyac y sus afluentes se adentraron en los depósitos de la cuenca a finales del Pleistoceno. Posterior a esta descripción se infirió que la cuenca de Valsequillo fue una cuenca cerrada, con un drenaje externo y rellenada por las gravas de Valsequillo. Compuestas de sedimentos aluviales, arcilla y grava, con marcas de ceniza y lapilli, asociadas con presencia de huesos fósiles y artefactos. En la zona también se presentan unidades compuestas por rocas ígneas extrusivas (traquitas, traquiandesitas, andesitas y basalto) y suelos vulcano-sedimentarios (tobas intermedias y

ácidas, y otros vulcano-clásticos), rocas sedimentarias (caliza, arenisca-conglomerado, conglomerado, y limolita-arenisca), tobas cenozoicas del Paleógeno, constituidas por conglomerados polimícticos (arenas, limolitas y arcillas). flujos de lava, conformados por basaltos, andesitas, piedra pómez y lapilli depositados en el holoceno asociados a depósitos lacustres y fluviales (Malde *et al.*, 2011).

2.2.1 Localidad fosilífera Hueyatlatco

Considerado como sitio arqueológico, este yacimiento consta de unidades estratigráficas de origen volcánico (Toba Xalnene, Ceniza Hueyatlatco y Lapilli Buena Vista) y sedimentario (arena, grava, limo y arena arcillosa), distribuidas en depósitos aluviales y divididas por una disconformidad erosiva.

Hueyatlatco I y II						Hueyatlatco I y II	
1964			1966			1964, 1966	
G	No hay artefactos	Arena gris fina	G (I¹)	Arena gris fina	H Una sola escama ligeramente retocada	Arena muy amarilla – grisácea pálida	Camello y caballo
	Artefactos unifaciales (2 puntos, 3 escamas).	Grava amarilla y arena de grano muy grueso Rodillos de flujo local		Disconformidad erosiva Arena amarilla			
	Objetos puntiagudos unifaciales	Gradación Arena fina amarilla y limo; arcilla arenosa y arenilla		Gradación Arena fina amarilla y limo; arcilla arenosa y arenilla			
J	No hay artefactos	Arena gruesa amarilla y arena gris muy fina	J	No hay artefactos			
		Muy pocos fósiles		Arena fina y arcilla gris Arena gruesa amarilla	Fósiles escasos		

Ilustración 7. Cuadro compilado a partir de los informes del INAH de archivo abierto de Irwin-Williams (1964, 1966) (Modificado de Malde *et. al.*, 2011).

2.2.2 Localidad fosilífera Barranca Caulapan

Considerada como una localidad fosilífera en Valsequillo y representativa por un arroyo efímero, alimentado por un pequeño número de manantiales, que atraviesa a las gravas de Valsequillo conformadas por sedimentos lacustres retrabajados (caliza con guijarros de grano grueso, aluviones lenticulares de grano fino, arena, limo y arcilla) y gravas aluviales con finas

capas de cenizas volcánicas, riolíticas y basálticas. González *et al.*, (2006a) y Szabo *et al.*, (1969) confirmaron que las gravas de Valsequillo en la Barranca Caulapan, se encuentran in situ y datan de 38,900 a 9,150 años.

2.2.3 Zona volcánica Toluquilla

Este volcán monogenético es una zona de interés debido a que, a lo largo de las orillas, quedan expuestos depósitos fluviales, lacustres, tefras y volcanoclásticos con restos fósiles (Urrutia *et al.*, 2013), también es una zona en la que se presentan cuestionamientos y controversias, debido a la presencia de rasgos que algunos autores representan la presencia humana en la época pleistocénica.

Las cenizas volcánicas presentes han sido datadas en 38,000 años, por González *et al.*, (2006a). Posteriormente Feinberg *et al.* (2007) analizaron muestras de lava basáltica del flanco sur del Cerro Toluquilla (18,136388 N, -98,185833 W), por el método de calentamiento incremental $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, dictaminaron una edad media ponderada de 1,290,000 años para la lava, que al ser comparada con una muestra de toba Xalnene reportada por Renne *et al.*, (2005), es idéntica (1.3 Ma).

2.2.4 Cantera cercana a la zona volcánica Toluquilla

Una cuenca cercana al cerro Toluquilla estuvo ocupada por un lago poco profundo durante el Pleistoceno superior, represado por un grueso flujo de lava (lava de Ixcalo), como consecuencia de la erupción del volcán Toluquilla se depositaron cenizas volcánicas basálticas de olivino (ceniza de Xalnene) y sedimentos lacustres sobre una serie de estratos terciarios.

2.2.4.1 Ceniza de Xalnene o ceniza de Toluquilla

La toba de Xalnene es una secuencia estratificada de depósitos piroclásticos producidos por las erupciones del Cerro Toluquilla, la ceniza tiene al menos 5.4 m de espesor cerca del Cerro Toluquilla (18,927833 N, -98,160416 W), adelgazándose rápidamente al noroeste de la chimenea, la misma consiste predominantemente en unidades múltiples y graduadas de lapilli grueso intercalado con ceniza fina, aunque hay unidades de ceniza silíceas inversamente graduada principalmente en la base de la secuencia, así mismo, contiene fragmentos angulosos, anaranjados, arenosos-limosos, derivados de los sedimentos lacustres inferiores, también, contiene localmente algunas evidencias de lechos cruzados, ondulaciones, y dunas, lo que indica que la ceniza se depositó parcialmente de las mareas de fondo, al igual, se

sugiere que en algunos casos la ceniza aún estaba caliente cuando se depositó (Feinberg *et al.*, 2007).

La Toba de Xalnene había sido datada previamente en 1,30 Ma mediante la técnica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ aplicada a nueve lapilli basálticos individuales de la toba por Renne *et al.*, (2005), en este proceso se informó de una polaridad paleo-magnética inversa para la toba (Cande y Kent, 1995). Sin embargo, la validez de esta datación fue cuestionada por González *et al.*, (2006a, 2006b), afirmando que la toba de Xalnene es heterogénea, e implicando que los lapilli datados fueron reelaborados o heredados. Al mismo tiempo se cuestionó el significado de la polaridad paleo-magnética invertida. Interpretaron que los lapilli contienen fenocristales y xenocristales de olivino, que pueden estar contaminados con exceso de Ar, produciendo edades anómalas (McDougall *et al.*, 1969). La única base para la inferencia de una edad de unos 40 Ka. para la toba de Xalnene es una fecha OSL obtenida de un único xenolito cuarzo-feldespatítico en la toba, proceso por el cual se llevó a proponer que los humanos estaban presentes en el centro de México en esa época (Duller, 2006; Schwenninger *et al.*, 2006). Sin embargo, al igual que la datación anterior, este proceso también ha sido cuestionado.

2.2.4.2 Dataciones de muestras geológicas en Toluquilla, propuesta de Mark *et al.*, (2010)

A continuación, se presenta información de muestras de coladas de lava basáltica y tobas alcalinas de la secuencia estratigráfica de Valsequillo, datadas utilizando un espectrómetro de masas de gases nobles multicolector ARGUS.

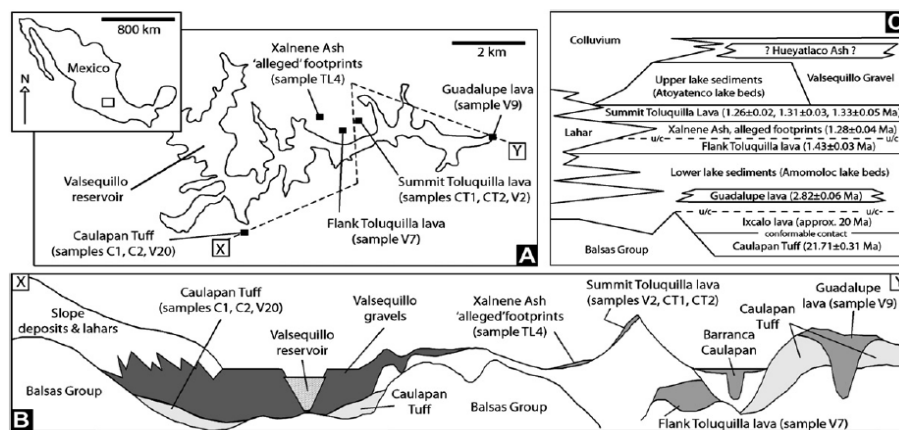


Ilustración 8. (A) Mapa que muestra la ubicación de las muestras. (B) Sección transversal de la cuenca de Valsequillo. (C) Sección estratigráfica revisada, basada en datos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Mark *et al.*, 2010).

Tabla 2: Dataciones de muestras geológicas en Toluquilla Mark *et al.*, (2010).

Datación de muestras geológicas en Toluquilla	
Muestras	Edad basada en $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$
V20, C1 y C2 de depósito piroclástico riolítico con pómez (Toba Caulapan).	21,000,000 años.
V2, CT2 y CT1 de lava basáltica andesítica (Lava de Ixcalo).	1.2 Ma (V2) y 1,300,000 años (CT2 Y CT1).
V9 de lava basáltica subárea (Lava de Guadalupe).	2,800,000 años.
V7 de lava andesítica basáltica subárea (Flanco de Lava de Toluquilla).	1,400,000 años.
TL4 supuesta ceniza basáltica de olivino con huella producida durante una erupción hidro magmática explosiva (Ceniza Xalnene).	1,280,004 años con una ligera contaminación de ^{40}Ar . Edad indistinguible de la de Renne <i>et al.</i> , (2005) de 1.3 Ma..

Las edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sugieren dos inconformidades: entre la lava de Ixcalo y la lava Guadalupe, y entre el flanco de lava Toluquilla y la ceniza Xalnene (Mark *et al.*, 2010).

2.2.4.3 Dataciones de muestras geológicas en Toluquilla, propuesta de Goguitchaichvili *et al.*, (2009)

A continuación, se presenta información de un análisis paleo-magnético y magnético de rocas de 18 bloques de ceniza Xalnene, muestras de núcleos recogidos en dos localidades distintas y 19 núcleos paleo-magnéticos estándares pertenecientes a volcanes monogénicos cercanos. Los análisis de mediciones de histéresis a temperatura ambiente fueron datados mediante el aparato AGFM 'Micromag'. La magnetización remanente se midió con un equipo JR- 5A y un magnetómetro de espín JR6. Los experimentos de paleo-intensidad se llevaron a cabo en el aire utilizando un horno de paleo-intensidad MDT80 (Goguitchaichvili *et al.*, 2009).

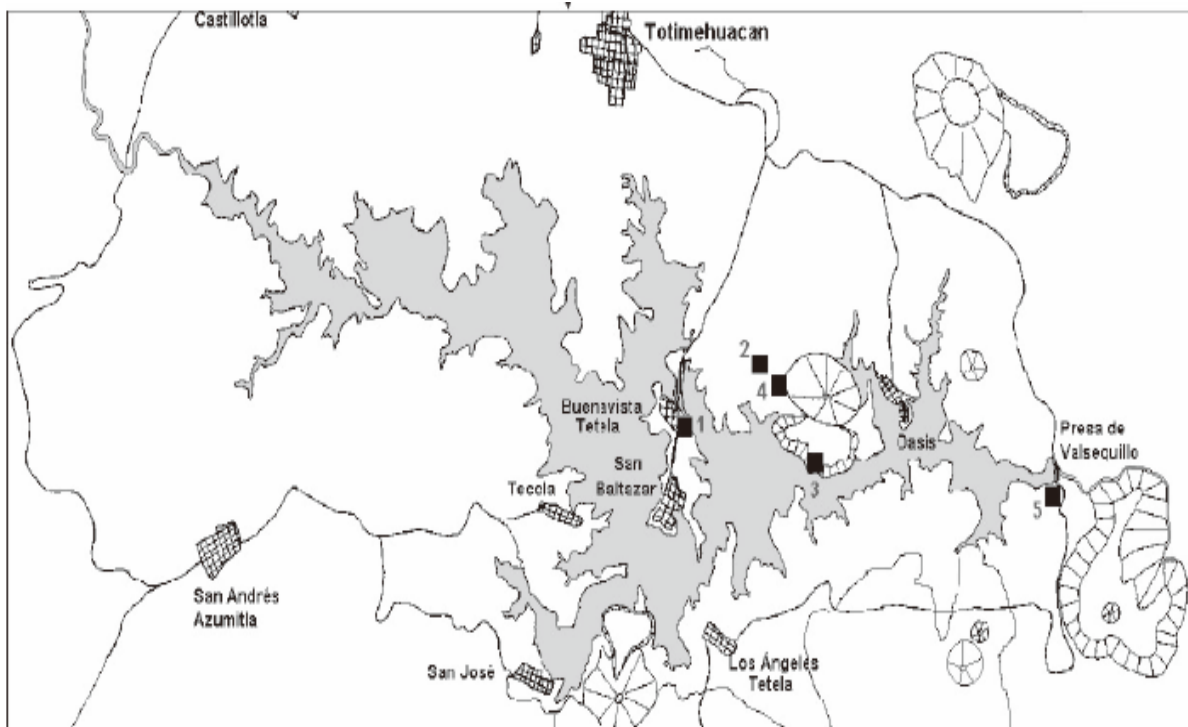


Ilustración 9. Mapa de la zona de Valsequillo en el que se muestran las ubicaciones de los sitios de muestreo (Goguitchaichvili *et al.*, 2009).

Muestras de las cenizas del Xalnene de dos zonas (cerca de la fuente y a más de 1 km de distancia):

Diez muestras orientadas por brújulas magnéticas y solares (18,55218 N, -98,09215 W).

- Estas producen principalmente magnetizaciones de un solo componente, arrojaron direcciones paleo-magnéticas medias razonablemente bien agrupadas dando: Inclínación = 17,8°, declinación = 280,2° sin embargo, es difícil sacar conclusiones firmes sobre la importancia geomagnética de las paleo-direcciones intermedias.

Ocho muestras orientadas en la segunda localidad de ceniza ("ceniza negruzca"), (18,55238 N, -98,09223 W). - Arrojaron paleo-direcciones bastante similares (inclínación = 13,0°, declinación = 264,6°).

En cualquier caso, las paleo-direcciones obtenidas en ambas localidades se desvían significativamente de la dirección dipolar (o esperada) dirección, lo que puede interpretarse como la aparición de un paleo-campo intermedio (Goguitchaichvili *et al.*, 2009).

Muestras de flujos de lava volcánica:

Ocho muestras orientadas de ceniza blanca joven. - Presentan una magnetización de polaridad normal.

Diez núcleos paleo-magnéticos estándar del volcán Toluquilla. - Producen una magnetización de polaridad inversa bien definida

Nueve muestras del cercano flujo de lava Ávila Camacho. - Está magnetizado de forma inversa. Cuatro muestras de las nueve analizadas dieron lugar a estimaciones de paleo-intensidad aceptables (Goguitchaichvili *et al.*, 2009).

La investigación paleo-magnética arroja una polaridad magnética intermedia para los depósitos de ceniza del Xalnene, mientras que las muestras de núcleos recogidos de volcanes monogénicos cercanos al volcán Toluquilla está magnetizado de forma inversa, similar a la colada de lava del Ávila Camacho. Además, la paleo-intensidad geomagnética absoluta está significativamente reducida en relación con los valores del campo actual, sin embargo, no se puede determinar si el volcán Toluquilla emitió primero lava o cenizas (Goguitchaichvili *et al.*, 2009).

2.3 Estratigrafía

Un registro estratigráfico es el resultado de la continuidad de procesos sedimentarios a través de la dimensión del tiempo geológico; constituye el banco de datos fundamental para la comprensión de la evolución de la vida, la configuración de las placas tectónicas a través del tiempo y los cambios climáticos globales (SGM, 2017).

2.3.1 Estratigrafía de localidad fosilífera Barranca Caulapan

A través del proceso de investigación enfocado en el análisis de marcas paleontológicas, realizado por González *et al.*, 2006a, se ejemplificó la siguiente estratigráfica en la zona correspondiente a Barranca Caulapan, en la que se menciona una datación de material fósil y su relación con el material geológico presente.

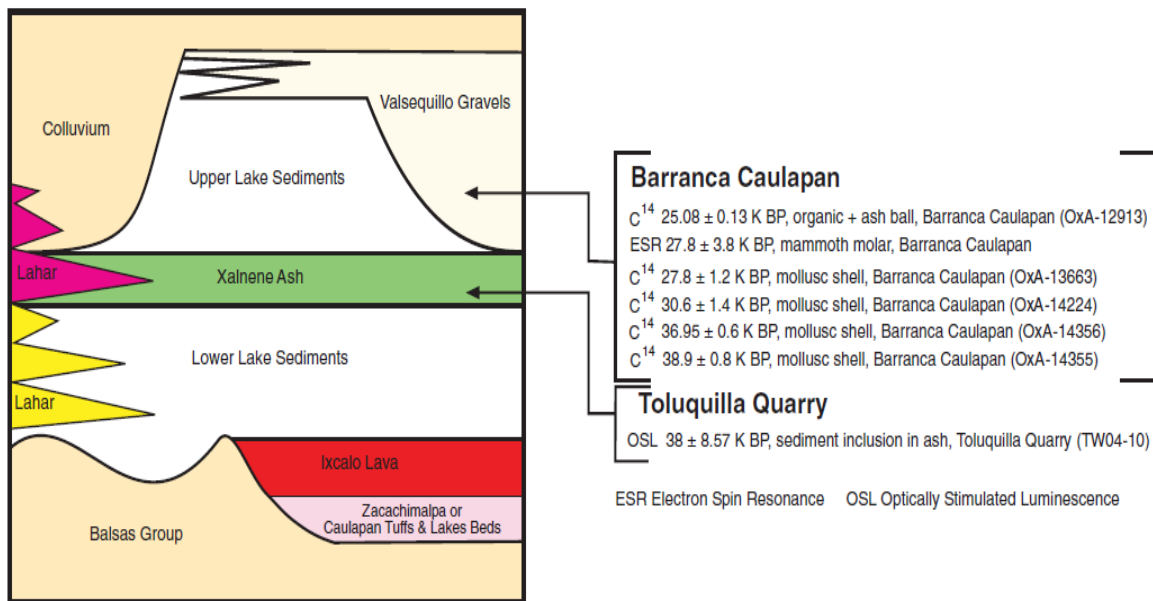


Ilustración 10. Datos reportados, indicando el tipo de material fechado y el método (González *et al.*, 2006a).

Por encima de la ceniza, se muestran evidencias de reelaboración de aguas poco profundas, generando que la línea de costa retrocediera repetidamente sobre el fondo del lago. En las barrancas marginales del lago, como la barranca de Caulapan, se depositaron Gravas de Valsequillo y a su vez, arrojaron fechas radiométricas más jóvenes que la fecha de la ceniza de Xalnene. Esta evidencia indica que las Gravas de Valsequillo en Caulapan son estratigráficamente más jóvenes método (González *et al.*, 2006a).

2.3.2 Estratigrafía de zona volcánica Toluquilla

Urrutia *et al.*, (2013) busca identificar la estratigrafía de la secuencia vulcano-sedimentaria en la cuenca de Valsequillo, por medio de sondeos eléctricos de resistividad. Estudio realizado en la zona cubierta por la tefra Xalnene, en la planicie situada al noroeste del volcán Toluquilla, empleando sondeos eléctricos verticales (SEV's).

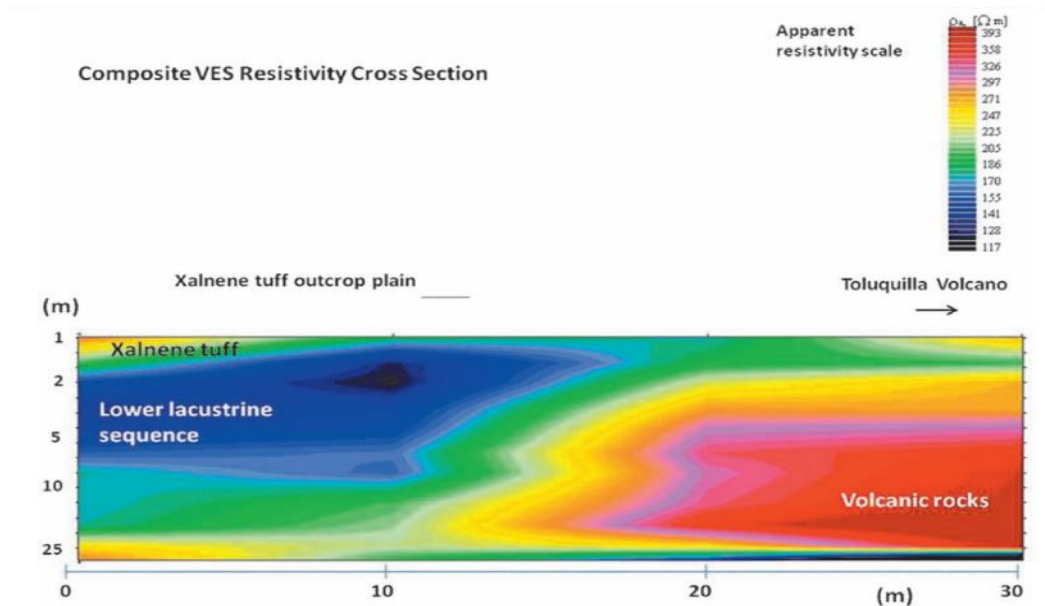


Ilustración 11. Sección transversal de resistividad en la llanura de toba de Xalnene (Urrutia *et al.*, 2013).

Los depósitos de lahar están intercalados dentro de los sedimentos lacustres. Los depósitos de gravas y coluviones de Valsequillo, que contienen fósiles, se correlacionan con la secuencia lacustre superior y se encuentran por encima de la toba del Xalnene. En el afloramiento, la toba es plana y está formada por una sucesión de varios metros de espesor de múltiples capas de toba gradada de lapilli grueso intercalado con ceniza fina. Las rocas volcánicas presentes en el volcán Toluquilla forman el basamento de los depósitos lacustres y fluviales, la secuencia lacustre se hace más fina hacia el volcán Toluquilla (Urrutia *et al.*, 2013).

2.4 Suelos

Desde una visión geotécnica, el suelo es el material sin consolidar que se encuentra sobre el lecho rocoso. El proceso de formación del suelo comienza con la desintegración de la roca madre expuesta a partir del rompimiento físico y químico ocasionado por las lluvias, el viento, la exposición al sol y la actividad biológica de las raíces de las plantas (INEGI, 2007).

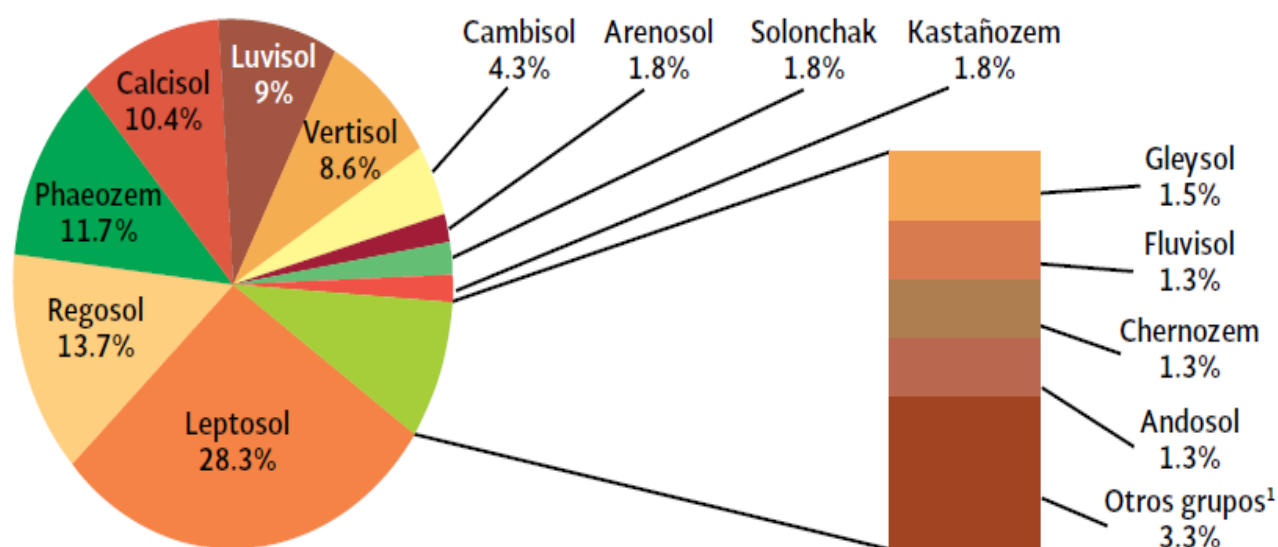


Ilustración 12. Superficie relativa de los principales grupos de suelo en México (INEGI, 2007b).

De acuerdo con el INEGI (2007), en México existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Dominan los Leptosoles (28.3% del territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%) que, en conjunto, ocupan 81.7% de la superficie nacional.

Tabla 3: Tipos de suelos dentro del Ramsar – Valsequillo (Modificado de INEGI, 2007).

Tipos de suelo Ramsar - Valsequillo		
Tipo de suelo	Descripción	Localización
Feozem háplico	Suelos simples, oscuros de textura media, limitados por una fase física.	Este y oeste de la presa
Regosol éutrico	Suelos de color claro, se parecen bastante a la roca madre.	Oeste de la presa
Regosol calcáreo	Suelos de color claro, se parecen bastante a la roca madre y son ricos en calcio.	Oeste de la presa
Cambisol éutrico	Suelos que se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa que ya parece más suelo que roca, en ella se forman terrones.	Sureste de la presa
Cambisol cálcico	Se caracterizan por ser suelos calcáreos en todas sus capas, o por tener acumulación de caliche suelta en alguna profundidad, pero con una capa superficial de color claro.	Este de la presa
Litosol	Suelos someros de color claro, textura media, generalmente poco desarrollados.	Sur y suroeste de la presa
Rendzina	Suelos negros presentes en cumbres y laderas, limitados en profundidad por estrato rocoso.	Sur y suroeste de la presa
Vertisol pélico	Suelos negros o gris oscuro.	Norte de la presa

Capítulo 3: Marco paleontológico

3.1 Biología regional

Valsequillo es un área o lugar donde poblaciones y comunidades de diversos reinos (animal, vegetal, fungi, protista o procariota) encuentran cobertura vegetal, agua, desarrollo, alimentación, y distribución de manera permanente o migratoria. Considerando la obra de Rose (2011) en la que plasma información recabada de mamíferos, peces, reptiles, aves, aves migratorias y especies endémicas. El informe de Rose y Hernández (2013) el cual complementa los datos en especie marinas y la obra de Cruz *et al.*, (2009) enfocada a las especies de micromamíferos, las especies más representativas son mostradas a continuación:

3.1.1 Fauna

3.1.1.1 Mamíferos

Con presencia de 15 especies de mamíferos incluidas en 5 órdenes y 12 familias. El depredador más grande en el sitio es el coyote (*canis latrans*). El omnívoro predominante es el cacomixtle (*bassariscus astutus*). Los herbívoros de la zona son el venado (*odocoileus virginianus*) y algunos otros mamíferos como los murciélagos (*choeronycteris mexicana*). Las especies de mamíferos con estatus de protección y amenaza corresponden *bassariscus astutus*, y *choeronycteris mexicana* (Rose, 2011).

3.1.1.2 Peces

Cuenta con 2 especies de peces en 2 órdenes y 2 familias, y 6 especies de gasterópodos (invertebrados acuáticos). De estas, 27 especies presentan estatus de protección especial o están amenazadas (Rose y Hernández, 2013).

3.1.1.3 Reptiles

El sitio sustenta al menos 9 especies de reptiles de los cuales *barisia imbricata*, *gerrhonotus liocephalus*, *sceloporus megalepidurus*, *salvadora bairdi* y *kinosternon integrum* cuentan con estatus de protección. *anolis forbesi*, *lampropeltis triangulum*, *pituophis deppe* y *crotalus ravus* tienen estatus de amenaza (Rose, 2011).

3.1.1.4 Micromamíferos

Se sugiere la presencia de micromamíferos de los órdenes *rodentia* y *lagomorpha*: *cynomys mexicanus*, *cynomys merriami*, *baiomys musculus*, *thomomys umbrinus*, *lepus*

callotis, microtus mexicanus, romerolagus diazi, neotoma mexicana, microtus, hodomys alleni, peromyscus maldonadoi, reithrodontomys megalotis, cratogeomys castanops, sigmodon hispidus, sylvilagus audubonii (Cruz et al., 2009).

3.1.1.5 Aves

El sitio Ramsar cuenta con 231 especies de aves incluidas en 19 órdenes y 48 familias. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM 059 SEMARNAT 2010, de las 231 especies de aves en el sitio, 16 en 8 órdenes y 8 familias tienen estatus de protección: 12 de protección especial y 4 de amenazadas.

3.1.1.6 Aves Migratorias

La Presa Valsequillo está ubicada en la zona donde confluyen varias rutas de aves migratorias neotropicales entre América del Norte, Centroamérica y América del Sur (“Montañas del Oeste” ruta para todas las aves migratorias y “Centro” ruta para aves acuáticas). El sitio sustenta al menos 97 especies en 16 órdenes y 31 familias de aves migratorias. De las aves migratorias, 42 son acuáticas y 55 son terrestres. Teniendo como especies introducidas a *estornino pinto* (*sturnus vulgaris*), *gorrión inglés* (*passer domesticus*) y *paloma doméstica* (*columba livia*) (Rose, 2011).

3.1.2 Flora

3.1.2.1 Vegetación

El sitio Ramsar Valsequillo se ubica entre las provincias florísticas de la Depresión del Balsas y las Serranías Meridionales. La vegetación es heterogénea y ha presentado una degradación debido a presiones en el entorno, como la urbanización (Rose, 2011). Existen registros taxonómicos indicando 10 especies de carácter acuático y 70 especies terrestres, ubicadas en 20 órdenes y 34 familias (Jiménez, 2017).

Tabla 4. Vegetación (Modificado de: Mangas et al., 2008; Zayas, 2011; Rose, 2011; Aguilar, 2013; H. Ayuntamiento Puebla, 2016).

Vegetación de Valsequillo		
Matorral		
<i>Prosopis juliflora</i>	<i>Quercus rugosa</i>	<i>Relictos arbóreos</i>
<i>Acacia schaffneri</i>	<i>Quercus laurina</i>	<i>Agave asperina</i>
<i>Opuntia streptacantha</i>	<i>Quercus crassifolia</i>	<i>Agave lechugilla</i>

<i>Opuntia sp.</i>	<i>Quercus sp.</i>	<i>Eysenhardtia polystachya</i>
<i>Zaluzania augusta</i>	<i>Juniperus fláccida</i>	<i>Schimus molle</i>
<i>Mimosa sp</i>	<i>Juniperus deppeana</i>	<i>M. biuncifera</i>
Vegetación acuática		
<i>Thypha latifolia</i>	<i>Eichhornia crassipes</i>	<i>Lemna minor</i>
<i>Scirpus sp.</i>	<i>Marsilea mexicana</i>	
Pastizales		
<i>Asclepias glaucencens</i>	<i>Commelina difusa</i>	<i>Bouteloua hirsuta</i>
<i>Setaria geniculata</i>	<i>Euphorbia ophthalmica</i>	<i>Paspalum notatum</i>
<i>Aristida adscencionis</i>	<i>Reseda luteola</i>	<i>Muhlenbergia sp.</i>
<i>Aristida barbata</i>	<i>Bouvardia ternifolia</i>	<i>Stipa tenuissima</i>
<i>Aristida divaricata</i>	<i>Cynodon dactylon</i>	<i>Andropogon barbinodis</i>
<i>Bouteloua gracilis</i>	<i>Lopezia racemosa</i>	<i>Bouteloua ramosa</i>
<i>Cosmos bipinnatus</i>	<i>Lupinus sp</i>	<i>Sonchus oleraceus</i>
<i>Sanvitalia procumbens</i>	<i>Rumex sp</i>	

3.1.3 Endemismo

El endemismo es un concepto comúnmente usado para identificar a taxones nativos o grupos biológicos con área de distribución restringida. El endemismo toma un valor ecológico e histórico, si se considera que define zonas geográficas (Noguera, 2017).

El sitio está ubicado en la confluencia de tres áreas de endemismo de aves (EBAs), emblemáticas de las eco regiones Sierras Templadas y Bosques Secos Tropicales: "Sierra Madre Occidental y Cordillera Transmexicana", "Sierra Madre Oriental Sur" y "Región del Balsas e Interior de Oaxaca".

El sitio sustenta las siguientes especies endémicas: 21 especies en cuatro órdenes y 12 familias emblemáticas de tres diferentes biomas: 15 especies de “*Madrean Highlands*”, 4 especies de “*Pacific Arid Slope*” y 2 especies de “*Gulf-Caribbean Slope*”. Al menos 33 especies y subespecies en cinco órdenes y 13 familias de aves endémicas, semi endémicas, y cuasi endémicas. También 5 especies de anfibios endémicas, 17 especies de reptiles endémicas y 5 especies de flora terrestre endémicas.

3.2 Paleontología regional

La paleontología es la disciplina que estudia los fósiles. El término fue utilizado por primera vez en 1832 por el naturalista francés Henri Marie Ducrotay de Blainville (1777-1850). Los fósiles son los restos o rastros de vida antigua, un hueso, diente o concha, un fragmento esquelético, una huella de pisada, marcas, cuevas, nidos, etc., que hayan perdurado en el tiempo a través de procesos físicos, químicos y biológicos. La génesis de los fósiles no se puede separar del origen de las rocas sedimentarias y casi siempre estos procesos están estrechamente asociados (Noguera, 2017).

En el estado de Puebla se conocen diversas localidades del Pleistoceno tardío en donde hay registro de restos de *mammuthus*, dando a conocer el Códice Mendocino los primeros reportes de estos. En ese mismo siglo se forma la primera colección de fósiles que contenía restos de *mammuthus* de la región Valsequillo (Armenta, 1978). A finales del siglo XIX, Félix y Lenk (1891) reportan molares referidos como *elephas primigenius* var., *columbi* (*mammuthus columbi*) de la región de Tecamachalco y San Pedro. Para 1905 y 1942 Osborn reconoce, basado en molares aislados, la presencia de *elephas imperator* y *archidiskodon imperator* en el Valle de Puebla, *elephas columbi* var. *felicis* en Tecamachalco y *paralephas columbi* en San Francisco Totimehuacán. Más tarde Irwin-Williams en 1967 proporcionó información sobre los registros de *mammuthus* en la zona de Valsequillo (Lagunas et al., 2019). El fósil de *proboscídeo* más célebre hallado en Puebla fue un pequeño fragmento de hueso de mastodonte descubierto a finales de los años 50s, por el profesor Juan Armenta Camacho en la localidad de Hueyatlatco, cerca de Los Ángeles Tetela, en Valsequillo. El pequeño fragmento de hueso conocido como CODAUP-HG-T.1 o “Tetela 1”, contenía diversos grabados de los que destacaban figuras de *proboscídeos* y otros animales prehistóricos (Armenta-Camacho, J. 1978).

En la actualidad en la región de Valsequillo se tiene conocimiento de localidades con la presencia de material fósil: El Horno, San Antonio Arenillas, Tres Cerritos, Península de Tetela, Hueyatlatco, Tecacaxco, San Francisco Totimehuacán, Zacachimalpa, El Mirador, Barranca Caulapan y Santo Tomas Chautla. Sin embargo, no todas las localidades presentan un registro paleontológico formal, además que, la mayoría de las localidades, se encuentran cubiertas por el crecimiento de la zona urbana de la ciudad de Puebla.

3.2.1 Localidad fosilífera Hueyatlaco

Es una localidad arqueo-paleontológica que Irwin-Williams (1978) interpretó como un "sitio de matanza". En 1962 se realizó una excavación dirigida por Irwin Williams, en la que se reportó restos de animales extintos con probables modificaciones antrópicas, acumulación de mandíbulas de caballos con fracturas intencionales, así como, artefactos líticos conservados en sedimentos de origen fluvial, eólico y volcánico. En 1964 y 1966, C.E. Ray paleontólogo estadounidense recogió fósiles en la zona de Valsequillo bajo la dirección de Armenta. Años más tarde Graham (1978) y Pichardo (1999), en conjunto asignaron la fauna de Valsequillo al Pleistoceno tardío (Solís, 2015).

3.2.2 Localidad fosilífera El Horno

La localidad fue descubierta tras el hallazgo en superficie de diversos huesos de *Proboscídeo*, entre los que se encontró una falange con marcas de destazamiento. En este caso se determinó la realización de una excavación controlada, donde se recuperó la mayor parte del esqueleto de un mastodonte, restos de caballo y de un pequeño *artiodáctilo*. Así como también, probables restos de talla lítica in situ y otros artefactos similares a los recuperados en las excavaciones de Hueyatlaco (Irwin, 1962).

3.2.3 Localidad fosilífera Tecacaxco

Williams y Armenta al inicio de los años 60's realizaron una excavación controlada en la que fueron recuperados considerables fragmentos de hueso correspondientes a mamut, mastodonte, caballo y camello, así también, algunos fragmentos de roca con modificaciones y caracterizada por la presencia de numerosos fragmentos del depósito volcánico denominado ceniza Xalnene (Solís, 2015).

3.2.4 Localidad fosilífera El Mirador

Localidad reconocida por la presencia de una punta proyectil que se encontraba expuesta en uno de sus extremos, a pocos centímetros de una vértebra de caballo y dentro de una unidad de gravas (Solís, 2015).

3.2.5 Localidad fosilífera Barranca Caulapan

Como ya fue mencionado Barranca Caulapan también es una localidad fosilífera, en la misma fue ejecutado un análisis de isótopos estables de oxígeno y carbono en conchas fósiles de caracoles de agua dulce y terrestres. Este análisis fue llevado a cabo por Stevens *et al.*,

(2012) con el objetivo de reconstruir las condiciones climáticas y ambientales de la cuenca de Valsequillo durante la deposición de las gravas de Valsequillo. A través del análisis mencionado se realizó un proceso de datación, en dos secciones de la barranca:

Superior (18,5355 N, -98.1302 W) estimada en una edad de 35,980 a 18,875 años, debido a la presencia de gasterópodos de agua dulce de los géneros *holospira sp.* y *polygyra couloni* e indicando que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ de la concha entera indican que antes de aproximadamente 36,000 años las condiciones en la barranca superior eran similares a las actuales, aunque quizás un poco más secas, con una vegetación C3.

Inferior (18.9434 N, -98.1256 W) en la que se datan aproximadamente 28,000 años, con lo que se confirman las condiciones presentadas en la barranca superior.

3.2.6 Zona volcánica Toluquilla

Es necesario mencionar que en esta zona se tiene la presencia de impresiones en una toba basáltica situada en los alrededores del embalse de Valsequillo, las cuales se han interpretado por González *et al.*, (2006^a) como huellas humanas y se citan como prueba de la presencia de seres humanos en América del Norte en 40 Ka. Aunque su fiabilidad como huellas humanas aún no ha sido probada por la comunidad científica e incluso Feinberg *et al.*, (2007) han deducido que debido a que las marcas observadas por González *et al.*, (2006a) se encontraron en una cantera de piedra, es más probable que representen marcas dejadas por esta cantera, que posteriormente se vieron reforzadas por la intemperie y la erosión. Posteriormente Morse *et al.*, (2010) llegaron a la conclusión de que las huellas de pisadas en la toba de Xalnene no son coherentes con la morfología y las características de las huellas conocidas y son de origen dudoso, lo que sugiere que las marcas en la toba se originaron en las actividades de cantera. También sugieren que si las marcas identificadas por González *et al.*, (2006a) fueran de origen humano, probablemente pertenecerían al *Homo Erectus Temprano*, pero esto es poco probable, basándose en la distribución geográfica conocida de estos primeros homínidos. Concluyendo con la interpretación de Morse *et al.* (2010) que mencionan que estas marcas ya no parecen sostenibles como huellas humanas y deben ser descartadas de este debate.

Capítulo 4: Marco teórico

4.1 Métodos de prospección geofísica

Los métodos geofísicos se basan en la medición de los contrastes y variaciones de las propiedades fisicoquímicas de los elementos que componen el subsuelo, para localizar estratos que representen masas resistentes, además de, localizar yacimientos de agua, petróleo, gas, vapor, y minerales de interés económico, así como, en el monitoreo de flujo y transporte de contaminantes (Flores, 2019). Los métodos geofísicos se pueden clasificar en dos tipos: pasivos y activos.

Los pasivos están basados en la detección de las variaciones de las propiedades naturales del terreno, sin introducir señales artificiales (gravimetría, potencial espontáneo, magnetometría, geoquímica, radiometría, entre otros). Los activos, son aquellos que estudian el comportamiento de los materiales del subsuelo mediante la creación de señales artificiales y su interacción entre ellos (polarización inducida, métodos sísmicos, métodos eléctricos, métodos electromagnéticos, entre otros (Flores, 2019).

Tabla 5. Métodos Geofísicos de exploración (Modificado de Álvarez, 2003).

Métodos geofísicos de exploración		
Método	Campo de Fuerza	Propiedad Física o Química
Magnético	Campo de densidad de flujo magnético	Susceptibilidad magnética
Gravimétrico	Campo de fuerza gravimétrico	Densidad
Eléctrico	Campos eléctricos natural y artificial	Potenciales REDOX, resistividad eléctrica
Sísmico	Campo artificial creado por las ondas sísmicas	Densidad, velocidad
Radiométrico	Radiación radioactiva	Emisión de partículas eléctricas cargadas.

4.1.1 Método gravimétrico

La exploración por gravedad se utiliza principalmente para comprender la topografía del basamento, las estructuras anticlinales y sinclinales, las fallas normales, las fallas inversas y

las ubicaciones de fallas transversales en la cuenca. Esto se logra debido a cambios laterales y verticales en la distribución de masa y densidad. Para aplicar el método gravimétrico, se debe satisfacer un contraste de densidad suficiente entre el medio encerrado y el objeto asociado; de lo contrario, los cambios en la gravedad no pueden atribuirse a accidentes geológicos o estructurales del subsuelo. También se debe considerar la profundidad del objeto y su tamaño (Álvarez, 2003).

4.1.2 Método magnético

Los métodos magnéticos dependen del magnetismo permanente de la roca, cuya fuerza y orientación se determinaron cuando se depositó. Las técnicas geofísicas implican estudios de campo que miden la dirección o la fuerza de los gradientes del campo magnético de la Tierra utilizando instrumentos utilizados para adquirir y registrar datos (magnetómetros). Las mediciones de estas anomalías permiten mapear grandes áreas de formaciones del subsuelo. Los datos se pueden recopilar desde aviones, satélites o barcos. Por lo tanto, los levantamientos magnéticos pueden cubrir áreas y ubicaciones geográficas extensas que, de otro modo serían inaccesibles (González, 2010).

Se tienen propiedades magnéticas en función de sus características diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas, sin embargo, la propiedad fundamental es la susceptibilidad magnética, propiedad tensorial que relaciona la capacidad de magnetización de una sustancia con la magnitud del campo magnético externo, al tener cambios en esta propiedad se generan anomalías del campo magnético (González, 2010).

La susceptibilidad magnética de las sustancias diamagnéticas se observa en sustancias de cobre, plata, oro, mercurio, plomo y arsénico. La susceptibilidad de las sustancias paramagnéticas se manifiesta en algunas sustancias como el cromo, molibdeno, wolframio, uranio y manganeso. Las sustancias ferromagnéticas se distinguen por valores altos de susceptibilidad y una relación compleja entre la magnetización, la magnitud del campo magnetizante y la temperatura (González, 2010).

4.1.3 Método sísmico

El método sísmico consiste en la generación de ondas producidas por una fuente artificial, que viajan a velocidades características a través del medio, estas a su vez son

refractadas y reflejadas por las estructuras existentes hacia geófonos, los cuales ejemplifican la señal en un sismograma, para su posterior análisis (Coates, 2016).

Las superficies reflectoras son interpretadas como las interfaces entre las capas de rocas, algunas de las cuales pueden haberse plegado, fisurado, fallado o erosionado a lo largo del tiempo geológico. Esta representación puede cortarse verticalmente para obtener una sección transversal u horizontalmente para mapear las profundidades de las capas de rocas presentes por debajo del área del levantamiento (Coates, 2016).

El método sísmico tiene aplicaciones principales en: diferenciar los tipos de estructura, construir mapas de estructuras, encontrar la relación entre tendencias estructurales, evaluar la velocidad de propagación en sedimentos, caracterizar la estratigrafía, ubicar zonas de presión anormal, definir inconformidades y analizar ambientes de depósito.

4.1.4 Método eléctrico

La prospección eléctrica se basa en la aplicación de la fenomenología de la conductividad. Sus principales aplicaciones incluyen la localización de cuerpos de material geológico capaces de almacenar agua, zonas de agua caliente o vapor; estratos arcillosos encajonados por rocas, o más compactos; mapeo de contaminantes; demarcación de plumas de contaminantes, y localización de oquedades, entre otras (Álvarez, 2003). Dependiendo de los objetivos, existen dos tipos básicos de procedimientos de campo:

Técnica de sondeo de resistividad. - El centro del arreglo permanece fijo y el intervalo de paso varía, por lo que la profundidad de exploración aumenta con la distancia entre electrodos. Brevemente, durante la perforación, se conoce el cambio de resistividad con la profundidad (Álvarez, 2003).

Técnica de perfilado o calicateo. - La práctica de perfilaje obliga a que la disposición de los electrodos permanezca fija mientras cambia el centro del sondeo. La profundidad de exploración permanece constante sabiendo que el nivel de resistividad cambia (Álvarez, 2003).

4.1.4.1 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

En esta técnica el centro del arreglo del electrodo es fijo, en cambio la distancia o espaciamiento entre electrodos va en aumento. Al implementar este sondeo se considera que

el suelo se comporta como una serie de capas horizontales homogéneas e isotrópicas. Los cambios de resistividad solo se detectan verticalmente (Sánchez, 2019).

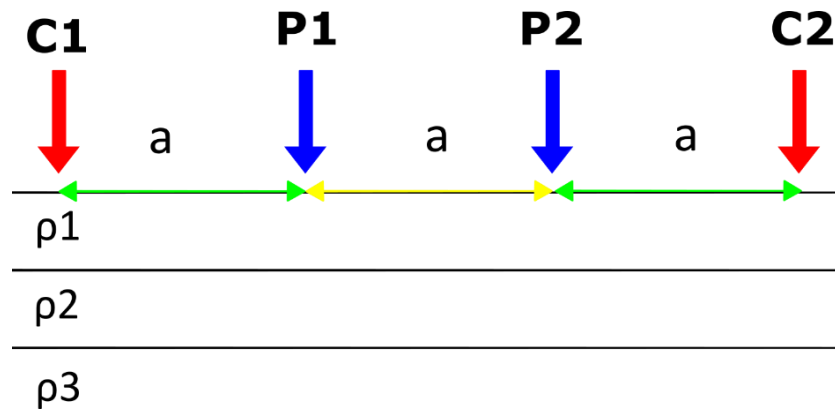


Ilustración 13. Diagrama esquemático (SEV) de un modelo 1D para 3 capas (Sánchez, 2019).

Los métodos eléctricos de resistividad en corriente continua consisten en inyectar corriente al terreno mediante dos electrodos conocidos como C1 y C2; el campo eléctrico generado se monitorea a través de mediciones de diferencias de potencial ΔV entre otros dos electrodos, conocidos como P1 y P2 (Sánchez, 2019).

4.1.4.2 Tomografía eléctrica (TRE)

La tomografía eléctrica es una técnica en la que se conjunta el funcionamiento de los métodos geo-eléctricos clásicos, cuya finalidad es la de determinar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, obtenido mediante la inyección de corriente eléctrica continua a través de un par de electrodos y midiendo la diferencia de potencial en otro par de electrodos a lo largo de un perfil (Lugo et al., 2008). Las mediciones obtenidas corresponden a valores de resistividad aparente, para lograr obtener el valor en resistividad real se realiza un procesamiento de datos en software especializado, mismo que proporciona la visualización de datos en un modelo 2D (Aracil et al., 2003).

El método de tomografía eléctrica presenta ventajas tales como: un proceso de adquisición de datos automatizado lo que permite procesar grandes cantidades de información; el estudio tiene una naturaleza no destructiva y poco invasiva; la implementación y diseño de un estudio es relativamente sencilla; el bajo costo y tiempo de levantamiento de tan solo unas horas, esto dependiendo de la longitud del tendido y el número de datos que se requieran obtener (Sequera, 2015).

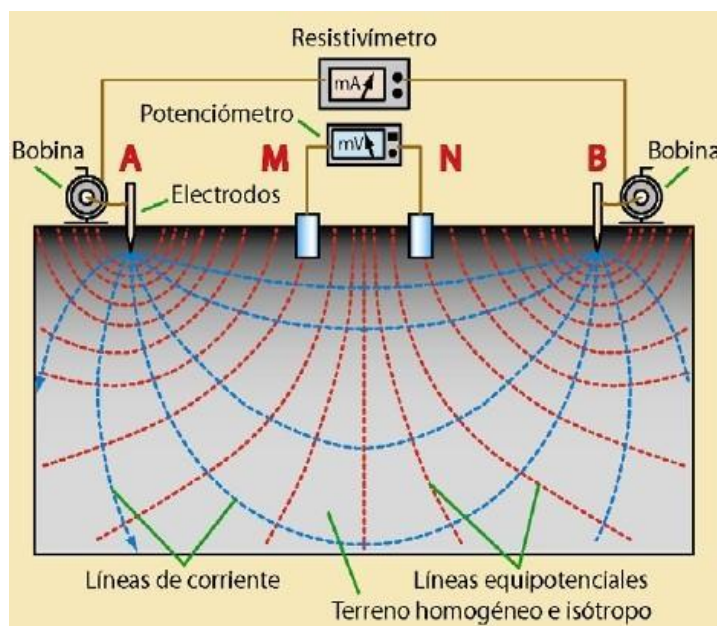


Ilustración 14. Dispositivo electródico (Martínez, 2006).

En la Tomografía de resistividad eléctrica (TRE) se utilizan configuraciones o dispositivos electródicos. En general, estos constan de cuatro electrodos, donde la corriente entra y sale por los electrodos A-B o C1-C2, mientras que M-N o P1-P2) se conectan a un instrumento que mide la diferencia de potencial entre estos (Martínez, 2006).

4.1.4.3 Fundamentos teóricos TRE

Con base en la información presentada por Ochoa (2016) se presentan las ecuaciones que describen los métodos eléctricos.

4.1.4.3.1 Leyes de Maxwell

Estas leyes describen que los campos eléctricos y magnéticos son manifestaciones del mismo fenómeno; el campo electromagnético. Las ecuaciones de Maxwell en su forma general son las siguientes.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1)$$

Denominada Ley de Gauss para el campo magnético. El significado físico de esta ecuación es la no existencia de los monopolos magnéticos. Un campo magnético es un ejemplo de campo selenoidal, los cuales se caracterizan porque sus líneas de campo son

cerradas sobre sí mismas. Matemáticamente la divergencia es cero o bien no existen fuentes ni sumideros sobre una superficie que encierre a este campo. Donde: $\mathbf{B}$ es el vector de inducción magnética medido en Wb/m² o teslas (T) y ∇ es el operador nabla.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Conocida como la Ley de Faraday. Esta establece que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético en el tiempo. Donde: $\mathbf{E}$ Es el campo eléctrico medido en V/m.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

Considerada como la ley de Gauss, su interpretación física es, que el flujo eléctrico que pasa a través de una superficie cerrada es proporcional con la carga eléctrica que se encierra dentro de ella, dicho de otra forma, esta ley permite calcular el campo eléctrico producido por una distribución de cargas. Donde: ρ es la densidad de carga encerrada (C/m³) y ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío (8,8541878176x10⁻¹² C²/Nm².);

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Conocida como la Ley de Ampere - Maxwell, establece que una corriente que circula a través de un contorno producirá un campo magnético proporcional a la intensidad de la corriente sobre el mismo contorno. Donde: $\mathbf{J}$ es la densidad de corriente eléctrica medido en A/m²; t es el tiempo y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío (4πx10⁻⁷ N/A²).

En el caso de métodos eléctricos o de campos electromagnéticos de frecuencia cero las ecuaciones (2) y (4) se reducen a las siguientes.

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

La ecuación representa que no hay conversión de campo magnético a eléctrico

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (6)$$

Esto significa que si hay conversión de eléctrico a magnético, que es la base del método geofísico Magnético Resistivo (MMR).

A frecuencia cero el campo eléctrico es un campo vectorial que tiene la característica de ser un campo conservativo. Los campos vectoriales conservativos pueden expresarse mediante el gradiente de un potencial escalar (V).

$$E = -\nabla V \quad (7)$$

Esta última expresión servirá para formular una relación entre el voltaje con la resistividad. (Ochoa, 2016).

4.1.4.3.2 Ley de Ohm

Para hacer fluir la corriente, se necesita “empujar” las cargas. Que tan rápido se moverán, en respuesta al “empuje” dado, dependerá de la naturaleza del material. Para la mayoría de los materiales, la densidad de corriente J es proporcional a la fuerza f por unidad de carga.

$$J = \sigma f \quad (8)$$

La constante de proporcionalidad en el caso isotrópico es una constante empírica que varía de un material a otro (conductividad σ). Se denomina al recíproco de esta magnitud ($1/\sigma$) como la resistividad ρ . En el caso de las cargas eléctricas, quien aplica la fuerza f es la fuerza electromagnética que experimenta una carga en presencia de un campo eléctrico E y magnético B .

$$J = \sigma(E + v \times B) \quad (9)$$

Normalmente, la velocidad de las cargas es suficientemente pequeña que el segundo término, mismo que puede ser ignorado. Resultando en la ecuación conocida como la Ley de Ohm, para un caso especial.

$$J = \sigma E \quad (10)$$

El campo eléctrico puede existir en el vacío, pero la densidad de corriente solo existe si el medio es conductor. En el caso isotrópico, ambos campos son paralelos. En el caso anisótropo la conductividad se vuelve una matriz y los campos ya no son necesariamente paralelos (Ochoa, 2016).

4.1.4.3.3 Ecuación de Laplace

El primer reto en electrostática es encontrar el campo eléctrico debido a una distribución de cargas estacionarias. De la ecuación (7) se sabe que el campo eléctrico se puede escribir como el gradiente de un potencial escalar. Sin embargo, expresar el campo eléctrico $\mathbf{E}$ en términos del potencial V sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (10) quedando:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \nabla V \quad (11)$$

Matemáticamente se sabe que la divergencia de un rotacional es igual a cero, si se aplica la divergencia a la ecuación (6) se obtiene:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (12)$$

Geométricamente esto dice que no existen fuentes ni sumideros en una superficie de control que rodea un campo vectorial. Sustituyendo la ecuación (11) en (12) se obtiene:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = \sigma \nabla \cdot \nabla V + \nabla V \cdot \nabla \sigma = 0 \quad (13)$$

Suponiendo un semi espacio homogéneo, es decir, que la conductividad no varíe en ninguna dirección ($\nabla \sigma = 0$), entonces la ecuación (13) se reduce a la ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (14)$$

Esta última ecuación, es para determinar el potencial que será observado sobre un semi espacio homogéneo. En el caso unidimensional se aplica la ecuación de Laplace para cada capa y luego se pegan las soluciones generales por medio de las condiciones de frontera. Para modelado en 2D y 3D, los métodos más utilizados son los de diferencias finitas, elementos finitos y ecuación integral (Ochoa, 2016).

4.1.4.3.4 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una medida de la dificultad que encuentra la corriente eléctrica cuando pasa por un material determinado (Orellana, 1982). Se trata de una propiedad específica de cada material que se mide en ohmios metro (Ωm), y que inversa de la conductividad eléctrica ($\rho = 1/\sigma$). Para encontrar una ecuación del potencial en función de la distancia r [$v(r)$], se puede relacionar la densidad de corriente ($\mathbf{J}$) que atraviesa la sección transversal de un conductor de superficie (S) con la corriente (I) de la siguiente manera:

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (15)$$

Donde la corriente I se mide en Amperios, y $\mathbf{J}$ en Amperios sobre metro cuadrado. Resolviendo esta última integral en la semiesfera respecto a θ y ϕ en coordenadas esféricas:

$$J = \frac{1}{2\pi r^2} \quad (16)$$

Se puede expresar el campo eléctrico como la variación del voltaje en una dirección

$$E = -\frac{dV}{dr} \quad (17)$$

Sustituyendo la ecuación (17) en ecuación (11) e igualando con la ecuación (16) se obtiene la ecuación (18). Posteriormente se Integra esta última ecuación respecto a r , se modifica $\mathbf{1}/\sigma = \rho$ y se obtiene la ecuación (19).

$$J = -\sigma \frac{dV}{dr} = \frac{1}{2\pi r^2} \quad (18)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (19)$$

Éste es el potencial para una distancia r desde el electrodo fuente que depende también de la resistividad ρ y que va a variar dependiendo el tipo de roca y del grado de saturación, entre otros.

Anteriormente se consideró el potencial debido a una fuente puntual enterrada en el subsuelo. Si se considera ahora un par de electrodos fuente (A, B) y otro par de electrodos receptores (M, N), la expresión para el potencial será la superposición de los potenciales. Al tener dos puntos de receptor, se tendrá dos potenciales debido a dos fuentes. Para fines prácticos se restan y a eso se le llama la diferencia de potencial ($V_m - V_n$), esto lleva a:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{R_{AM}} - \frac{1}{R_{BM}} \right) - \left(\frac{1}{R_{AN}} - \frac{1}{R_{BN}} \right) \right] \quad (20)$$

Renombrando todo lo que está dentro de los corchetes como G (factor geométrico) y despejando ρ de la ecuación (20) se obtiene una expresión más general para la resistividad:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} G^{-1} \quad (21)$$

Esta ecuación es válida para un medio homogéneo e isotrópico. Como la tierra es realmente heterogénea, las resistividades que se miden no son las reales, sino aparentes, entonces basta con reescribir ρ por una resistividad aparente ρ_a . Algunos de los factores que más influencia tienen en las resistividades son: el grado de saturación en agua del terreno; la salinidad y temperatura del fluido; la porosidad y la forma de los poros; el tipo de roca; la presencia de materiales arcillosos y el tamaño de grano (Ochoa, 2016).

4.1.4.3.5 Configuración geométrica de los electrodos

Dependiendo de los objetivos del estudio se escogerá la configuración más apropiada para que los resultados se ajusten a las necesidades finales de la investigación. Entre los factores que deben ser considerados para escoger uno u otro se encuentran: la profundidad de prospección, la sensibilidad a las variaciones verticales y horizontales de la resistividad, la cobertura horizontal y vertical, y la intensidad de la señal. A continuación, se presentan las configuraciones geométricas más comúnmente utilizadas en prospección eléctrica:

Arreglo Wenner

El arreglo Wenner consta de 4 electrodos conformados por dos de corriente (A y B) situados en los extremos y dos de potencial (M y N) situados en el centro, deben ser equidistantes, es decir, las distancias (AM, MN y NB), denominadas “ a ” debe ser siempre iguales. El arreglo Wenner es más sensible a cambios verticales de resistividad en el subsuelo debajo del centro del arreglo, sin embargo, es menos sensible a cambios horizontales (Vargas, 2015).

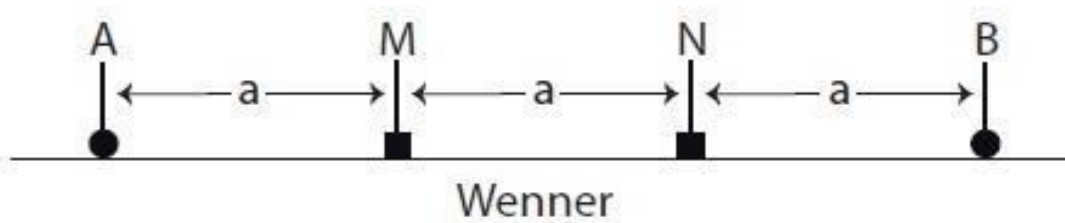


Ilustración 15. Configuración de un Arreglo Wenner (Pellicer, 2015).

Arreglo Schlumberger

En el arreglo Schlumberger los electrodos M y N permanecen fijos mientras que los de corriente A y B se mueven paulatinamente incrementando la distancia AB y con esto la profundidad de exploración.

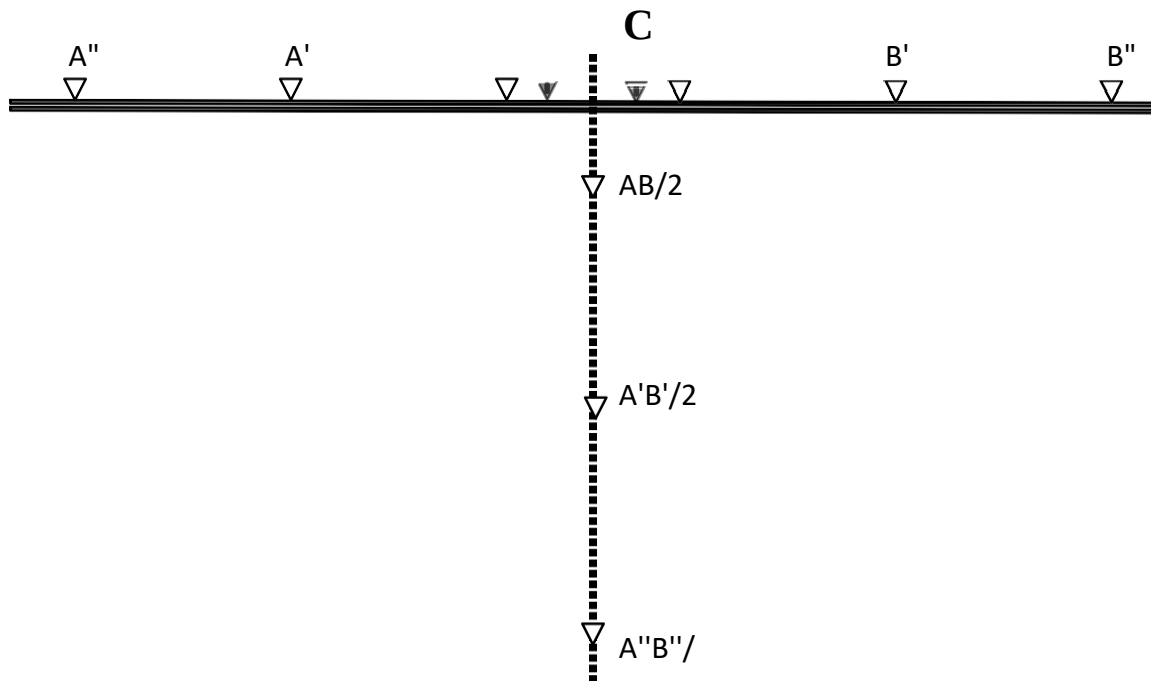


Ilustración 16. Configuración de un Arreglo Schlumberger (Álvarez, 2003).

Arreglo Dipolo-dipolo

En el arreglo la distancia “**a**” entre los electrodos de corriente (A-B) y los de potencia (M-N) será igual y se utiliza un espaciamiento mínimo. En este arreglo interviene un nuevo parámetro denominado “**n**” el cual representa al radio de la distancia A-M a la longitud del dipolo A-B o M-N e incrementa de 1 en 1 hasta llegar a 6 para aumentar la profundidad media de investigación.

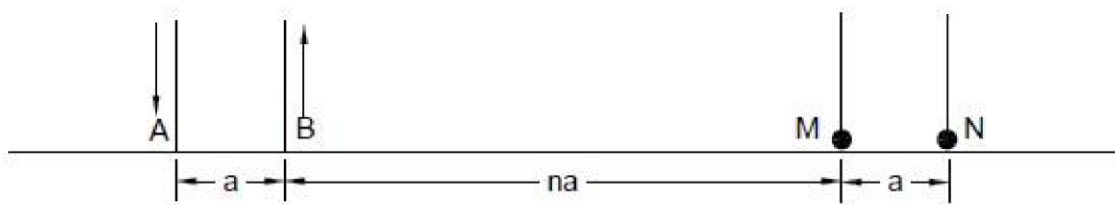


Ilustración 17. Configuración de un Arreglo Dipolo-dipolo (Vargas, 2015).

Este arreglo tiene una mejor cobertura horizontal que el arreglo Wenner para los sondeos en 2D. Es decir, se detectan estructuras verticales como cuevas, muros, plumas contaminantes. Por otro lado, el dispositivo dipolo-dipolo no resulta eficiente detectando estructuras horizontales como capas sedimentarias (Vargas, 2015).

Arreglo Wenner-Schlumberger

Este arreglo combina la resolución vertical de Wenner y la horizontal de Schlumberger. El factor “n” es el radio de la distancia entre A-M o N-B al espaciamiento entre el par de electrodos de potencial M-N. Este dispositivo electródico tiene una susceptibilidad moderada para detectar estructuras horizontales y verticales. La profundidad media de investigación tiene mayor alcance (10%) comparando con el arreglo Wenner, utilizando la misma distancia entre los electrodos (Sánchez, 2019).

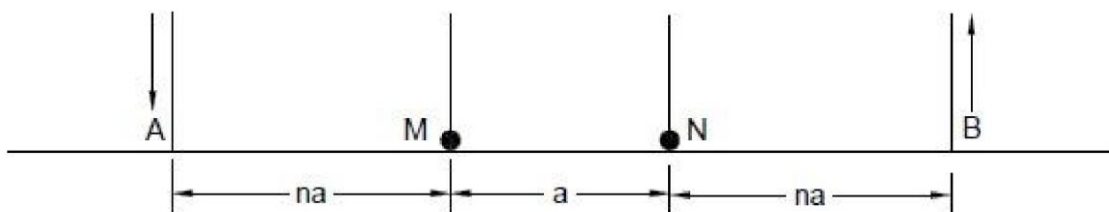


Ilustración 18. Configuración de un Arreglo Wenner-Schlumberger (Vargas, 2015).

La cobertura horizontal registrada en este arreglo será ligeramente mejor que la obtenida usando el arreglo Wenner, pero será menor a la cubierta por el arreglo Dipolo-Dipolo. Al realizar la adquisición de los datos con el arreglo Wenner- Schlumberger se perderán menos

datos conforme el nivel de profundidad aumenta (2 puntos/nivel). En el caso del arreglo Wenner la pérdida de datos es de 3 puntos por nivel (Vargas, 2015).

4.1.4.3.6 Inversión de los datos

Los valores de resistividad aparente obtenidos en campo son utilizados para generar imágenes eléctricas, para ello, es necesario convertir la pseudosección de resistividad aparente en un modelo de resistividad real, esto se puede lograr aplicando un algoritmo de inversión a estos datos, lo que da como resultado una imagen electrónica (Urbieto, 2001). Durante el proceso de inversión se utiliza como criterio de convergencia el valor del error cuadrático medio (RMS), entre los datos de campo y la respuesta del modelo teórico después de cada iteración, cuando el valor RMS es aceptable, se puede decir que el proceso de inversión está completo. Cabe señalar que, en ocasiones, el modelo con el RMS más bajo puede no ser siempre el mejor modelo desde el punto de vista geológico (Loke, 2012).

Uno de los algoritmos más utilizados en la inversión de imágenes eléctricas es el desarrollado por Loke y Barker (1996), que está basado en un método de mínimos cuadrados que produce un modelo en 2D, libre de distorsiones en la pseudosección de resistividad aparente ocasionadas por el tipo de arreglo electródico empleado. El modelo de inversión divide el subsuelo en un pequeño número de prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de cada prisma y poder así minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente entre los datos observados y los calculados (Loke, 2012).

4.1.4.4 Aplicaciones

El método es aplicable en exploración/desarrollo de depósitos mineros, investigación en ingeniería o en medio ambiente, investigación hidrogeológica, detección de cavidades subterráneas, localización de lixiviados y plumas de contaminantes, arqueo-geofísica y bio-geofísica como método primario y como método secundario en la localización y definición de objetos metálicos enterrados (Álvarez, 2003).

4.1.5 Método electromagnético

Los métodos de prospección electromagnética se basan en establecer un campo electromagnético variable a través del flujo de corriente alterna (campo primario), utilizando una fuente electromagnética de alta potencia o fluctuaciones en el campo magnético terrestre.

El campo primario induce una corriente alterna en cualquier conductor que encuentra en su camino de propagación, el campo penetra verticalmente en el interior del suelo, creando corrientes aleatorias. La intensidad de estas corrientes depende básicamente de la resistividad del conductor y la frecuencia del campo primario, su intensidad será mayor cuanto menor sea la resistividad del medio y más alta sea la frecuencia del campo inductor. La corriente alterna inducida en el conductor (tierra) produce a su vez un campo electromagnético opuesto al campo primario, llamado campo secundario. La interacción de los campos primario y secundario es detectada en un circuito eléctrico localizado en superficie, una bobina o un cable largo, denominado receptor (Serralde, 2011).

4.1.5.1 Método electromagnético con fuente controlada (CSEM)

Método utilizado principalmente en ambientes marinos, en los que es menos problemático investigar yacimientos de hidrocarburos potenciales sugeridos previamente en las imágenes sísmicas (Coates, 2016).

4.1.5.2 Método magnetotelúrico (MT)

Consiste en registrar en series de tiempo las componentes horizontales de los campos magnético y eléctrico que son provocados por la incidencia de las señales electromagnéticas y que fluctúan conforme a las propiedades del medio que atraviesan. Este método es aplicado en exploración de reservorios geotérmicos, exploración de hidrocarburos, exploración minera. Además, posee una serie de ventajas como: portabilidad, costos relativamente bajos, es no destructivo y se logran grandes profundidades de sondeo, superando los 25km de profundidad (Ramayo, 2010).

4.1.5.3 Método bajo número de inducción (LIN)

Método en el dominio de la frecuencia. Utiliza la propagación de los campos electromagnéticos alternos a través del suelo para medir la conductividad eléctrica y la susceptibilidad magnética aparentes. Es aplicado en estudios de la extensión de acuíferos y contenido de agua, estudios litológicos y salinidad del suelo, también han sido utilizados para delinear vertederos, plumas contaminantes y áreas de recarga en cultivos (Serralde, 2011).

4.1.5.4 Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM)

Los resultados de este método están en función de la resistividad y enlazando dos o más sondeos se pueden construir secciones geo-eléctricas con las que se logran observar las

heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca (Hernández, 2016).

4.1.5.5 Radar de Penetración Terrestre (GPR)

El radar de penetración terrestre o GPR por sus siglas en ingles es una técnica geofísica de carácter no destructiva y no invasiva para la exploración del subsuelo, su caracterización y monitoreo (Olohoeft, 2006). El método consiste en la emisión de ondas electromagnéticas (EM) que son reflejadas de acuerdo con el contraste de las propiedades dieléctricas de los materiales enterrados en la zona (Conyers, 2018), es considerado como versátil y rápido para investigaciones a profundidad limitada, cuya principal característica es permitir delinear las interfaces entre los diferentes materiales que constituyen el subsuelo, siempre que exista suficiente contraste entre las propiedades dieléctricas de las estructuras involucradas (Ayala, 2009).

El equipo consiste en un sistema de control (ordenador) conectado a unas antenas que se desplazan sobre la superficie del medio que se desea analizar. Estas antenas son las encargadas de emitir energía hacia el interior del medio y de registrar las ondas que provienen de las reflexiones producidas en las discontinuidades interiores. Las antenas pueden ser básicamente de dos tipos: monoestáticas, donde una misma unidad es a la vez emisora del impulso electromagnético y receptora de la señal reflejada; o biestáticas que son formadas por dos módulos separados (Tavera, 2008).

Las características de las ondas recibidas dependerán tanto de variaciones de la permitividad eléctrica, conductividad y permeabilidad magnética del subsuelo, como de las características de la onda emitida y de los objetos que se encuentran a su paso (Pueyo, et al; 2005). La conductividad representa la medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica y es descrita según la ley de Ohm, las unidades de medida en el S.I. son Ωm . La permitividad dieléctrica representa la medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de la respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo (Vega, 2002). La permeabilidad magnética (μ) es la medida de la capacidad de un medio para atraer los campos magnéticos (Flores, 2019).

4.1.5.5.1 Funcionamiento del GPR

El funcionamiento del GPR en términos visuales indica que la antena emisora envía una señal al suelo, la cual puede sufrir reflexión, refracción o difracción. Cuando la onda radiada encuentra heterogeneidades en el comportamiento electromagnético de cada capa el cual viene descrito por su permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad dieléctrica, parte de la energía se refleja hacia la superficie y otra parte se transmite, alcanzando mayor profundidad. La señal reflejada define los coeficientes de transmisión y de reflexión de energía, posteriormente es amplificada, transformada al espectro de audio - frecuencia y registrada directamente en un equipo informático, donde puede ser visualizada casi en tiempo real durante las labores de prospección (Pueyo *et al.*, 2005).

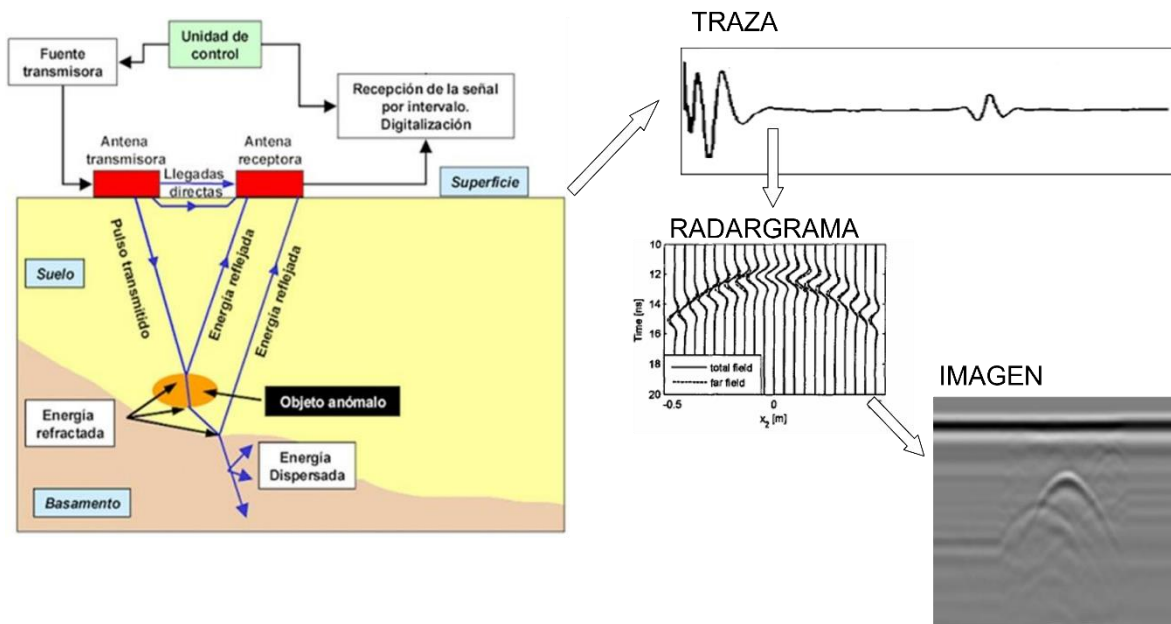


Ilustración 19. Funcionamiento del GPR (Ayala, 2009).

El GPR tiene una excelente resolución lateral y vertical; las imágenes son de fácil interpretación. Permite confeccionar una representación virtual del sólido con un rango de señales electromagnéticas desde 25 MHz hasta 1600 MHz, este rango es diseñado principalmente para la localización de objetos o estructuras enterradas a una profundidad somera con respecto de la superficie terrestre (Gascón, 2007). No es necesario que el material presente una conductividad o susceptibilidad magnética altas, sólo es necesario un cambio significativo de estas propiedades entre dos materiales para que sea detectado por el GPR. (Larrotta, 2020).

4.1.5.6 Fundamentos teóricos GPR

La teoría electromagnética (EM) está conformada por una serie de leyes fundamentales que rigen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos inducidos por cargas eléctricas estáticas y móviles. Mismas que son presentadas a continuación con base en la información publicada por Flores (2019).

4.1.5.6.1 Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell (25, 26, 27, 28) en conjunto con las denominadas ecuaciones constitutivas (29, 30, 31), son la base teórica en la que se sustenta el fenómeno electromagnético.

$$\nabla D = \rho f \quad (25)$$

$$\nabla E = -\frac{\partial B}{\partial t + M} \quad (26)$$

$$\nabla B = 0 \quad (27)$$

$$\nabla H = -\frac{\partial D}{\partial t + J} \quad (28)$$

Donde: E es el campo eléctrico; H es el campo magnético; D es el vector desplazamiento eléctrico; B es el vector inducción magnética; ρ Es la densidad de carga libre y J es la densidad de corriente.

Las ecuaciones constitutivas (29, 30, 31) son aquellas que relacionan la intensidad del campo eléctrico y magnético con el desplazamiento eléctrico y la inducción magnética, permitiendo correlacionar las interacciones entre las ondas electromagnéticas y los medios en los cuales se propagan.

Continuidad

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (29)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (30)$$

$$J = \sigma \vec{E} \quad (31)$$

Donde: ϵ es la permitividad dieléctrica; σ es la conductividad; μ es la permeabilidad magnética.

4.1.5.6.2 Ecuación del radar

La ecuación del georradar para equipos monoestáticos (antena en función emisor-receptor), está determinada por la relación (**Q**) entre la potencia recibida (**PR**) y la potencia emitida (**PE**). Donde: λ es la longitud de onda en aire; G es la ganancia de la antenna; s es la superficie efectiva del reflector; α es la constante de atenuación y r la distancia al reflector.

$$Q = \frac{P_R}{P_E} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G^2 \cdot \frac{S}{(4\pi r^2)^2} \cdot e^{-4\alpha r} \quad (32)$$

De la ecuación 32, se puede obtener la relación entre amplitudes de onda (**Q_{Amp}**) recibida (**AR**) y emitida (**AE**), de la siguiente manera.

$$Q_{Amp} = \frac{A_R}{A_E} \propto \sqrt{\frac{1}{r^4} \cdot e^{-4\alpha r}} = \frac{e^{-4\alpha r}}{r^2} \quad (33)$$

La forma general de la ecuación del georradar válida para un radar biestático (donde la antenna transmisora y la antenna receptora son distintas) es:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad (34)$$

Se tiene también:

$$A_e = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R^2)^2} \frac{A_e}{L} \quad (35)$$

Esta ecuación permite evaluar las prestaciones de un sistema radar, una vez que se conozcan los parámetros conocidos del sistema, o sea la capacidad de alcance del radar que se define como la distancia máxima (**R_{max}**) a la cual es posible detectar reflexiones de las anomalías. Considerando ambas las ecuaciones se obtiene el valor de la distancia máxima según la expresión:

$$R_{max} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt[4]{\frac{P_t G_t \sigma A_e}{N \cdot SNR_{min}}} \quad (36)$$

Donde: σ es la sección transversal del radar de la anomalía detectada, que depende de su geometría; L Cuantifica las pérdidas por propagación; SNR_{min} Es la relación señal/ruido mínimo.

4.1.5.6.3 Tratamientos de interpretación

Se tienen tratamientos que se aplican en el análisis de la información generada por el georradar, a continuación, se describen algunos de ellos con base en la información expuesta por Tavera (2008).

Filtros frecuenciales horizontales o espaciales. - Tratamiento que se aplica horizontalmente en el registro (dirección espacial). Este tratamiento persigue la eliminación del ruido de fondo de un radargrama. Este ruido puede ser de alta frecuencia (se registra en pocas trazas seguidas), o en su defecto de baja frecuencia (que aparece en bastantes trazas consecutivas).

Filtros pasa bajo. - Consisten en un promediado de varias trazas consecutivas, siendo la salida del filtro la traza promedio resultante.

Filtros pasa alto. - Consisten en un promediado de varias trazas consecutivas, con la salida del filtro, resultando de restar la traza promedio obtenida a la traza central.

Filtros frecuenciales verticales o temporales. - Tratamientos que se aplican en la dirección vertical o temporal de los registros, sobre cada una de las trazas. Pueden utilizarse para realizar correcciones de línea base o para eliminar parte del ruido electrónico inherente a cada traza.

Filtros pasa alto o pasa bajo. - En este caso consisten en multiplicar cada señal por un operador que vale la unidad en la banda de frecuencias que interesa conservar, y que tiende a cero en la banda de frecuencias que no interesa. Cuando se aplican estos filtros es conveniente realizar un estudio de frecuencias antes de la aplicación y después de la misma.

Transformada de Fourier. - Este tratamiento de datos consiste en un análisis frecuencial que permite el estudio de la evolución de los parámetros de la señal en función de la frecuencia. También es utilizado para obtener los espectros de frecuencia de las trazas.

Correcciones estáticas. - Este tratamiento tiene como objetivo corregir los efectos que se producen sobre un registro a consecuencia de la topografía de la superficie o debido a variaciones bruscas de la velocidad en el medio.

Ganancia. - Este tratamiento trata de la amplificación que se introduce a la señal en función del tiempo y de la profundidad. Se utiliza para corregir, por así decirlo, los efectos de disminución de la energía producidos durante la propagación de la señal por el medio.

Migración. - Este procedimiento se utiliza para trasladar a su posición real los efectos de inclinación de las reflexiones registradas y, por otro lado, para colapsar las difracciones que se producen. Para utilizar este tratamiento se necesita estimar la velocidad promedio de propagación por el medio, pero puede conocerse a partir de las hipérbolas generadas en las difracciones.

4.1.5.6.4 Aplicaciones

El radar de penetración terrestre tiene su principal aplicación en: estratigrafía somera, discontinuidades someras, detección de paleocauces, localización de fracturas y cavidades, ubicación de objetos enterrados, localización y delimitación de plumas de contaminación, corrosión, entre otros (Álvarez, 2003).

Capítulo 5: Metodología

5.1 Localización de zonas influyentes

Considerando la información recabada es posible identificar aquellas zonas con reporte geológico y de aparición de material fósil. Siendo estos los sitios que tendrán un alto nivel de influencia para la determinación de la zona prospectiva. Con la finalidad de identificar esta zona, son incorporados los sitios influyentes en un mapa de la zona. A partir de esto se descartan las zonas que no tengan las características geológicas (unidades principales de Valsequillo) y paleontológicas (reporte de aparición fósil) necesarias y que imposibiliten la obtención de un estrato con material fósil presente, también aquellas con una topografía que genere la imposibilidad de la realización del estudio geofísico. Descartadas aquellas zonas de imposibilidad, es necesario obtener una zona con reporte de aparición de material fósil in situ y que forme parte de la extensión geográfica de Ramsar.

Con la información obtenida mediante la bibliografía presentada en este documento, se establecen geográficamente aquellas localidades con presencia de material fósil y con información geológica reportada. A través de este proceso se conoce la distribución y orientación de estas.

En el mapa presentado a continuación, se observa que las localidades mencionadas tienen una distribución geográfica bastante similar y cercana. A través de un proceso de búsqueda, se identificó una zona con presencia de material paleontológico aparentemente procedente de un "*Mammuthus*". Localizado en las coordenadas 18,953952 N, -98,134768 W; correspondiente a "La Taza", Santo Tomas Chautla, Puebla.

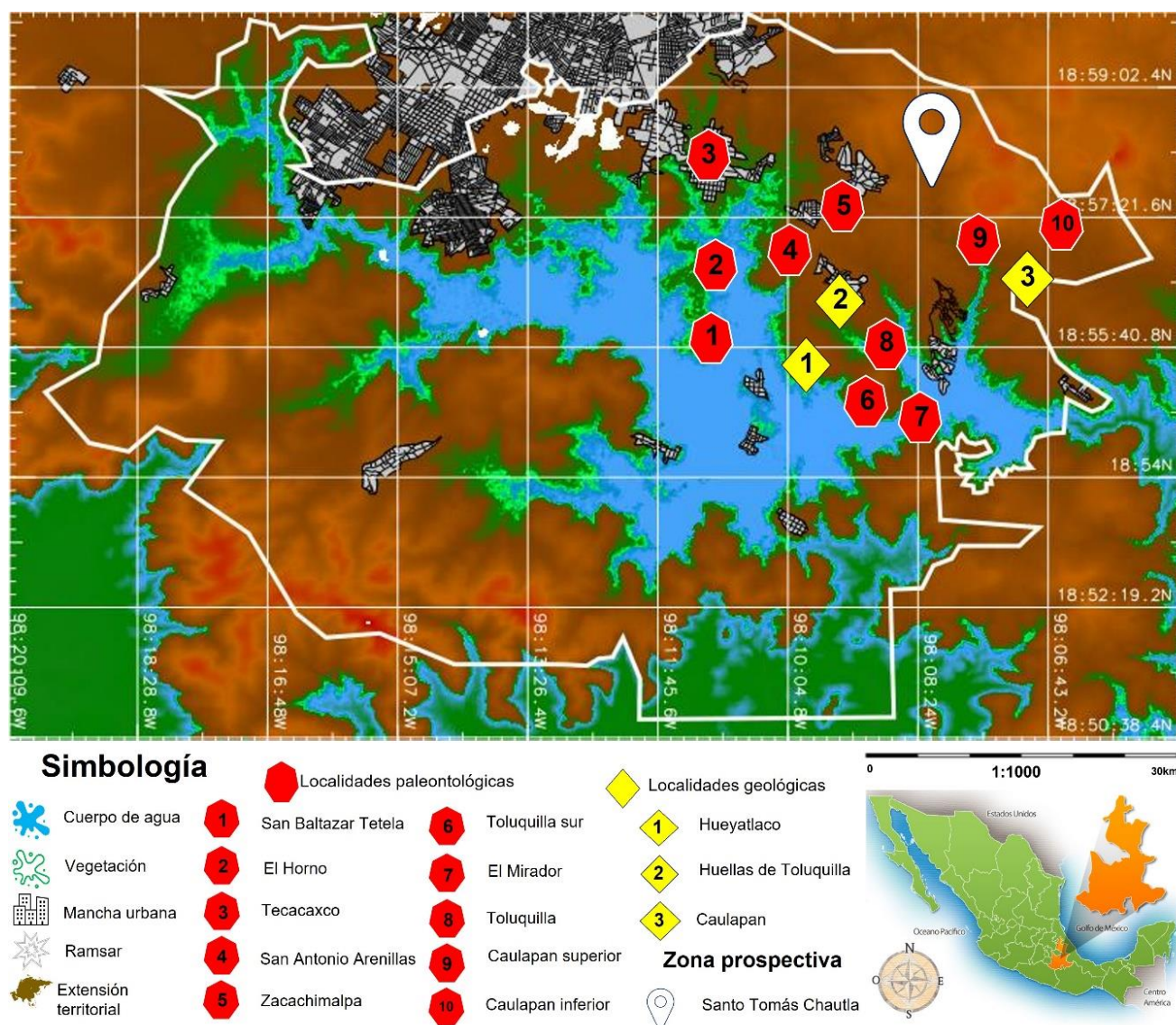


Ilustración 20. Localización de zonas influyentes y zona prospectiva.

5.2 Exploración geofísica

Identificada la zona prospectiva, fueron realizadas visitas de campo para conocer la extensión y orientación de la zona disponible. Determinada como una zona viable para la ejecución de la prospección, se planteó un programa de ejecución para la misma, en que se considera la extensión de los perfiles, su distribución, orientación y método a ejecutar.

5.2.1 Planificación GPR y TRE

Para iniciar con la adquisición de datos en campo y con la finalidad de obtener una buena ejecución, se llevaron a cabo labores administrativas y logísticas previas. Los trámites administrativos consistieron en la redacción de cartas de solicitud para la ejecución de las

prospecciones, mismas que fueron presentadas y recibidas por las autoridades de la presidencia auxiliar, comisaria ejidal y comandancia de policía de Santo Tomás Chautla, Puebla. De igual forma fue solicitado un permiso y se dio a conocer sobre las actividades a los dueños del terreno ejidal, también, se expidieron cartas de notificación al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), institución que tiene el control legal sobre los elementos fósiles expuestos en la zona.

Posteriormente se realizó una visita de campo a la zona denominada “La Taza” ubicada dentro de la comunidad de Santo Tomás Chautla para dar una tentativa de la distribución de los tendidos de TRE y de las líneas de estudio de GPR, también se realizaron pruebas previas con el equipo operativo para comprobar que se encontrará en condiciones óptimas y con el personal de trabajo para verificar el manejo de este y así obtener mediciones de manera rápida y eficaz. Una vez terminada la revisión del equipo de trabajo, se procedió a realizar una solicitud de préstamo al laboratorio integral de la Facultad de Ingeniería (BUAP).



Ilustración 21. Zona de estudio “La Taza”, Santo Tomás Chautla, Puebla.

Otro punto importante que se tomó en cuenta fue la planeación de los tendidos antes de proceder a la adquisición de datos, se escogió el arreglo Wenner- Schlumberger dado que presenta una óptima resolución horizontal y vertical, por lo tanto, se observaran de manera aceptable las variaciones laterales y la profundidad de la resistividad de zona. En cuanto al estudio con GPR se estableció el uso de antena, debido principalmente a su practicidad, portabilidad y a la superficie irregular del terreno de la zona de estudio.

5.2.2 Adquisición TRE

Los datos fueron recabados en una salida de campo de un día, la cual se llevó a cabo el sábado 12 de marzo del 2022, con un equipo de trabajo de seis personas.



Ilustración 22. Distribución de tendidos TRE, perspectiva en campo.

En donde:

T1 corresponde al primer tendido de Tomografía Eléctrica, el cual fue realizado sobre la parte superior del punto de importancia (fósil).

T2 corresponde al segundo tendido de Tomografía Eléctrica, el cual fue ejecutado a un costado (dirección izquierda - derecha) del primer tendido.

5.2.2.1 Instrumentación TRE

El equipo utilizado para la Tomografía fue un resistivímetro ARES GF Instruments. Es un receptor y transmisor, con una potencia de 100V, 500V y 1A, cuenta con un microprocesador, memoria interna y una pantalla de visualización de datos, capaz de soportar un sistema de cables inteligentes.

Se requirieron de 17 electrodos, los cuales fueron utilizados para montar el arreglo Wenner-Schlumberger, arreglo empleado debido a que combina la resolución vertical del arreglo Wenner y la horizontal del arreglo Schlumberger. También se emplearon 4 carretes de cable, un par de carretes se conecta al resistivímetro y a los extremos del arreglo los cuales tienen la función de transmitir corriente, el par restante se conecta a dos electrodos en el centro del arreglo, los cuales medirán la diferencia de potencial. Otras herramientas utilizadas fueron marro, cinta métrica y GPS.



Ilustración 23. Instrumentación TRE

5.2.2.2 Tendidos de TRE

En primera instancia se procedió a verificar la extensión de los tendidos, todo esto tomando en cuenta las limitaciones del terreno. Comprobada la extensión se procedió a colocar los electrodos con espacios equidistantes entre ellos y una vez colocados se efectuó la conexión de cables al resistivímetro y a los electrodos correspondientes. Concluida la verificación de las conexiones entre el resistivímetro y los electrodos se procedió a inyectar corriente y a la toma de datos. De esta manera se sigue una secuencia de medidas abriendo el espacio entre los electrodos de corriente para cada cambio de nivel hasta llegar a los niveles $n=8$ y $n=5$, este procedimiento se efectuó para las 2 tomografías. En la tabla 6 se muestra las coordenadas iniciales y finales de los tendidos, así como la extensión, niveles y factor de espaciamiento.

Tabla 6. Tendidos TRE.

Tendidos TRE					
Tendido	Espaciamiento	Niveles	Coord. inicial	Coord. final	Long.
1	3m	8	18°57'13.88"N; 98°08'04.96"O	18°57'14.20"N; 98°08'05.59"O	51m
2	3m	5	18°57'14.21"N; 98°08'05.60"O	18°57'14.25"N; 98°08'06.20"O	36m

5.2.3 Adquisición GPR

Los datos fueron recabados en una salida de campo de un día, la cual se llevó a cabo el sábado 12 de marzo del 2022, con un equipo de trabajo de cinco personas.

A continuación, se presenta la distribución de las líneas de estudio de GPR en donde:

L1 corresponde a la primera línea de estudio de GPR, partiendo del punto de importancia (fósil) se encuentra al costado derecho (dirección derecha – izquierda). L1B misma posición que L1 (dirección izquierda – derecha).

L2 corresponde a la segunda línea de estudio de GPR, partiendo del punto de importancia (fósil) se encuentra sobre este (dirección derecha – izquierda). L2B misma posición que L2 (dirección izquierda – derecha).

L3 corresponde a la tercera línea de estudio de GPR, partiendo del punto de importancia (fósil) se encuentra al costado izquierdo (dirección derecha – izquierda). L3B misma posición que L3 (dirección izquierda – derecha).

L4 corresponde a la cuarta línea de estudio de GPR, partiendo del punto de importancia (fósil) se encuentra en la parte superior al costado derecho de L5 (dirección derecha – izquierda). L4B misma posición que L4 (dirección izquierda – derecha).

L5 corresponde a la quinta línea de estudio de GPR, partiendo del punto de importancia (fósil) se encuentra en la parte superior al costado derecho de L6 (dirección derecha – izquierda). L5B misma posición que L5 (dirección izquierda – derecha).

L6 corresponde a la sexta línea de estudio de GPR, partiendo del punto de importancia (fósil) se encuentra en la parte superior (dirección derecha – izquierda). L6B misma posición que L6 (dirección izquierda – derecha).



Ilustración 24. Distribución de líneas de estudio GPR.

5.2.3.1 Instrumentación GPR

El equipo utilizado para el GPR fue un Georadar Zond 12e, con antena de 2000 MHz. Es un instrumento que permite proyectar en imágenes, las ondas que percibe del subsuelo, el dispositivo cuenta con una conexión a un equipo de cómputo en cual es posible la visualización de las imágenes captadas. Se requirió de equipo de cómputo, el cual contiene el software Prism 2.6 especializado en análisis de datos de este tipo de prospección y una batería para su carga eléctrica.

5.2.3.2 Líneas de estudio GPR

En primera instancia se procedió a verificar la extensión y distribución de las líneas de estudio, esto tomando en cuenta las limitaciones del terreno. Teniendo comprobada la distribución se procedió a establecer las conexiones en el equipo de cómputo y batería. Concluida la verificación de las conexiones se procedió a emisión de ondas electromagnéticas y a la toma de datos. Es primordial mencionar que las líneas de estudio se realizaron en dos direcciones, teniendo información de verificación.

Tabla 7. Líneas de estudio GPR.

Líneas de estudio GPR			
Líneas	Coordenada inicial	Coordenada final	Longitud
L1	18°57'14.26" N; 98°08'05.30" O	18°57'14.67" N; 98°08'05.35" O	24m
L1B	18°57'14.26" N; 98°08'05.30" O	18°57'14.67" N; 98°08'05.35" O	
L2	18°57'14.11" N; 98°08'04.96" O	18°57'14.26" N; 98°08'05.30" O	22m
L2B	18°57'14.11" N; 98°08'04.96" O	18°57'14.26" N; 98°08'05.30" O	
L3	18°57'14.28" N; 98°08'05.11" O	18°57'14.59" N; 98°08'05.23" O	22m
L3B	18°57'14.28" N; 98°08'05.11" O	18°57'14.59" N; 98°08'05.23" O	
L4	18°57'14.11" N; 98°08'05.52" O	18°57'14.23" N; 98°08'06.02" O	32m
L4B	18°57'14.11" N; 98°08'05.52" O	18°57'14.23" N; 98°08'06.02" O	
L5	18°57'13.96" N; 98°08'05.33" O	18°57'14.09" N; 98°08'05.50" O	12m
L5B	18°57'13.96" N; 98°08'05.33" O	18°57'14.09" N; 98°08'05.50" O	
L6	18°57'13.98" N; 98°08'05.00" O	18°57'13.96" N; 98°08'05.33" O	20m
L6B	18°57'13.98" N; 98°08'05.00" O	18°57'13.96" N; 98°08'05.33" O	

5.3 Interpretación y análisis de los modelos geofísicos

El procesamiento de datos será ejecutado en software especializado, para el caso de Tomografía de Resistividad Eléctrica se empleará el RES2DINV, para el Radar de Penetración Terrestre se empleará el Prims. Ejecutado y realizados los modelos 2D se realizará su análisis e interpretación.

5.3.1 Procesamiento de datos TRE

Para la realización del procesamiento de datos de TRE, se consideró la siguiente metodología:

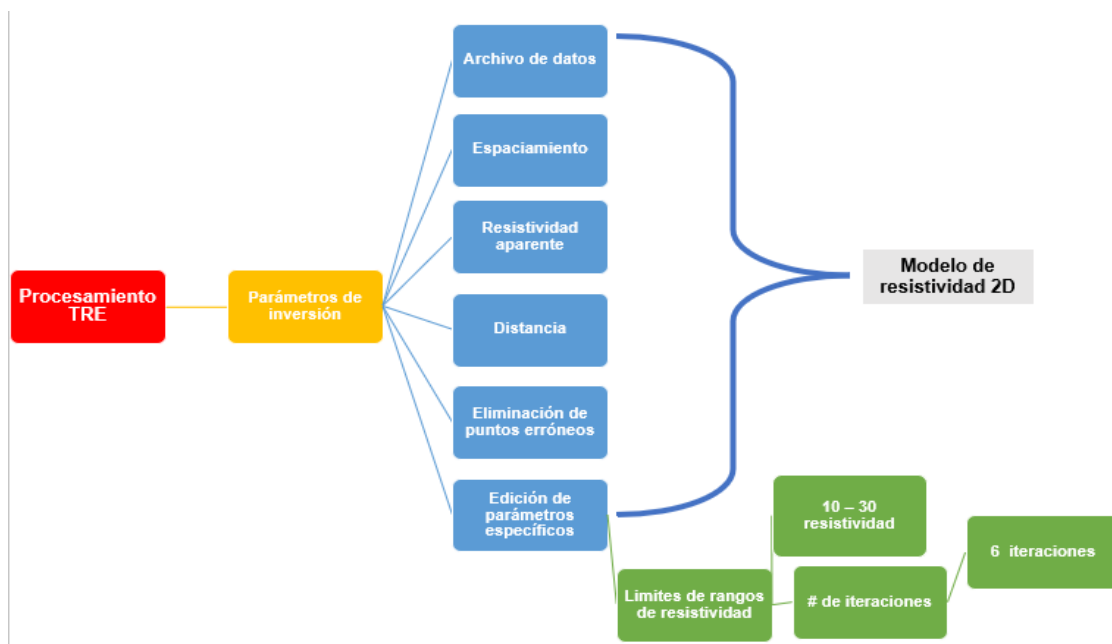


Ilustración 25. Metodología del procesamiento de TRE.

El procesamiento se realizó a través del software **RES2DINV**, el cual es un programa informático que determinará automáticamente un modelo de resistividad bidimensional (2-D) para el subsuelo a partir de los datos obtenidos en los estudios de imágenes eléctricas (Griffiths y Barker 1993), diseñado para invertir grandes conjuntos de datos (con unos 200 a 21000 puntos de datos) recogidos con un sistema con un gran número de electrodos (unos 25 a 16000 electrodos). Se utiliza una subrutina de modelización directa para calcular los valores de resistividad aparente y una técnica de optimización no lineal por mínimos cuadrados para la rutina de inversión (deGroot-Hedlin y Constable 1990, Loke y Barker 1996a). El programa es compatible con las técnicas de modelización por diferencias finitas y por elementos finitos.

Este programa se puede utilizar para estudios que utilizan las matrices Wenner, polo-polo, dipolo-dipolo, polo-dipolo, Wenner-Schlumberger y dipolo-dipolo ecuatorial (rectangular). Además de estas matrices comunes, el programa soporta incluso matrices no convencionales con un número casi ilimitado de posibles configuraciones de electrodos. Puede procesar pseudosecciones con hasta 16000 electrodos y 21000 puntos de datos. El mayor espacio entre electrodos puede ser hasta 36 veces el menor espacio utilizado en un solo conjunto de datos. Además de los estudios normales realizados con los electrodos en la superficie del suelo el programa también admite estudios subacuáticos y de perforación transversal. (Geotomo, 2010).

Los datos obtenidos son conjuntados en un archivo .dat, específico para poder ser leído por el software y organizado de la siguiente forma:

Tabla 8: Arreglo del conjunto de datos (Modificado de Geotomo, 2010).

Arreglo del conjunto de datos para procesamiento TRE										
Archivo Mixed. Dat					Título					
1.0					Unidad distancia entre electrodos					
11					Tipo de matriz (para matriz general)					
0					Tipo de sub matriz					
tipo de medición (0 = aplicación, resistividad, 1= resistencia)					Encabezamiento					
0					Aquí para indicar los valores de resistividad aparente					
407					Número de puntos de datos					
1					Indicador del tipo de localización x					
0					Sin valores IP, I si I.P está presente					
4	0.00	0.00	3.00	0.00	1.00	0.00	2.00	0.00	9.23	Formato para cada punto de datos: Número de electrodos utilizados en la medición, localización electrodo C1, localización electrodo C2, localización electrodo P1, localización electrodo P2, valores de resistividad aparente.
4	1.00	0.00	4.00	0.00	2.00	0.00	3.00	0.00	9.86	
4	2.00	0.00	5.00	0.00	3.00	0.00	4.00	0.00	9.90	
4	3.00	0.00	6.00	0.00	4.00	0.00	5.00	0.00	10.87	
4	4.00	0.00	7.00	0.00	5.00	0.00	6.00	0.00	10.98	
4	5.00	0.00	8.00	0.00	6.00	0.00	7.00	0.00	11.67	
4	6.00	0.00	9.00	0.00	7.00	0.00	8.00	0.00	11.98	
4	7.00	0.00	10.00	0.00	8.00	0.00	9.00	0.00	12.67	
4	8.00	0.00	11.00	0.00	9.00	0.00	10.00	0.00	14.77	
4	9.00	0.00	12.00	0.00	10.00	0.00	11.00	0.00	15.98	
4	10.00	0.00	13.00	0.00	11.00	0.00	12.00	0.00	24.86	
4	11.00	0.00	14.00	0.00	12.00	0.00	13.00	0.00	25.90	
4	12.00	0.00	15.00	0.00	13.00	0.00	14.00	0.00	26.00	
4	13.00	0.00	16.00	0.00	14.00	0.00	15.00	0.00	26.89	
4	14.00	0.00	17.00	0.00	15.00	0.00	16.00	0.00	27.67	
4	15.00	0.00	18.00	0.00	16.00	0.00	17.00	0.00	28.13	

Leídos los datos es posible identificar y eliminar aquellos puntos que no correspondan con la geometría del tendido.

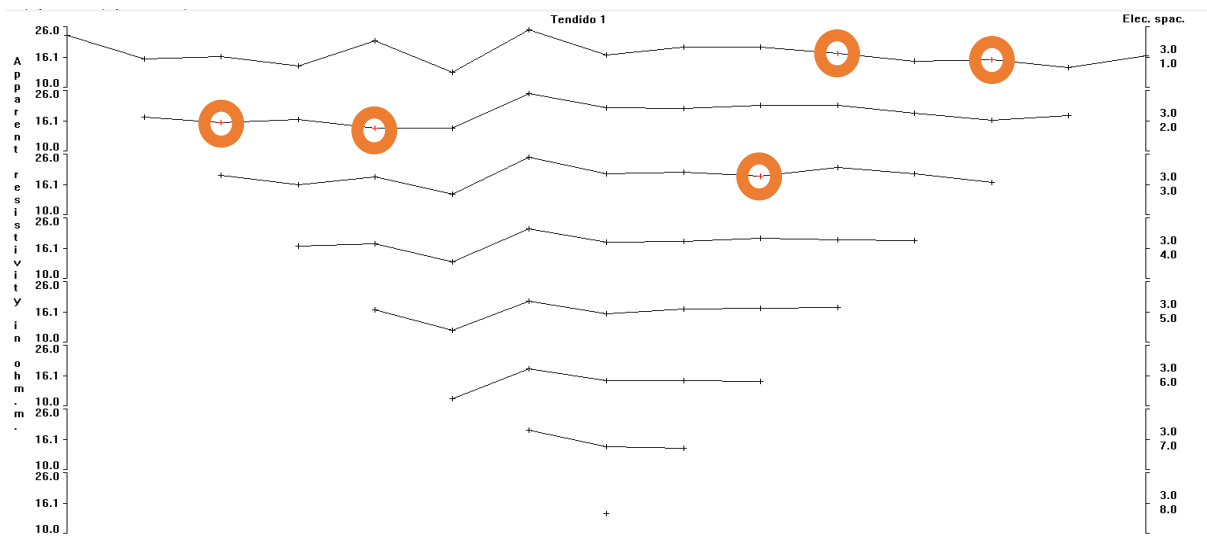


Ilustración 26. Puntos erróneos del tendido T1.

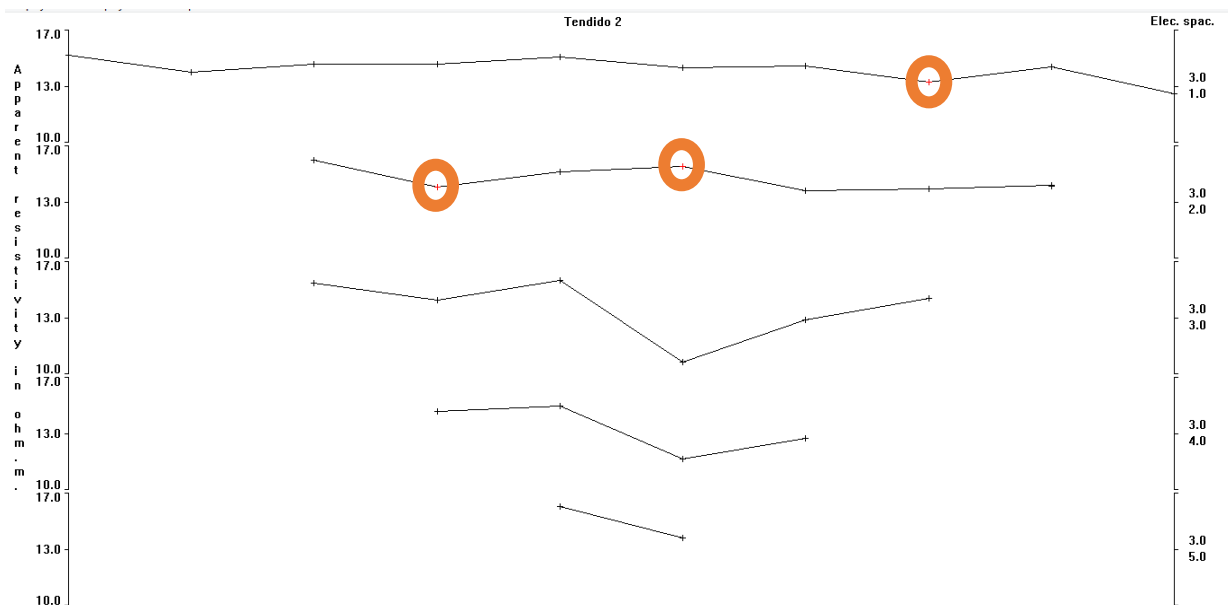


Ilustración 27. Puntos erróneos del tendido T2.

Para el primer tendido se eliminaron 5 puntos erróneos y para el caso de segundo tendido se despreciaron solo 3 puntos.

En cuanto a la edición de parámetros se consideran datos que tienen una relevancia importante en el modelo final, en este caso se consideran: los límites de resistividad (10 - 30 para ambos tendidos), numero de iteraciones (6 iteraciones para T1 y 6 iteraciones para T2).

5.3.2 Procesamiento de datos GPR

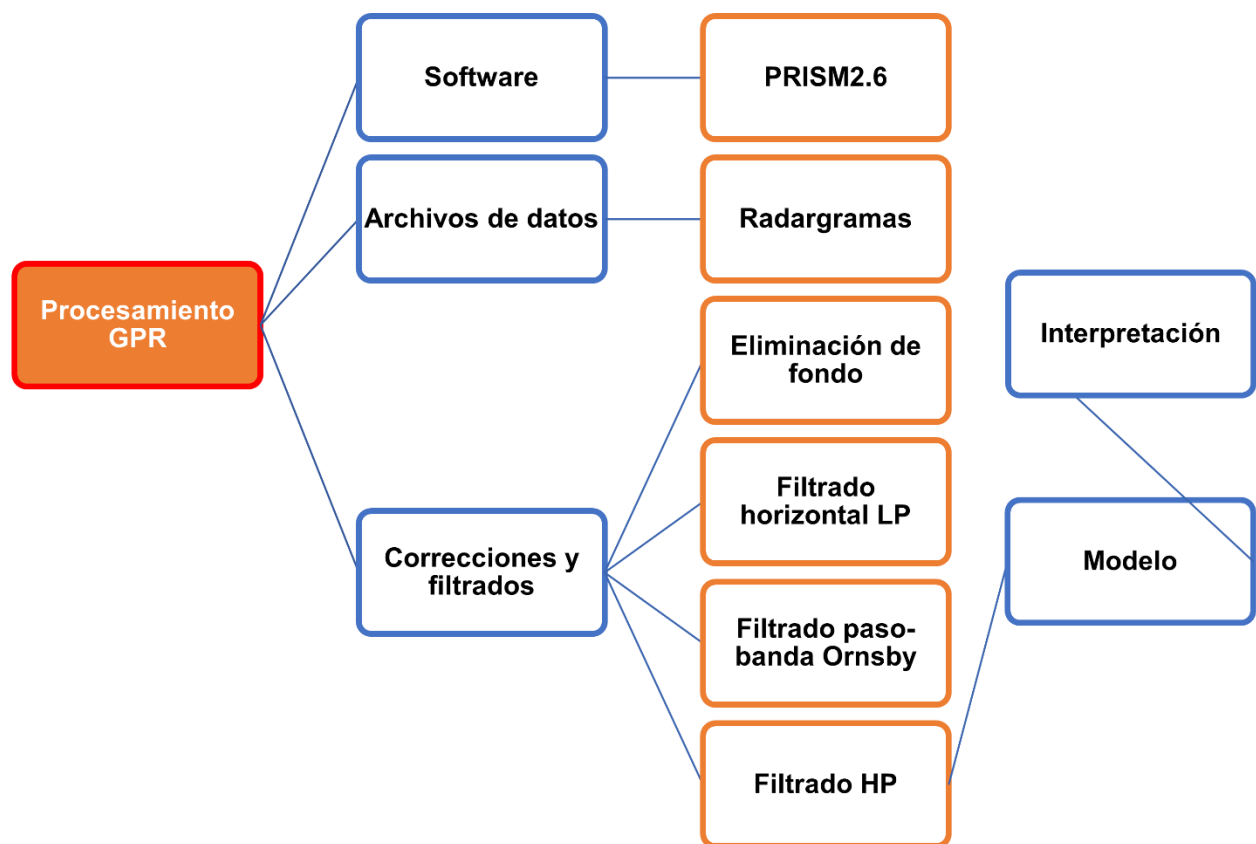
Para el procesamiento de datos y posterior análisis de resultado es necesario emplear un software especializado. El software Prism2.6 es propiedad legal de Radar Systems, nc., diseñado para ser utilizado en el campo como un componente de Zond-12e y/o Python Georradars. A través de él es posible hacer un control de los modos de Georradar, y ajuste de parámetros para condiciones específicas de trabajo; una recepción de datos digitales del Georradar en una carrera de sondeo de radiolocalización, y grabación de estos en archivos de datos en el disco duro del ordenador; la visualización de los datos recibidos; el procesamiento digital de los datos recibidos para extraer las señales útiles y suprimir ruido, interferencias y señales no informativas; la determinación de varios parámetros de la señal, cálculos espectrales y similares; así como, la impresión de los resultados.

En el software mencionado son importados los datos obtenidos en campo, listos para su procesamiento el cual comienza con la transformación de unidades, que pasaran de ser valores de traza a valores de distancia y profundidad. Se aplica el comando **zeroline flattening** que permite que la lectura de valores comience desde la profundidad cero, despreciando a aquellos valores que se encuentran fuera de este rango de inicio, así mismo se emplea la herramienta **cut** con la cual se eliminan las trazas de la parte final de la profundidad en las que no se contengan valores. Con ello se delimita la zona de análisis y se comienza la aplicación de filtros.

Como primer filtrado se ejecuta el **background removal** que como su nombre lo indica permite la eliminación de fondo, siendo el primer paso para la depreciación de datos erróneos. Posteriormente se ejecuta el **Horizontal LP-Filter (Pasa bajas)** que tiene la finalidad eliminar la señal correspondiente al ruido del sitio o ruido externo del radargrama, con un funcionamiento que consiste en un promediado de varias trazas consecutivas y teniendo como la salida del filtro la traza promedio resultante. Continuando con el procesado se efectúa el filtrado **Ormsby bandpass**, filtro que deja pasar un determinado rango de frecuencias de una señal y atenúa el paso del resto. También fue ejecutado el **Horizontal HP-Filter (Pasa altas)** el cual genera un promediado de varias trazas consecutivas, con la salida del filtro, resultando de restar la traza promedio obtenida a la traza central. Por último, se hace una corrección de acuerdo con el comportamiento de cada radargrama, en la **Ganancia** el cual trata de la

amplificación que se introduce a la señal en función del tiempo y de la profundidad. Se utiliza para corregir, por así decirlo, los efectos de disminución de la energía producidos durante la propagación de la señal por el medio. A través de este procesamiento se genera el modelo a partir del cual se efectuará el análisis de señales. Como ya fue mencionado se realizaron seis líneas de estudio, obteniendo doce radargramas.

Para la realización del procesamiento de datos de GPR, se consideró la siguiente metodología:



Metodología del procesamiento de GPR

Capítulo 6: Resultados

6.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica

El modelo del primer tendido (T1) presenta una distribución de las resistividades (rango entre 10 Ωm y 45 Ωm) que va de mayor a menor de la parte central a las zonas laterales. Se determina la existencia de tres zonas que comparten los valores resistivos más importantes.

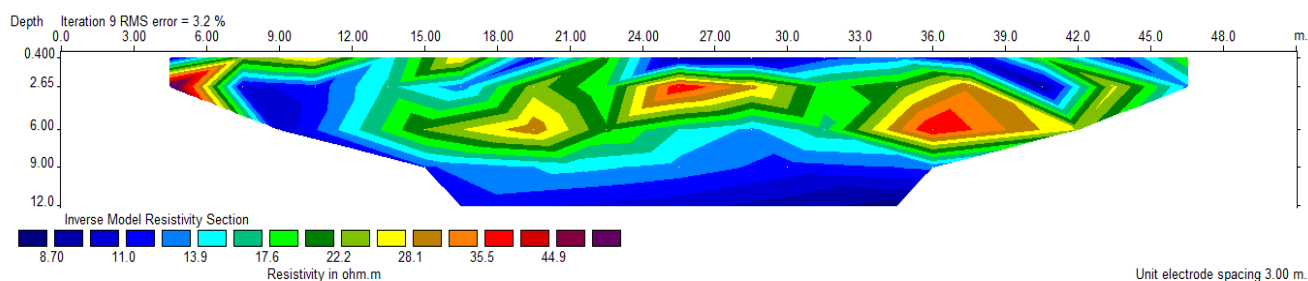


Ilustración 28. Modelo resistivo del tendido T1.

Tabla 9: Zonas resistivas tendido T1

Zonas resistivas tendido T1		
Zonas	Descripción	Características
(Z1) Sedimentos aluviales	Zona compuesta por sedimentos aluviales saturados (limos y arcillas). Conforme aumenta su nivel resistivo se compone por sedimentos no saturados (arenas y gravas a diferentes granulometrías).	Nivel resistivo de: 8 Ωm – 22.2 Ωm Espesor: mayor a 3m Profundidad: variable
(Z2) Gravas de Valsequillo	Zona conformada por el conjunto de rocas denominado “Gravas de Valsequillo (Arenas (distinta granulometría), limos, arcillas, gravas aluviales (distinta granulometría), cenizas volcánicas).	Nivel resistivo de: 23 Ωm – 45 Ωm Espesor: mayor a 3m Profundidad: 3m – 7m aprox.
(Z3) Fósil	se interpreta como la zona con presencia del material fósil (rectificado con la posición de este, in situ), mismo que es albergado por el conjunto de rocas “Gravas de Valsequillo”.	Nivel resistivo de: 25 Ωm – 28 Ωm Espesor: 1m Profundidad: 5m – 6m aprox.

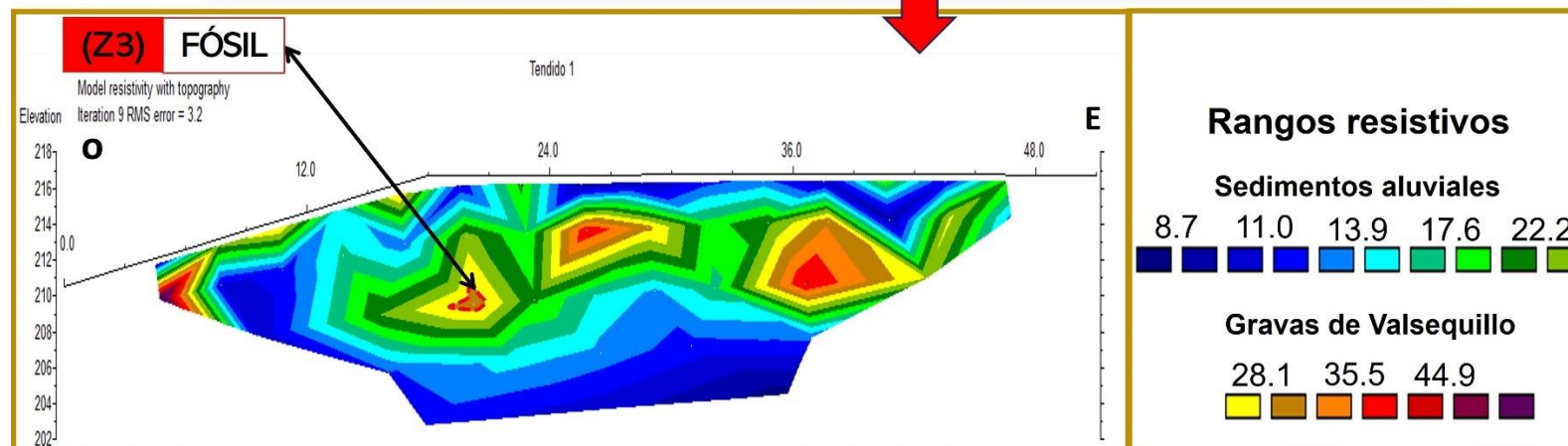


Ilustración 29: Zona de estudio (perspectiva en campo) asociada al modelo resistivo interpretado del tendido T1

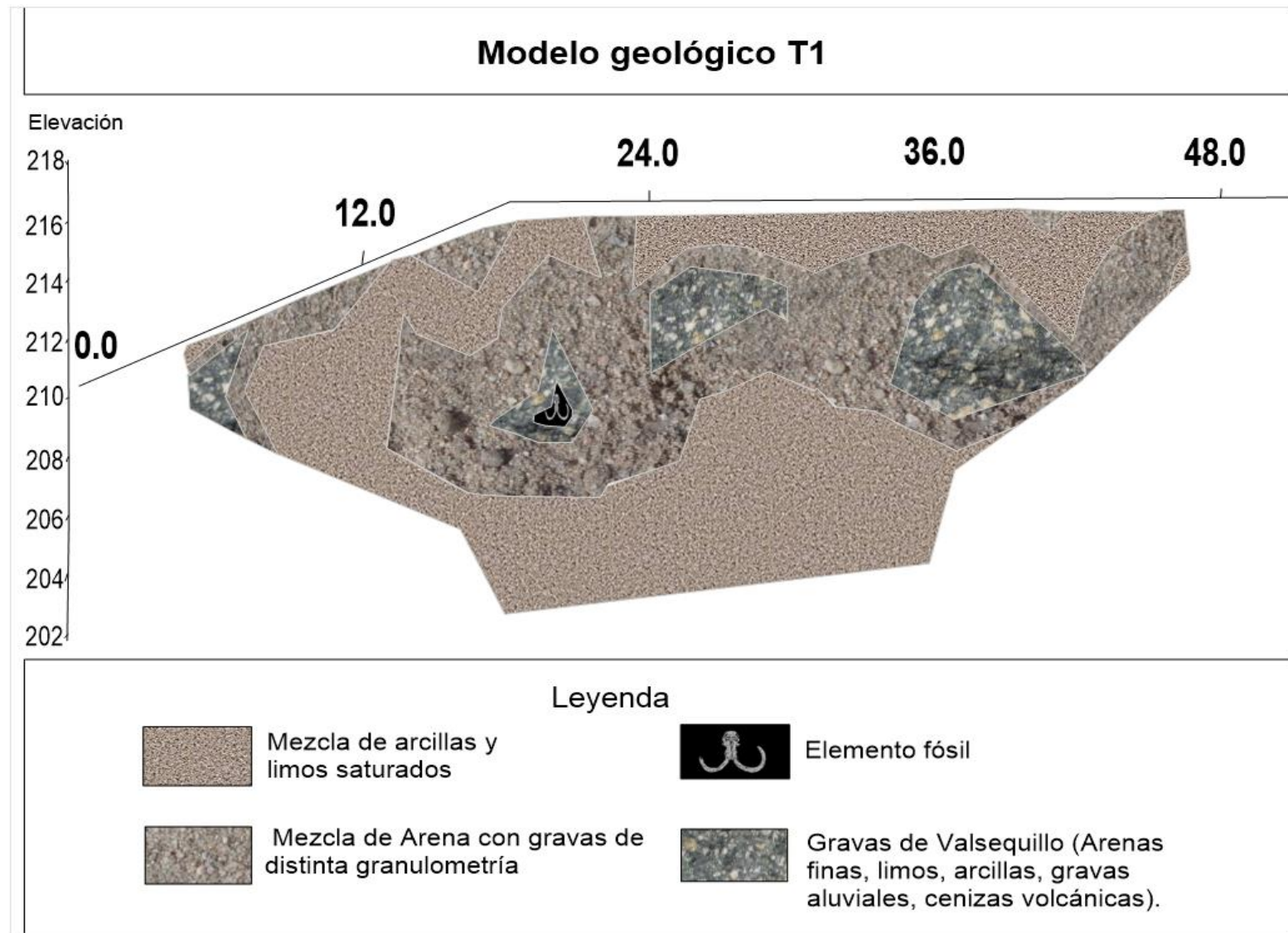


Ilustración 30: Modelo geológico tendido T1

El modelo del segundo tendido (T2) presenta un rango de resistividades entre 10 Ω m y 20 Ω m valores asociados a material rocoso de arcillas, limos saturados, arena, grava y una mezcla de estos.

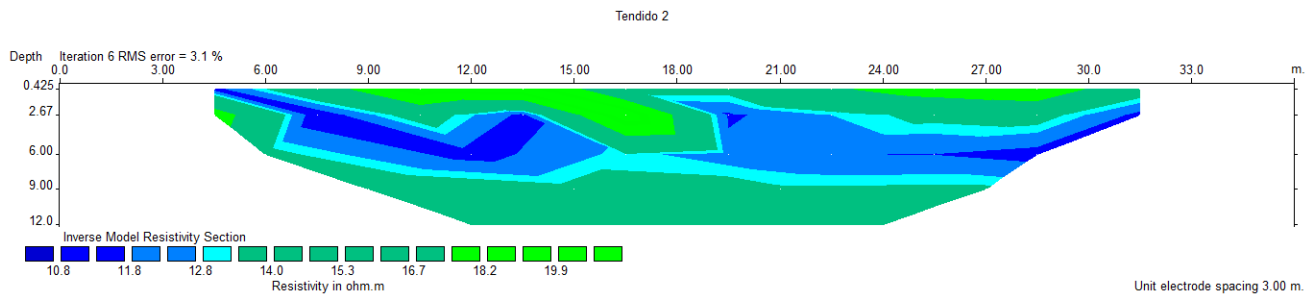


Ilustración 31: Modelo resistivo del tendido T2

En el modelo no se presenta una característica que permita determinar la existencia de material fósil, así mismo, se determina la existencia de una zona con los valores resistivos más importantes.

Tabla 10:Zonas resistivas tendido T1

Zonas resistivas tendido T2		
Zonas	Descripción	Características
(Z1) Sedimentos aluviales	Zona compuesta por sedimentos aluviales saturados (limos y arcillas). Conforme aumenta su nivel resistivo se compone por sedimentos no saturados (arenas y gravas a diferentes granulometrías).	Nivel resistivo de: 10Ωm – 20Ωm Espesor: mayor a 3m Profundidad: variable

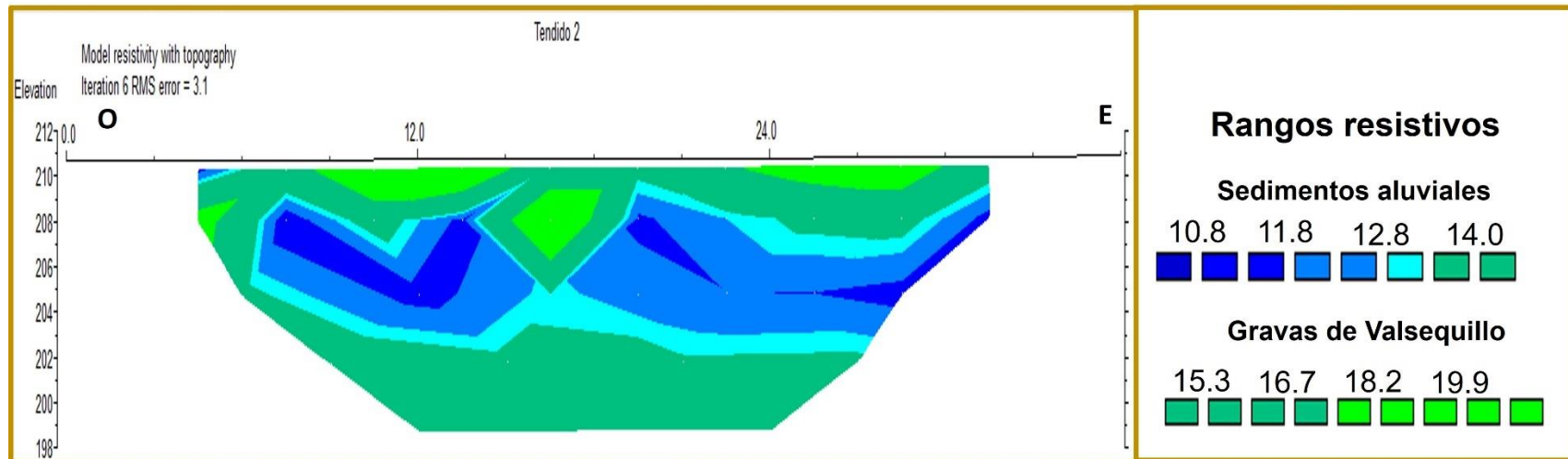


Ilustración 32: Zona de estudio (perspectiva en campo) asociada al modelo resistivo interpretado del tendido T2

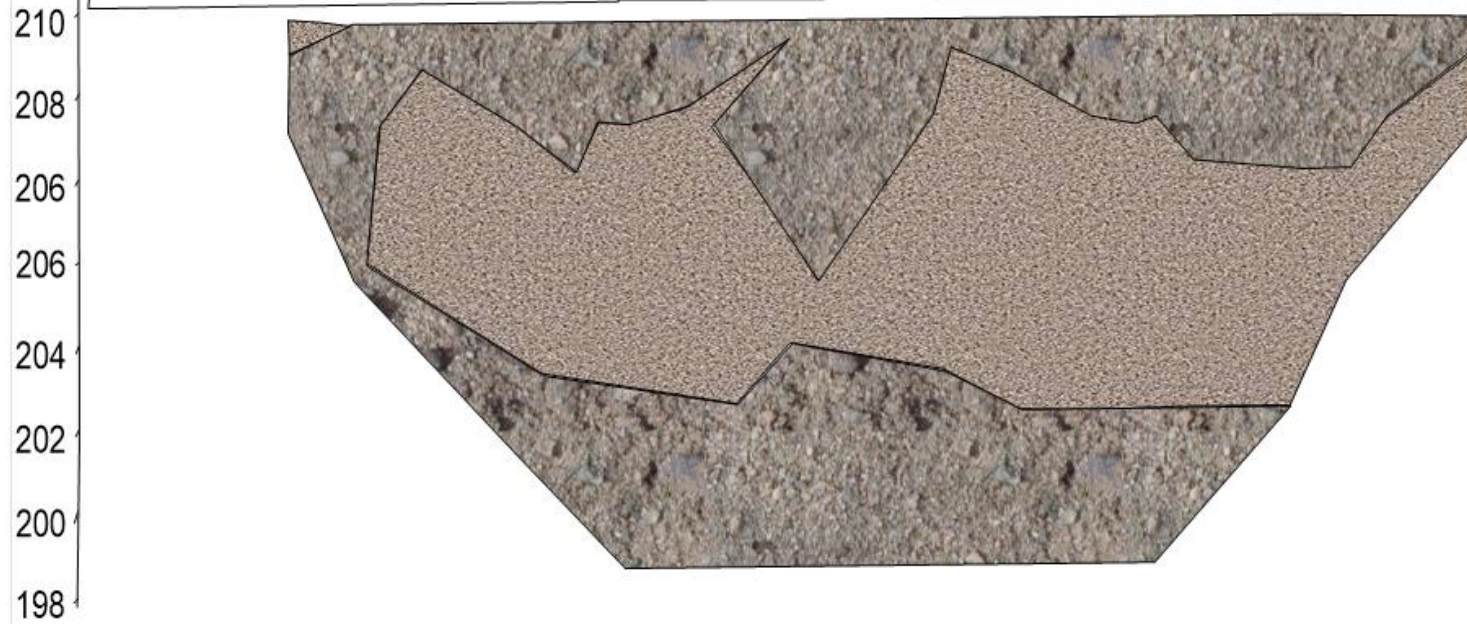
Modelo geológico T2

Elevación

212
0.0

12.0

24.0



Leyenda



Mezcla de arcillas y
limos saturados



Mezcla de Arena con gravas de
distinta granulometría

Ilustración 33:Modelo geológico tendido T

6.2 Radar de Penetración

Posterior al procesamiento se realiza el análisis de los modelos, tratando de identificar alguna presencia anómala en los mismo. Al conocer la posición en la que se encuentra el material y al ser pasado el radar por encima del mismo, se espera tener una respuesta anómala en los radargrama base (L2 y L2B), de no ser así, la aplicación de método sería ineficaz.



Ilustración 34. ubicación de líneas de estudio L2 y L2B.

En la identificación de una anomalía, esta puede ser encontrada a través del contraste de colores o en su defecto, como sucede en la búsqueda de tuberías y otros materiales, la identificación de una forma geometría singular.

Es necesario mencionar que realizaron diversos procesos en el procesamiento de los radargramas, siendo el más eficaz para estos datos, el presentado a continuación. A través de este procesamiento, en el radargrama L2 se identifican dos anomalías asociadas a la presencia de materiales fósiles, esto se logra a través de la visualización de reflectores puntuales con geometría hiperbólica. Es necesario mencionar que, al ser detectado a través de estas formas, se realiza la búsqueda de otras anomalías asociadas a fósiles a través de las mismas formas y con referencia a mismo procesado.

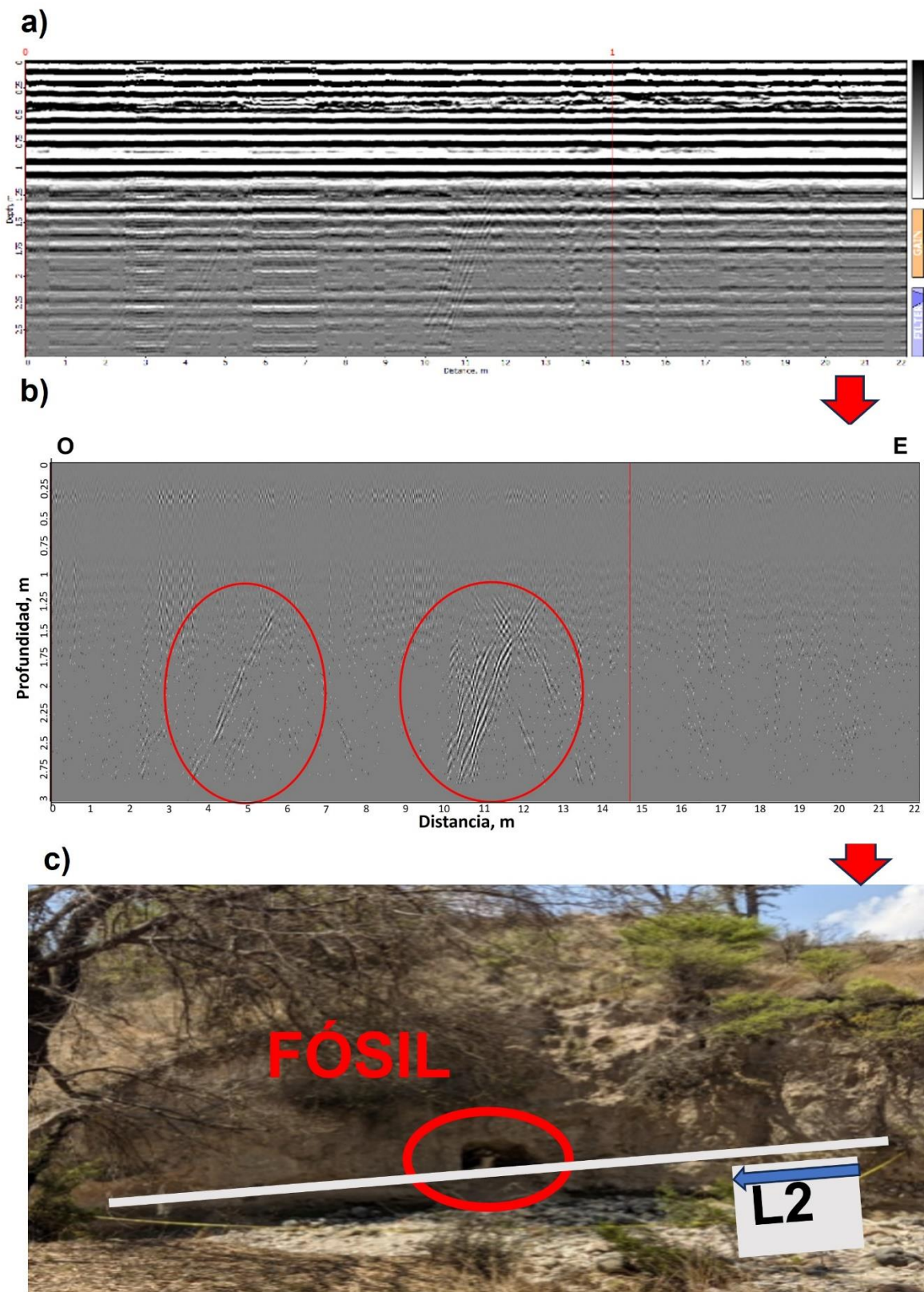


Ilustración 35: Radargrama L2 a) procesado, b) procesado con anomalías detectadas asociadas a material fósil, c) perspectiva en campo

Al ser pasadas las líneas de estudio en dos sentidos, se busca rectificar que se tenga en ambas líneas (L2 y L2B) la presencia de las anomalías en forma hiperbólica.

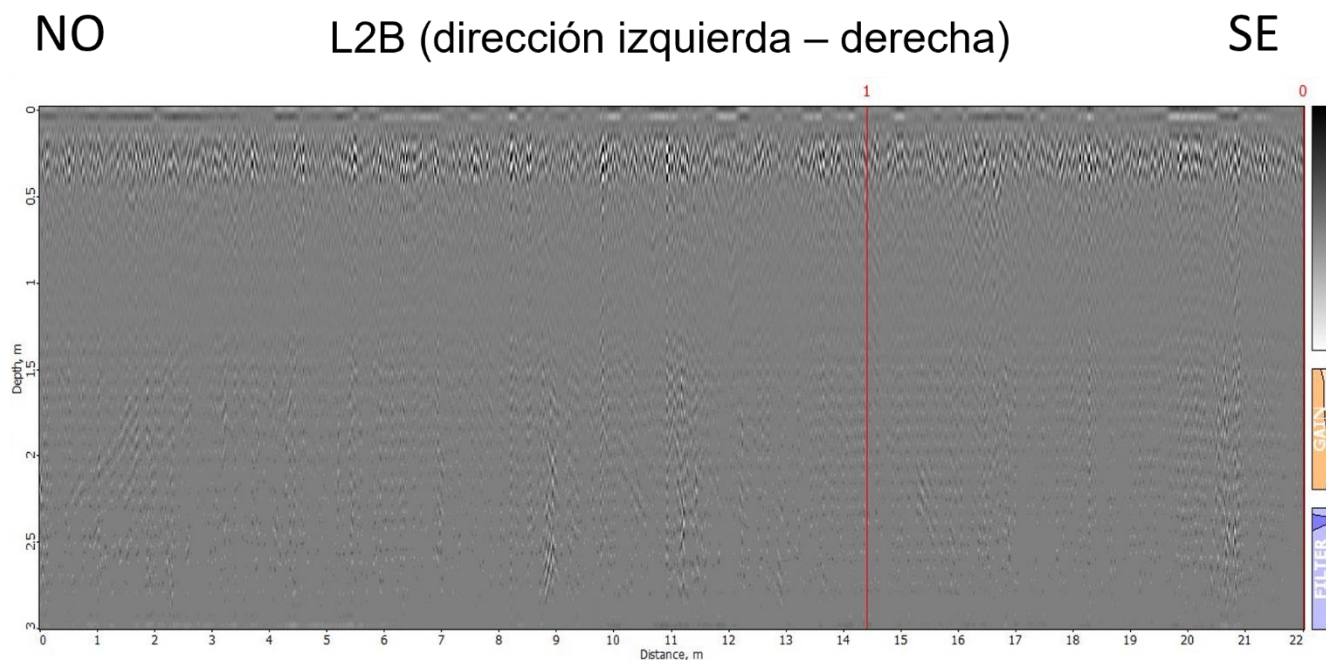
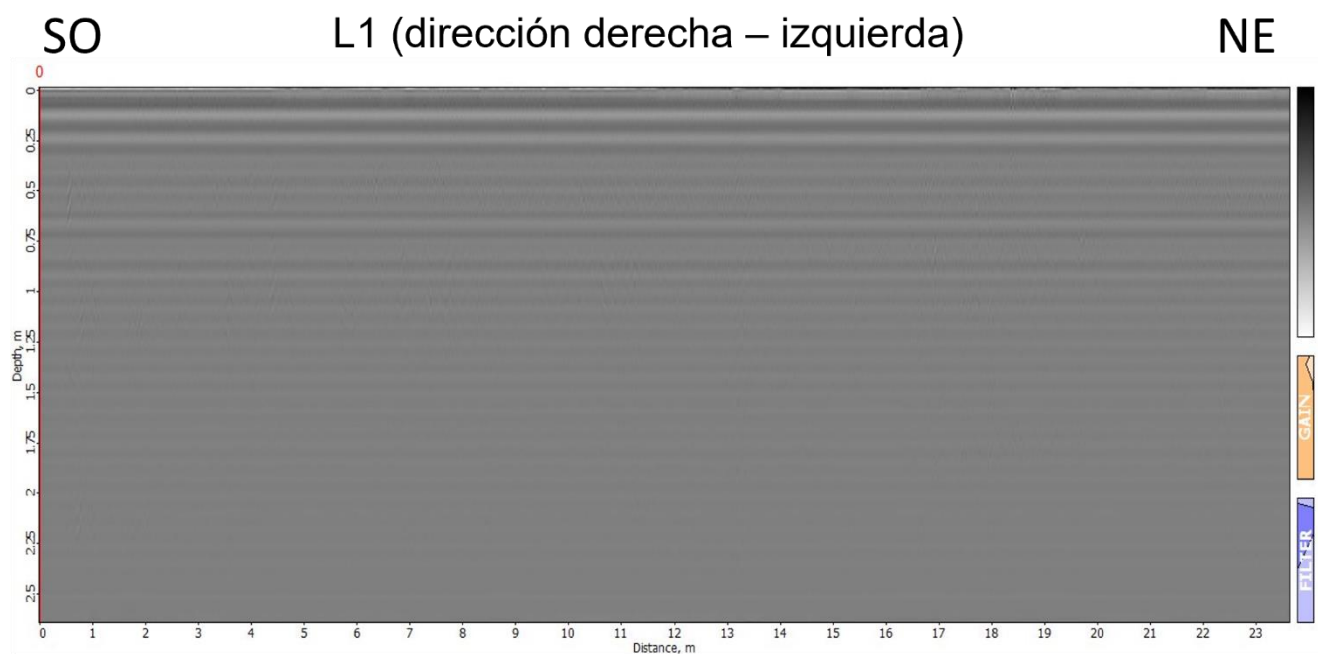


Ilustración 36: Radargrama L2b procesado

El resto de las líneas de estudio (L1, L1B, L3, L3B, L4, L4B, L5, L5B, L6, L6B) no presentaron alguna anomalía significativa que correspondiera a la presencia de material fósil.



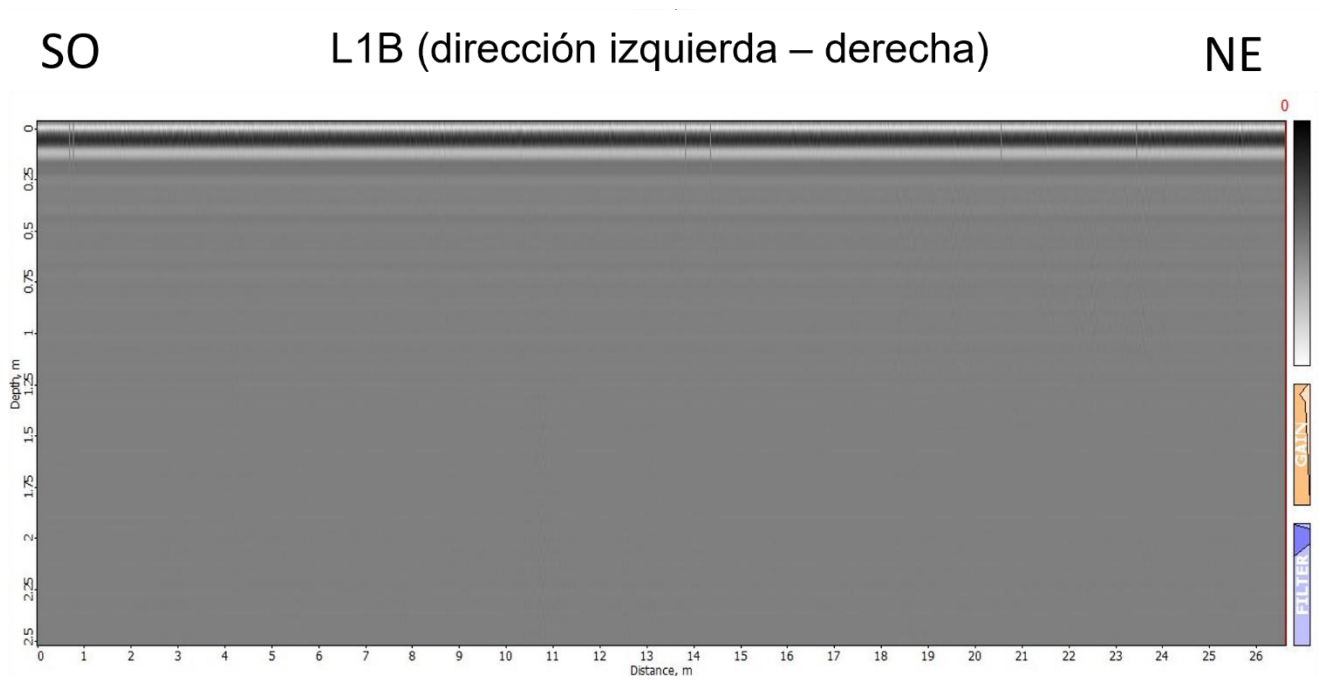
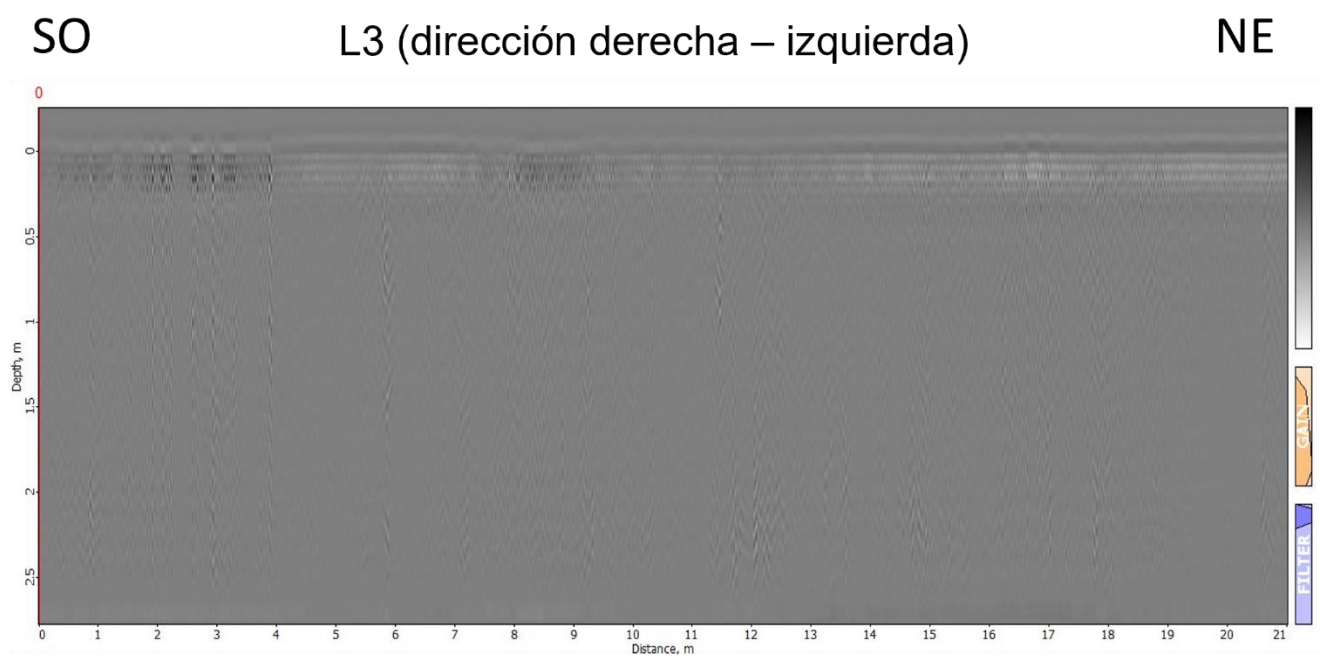


Ilustración 37: Radargramas L1 y L1B procesados.



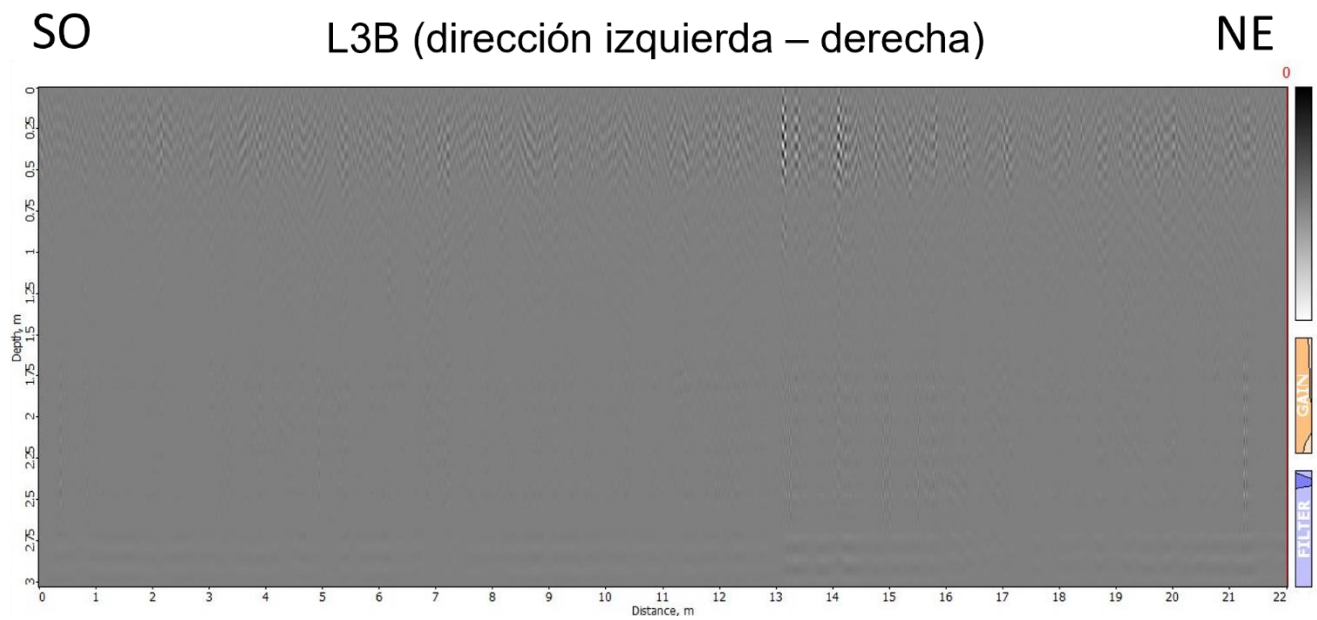
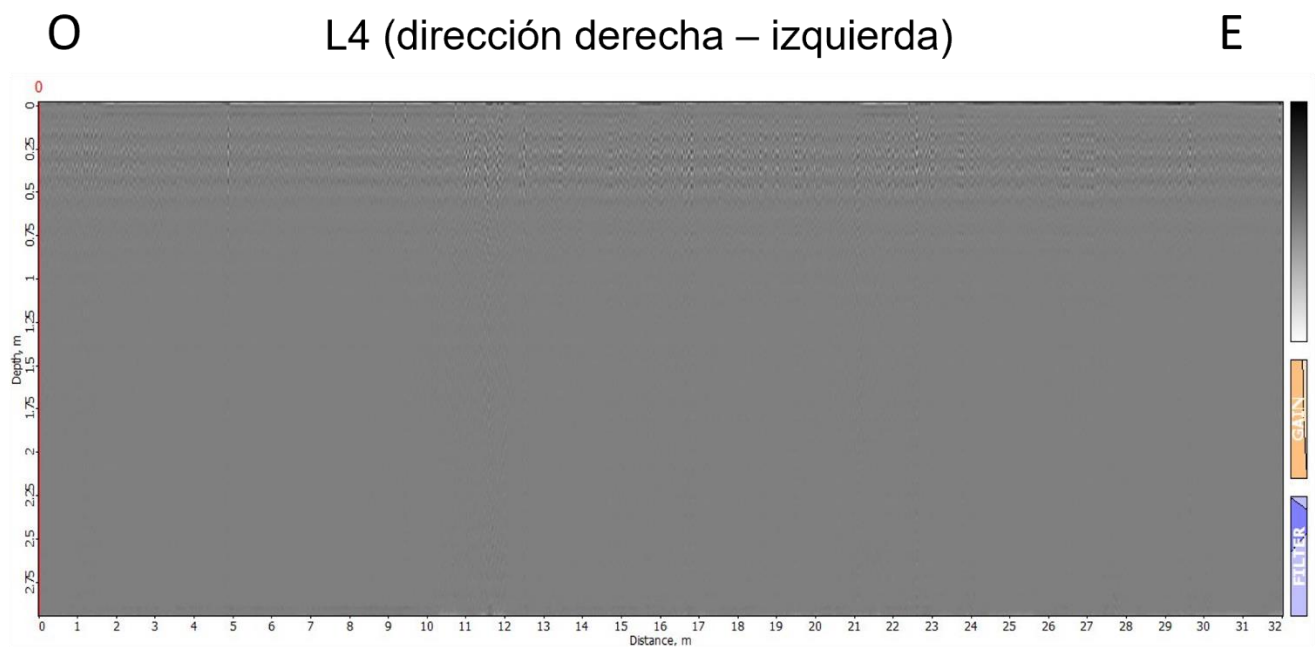


Ilustración 38: Radargramas L3 y L3B procesados



O

L4B (dirección izquierda – derecha)

E

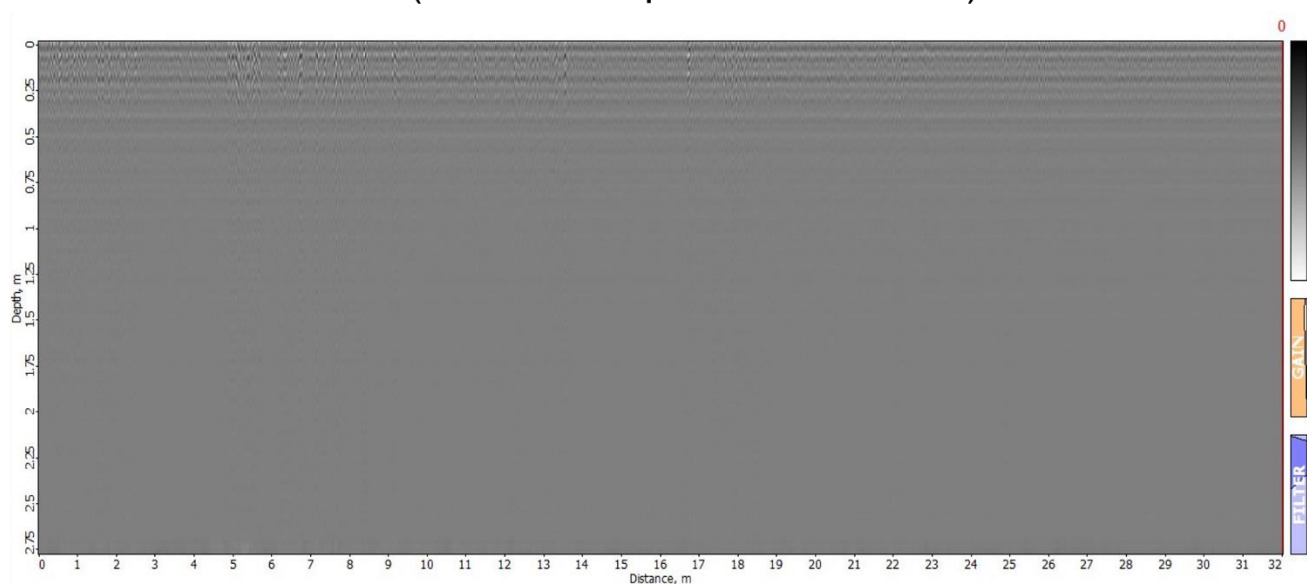
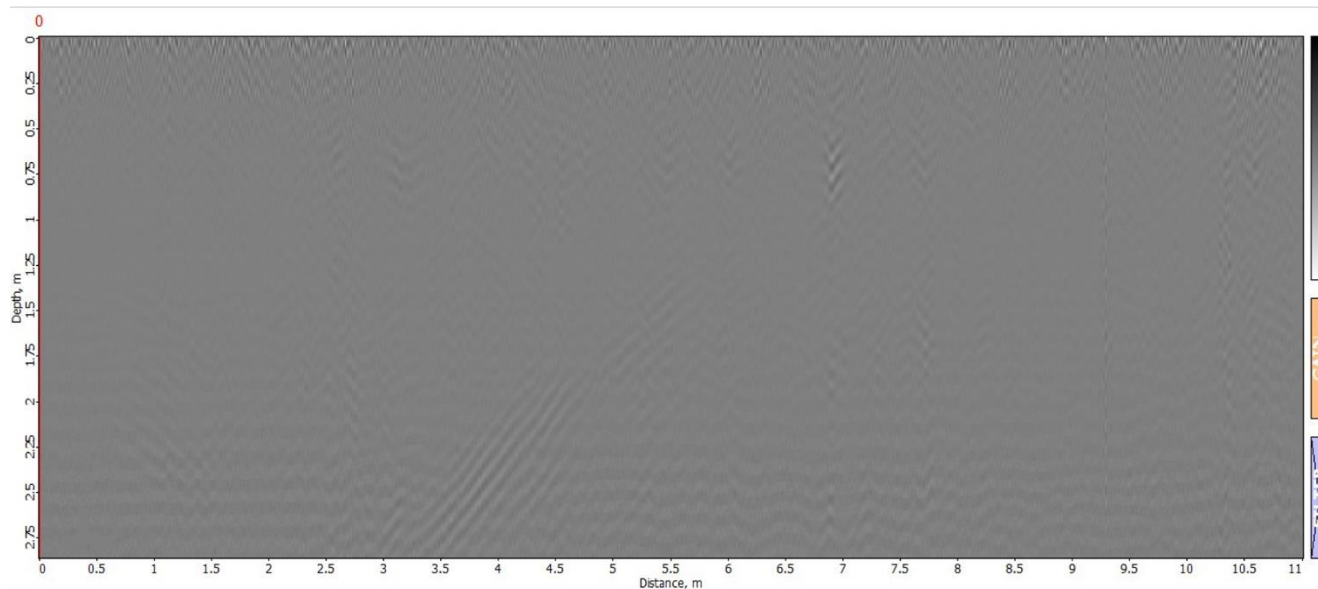


Ilustración 39: Radargramas L4 y L4B procesados

O

L5 (dirección derecha – izquierda)

E



O

L5B (dirección izquierda – derecha)

E

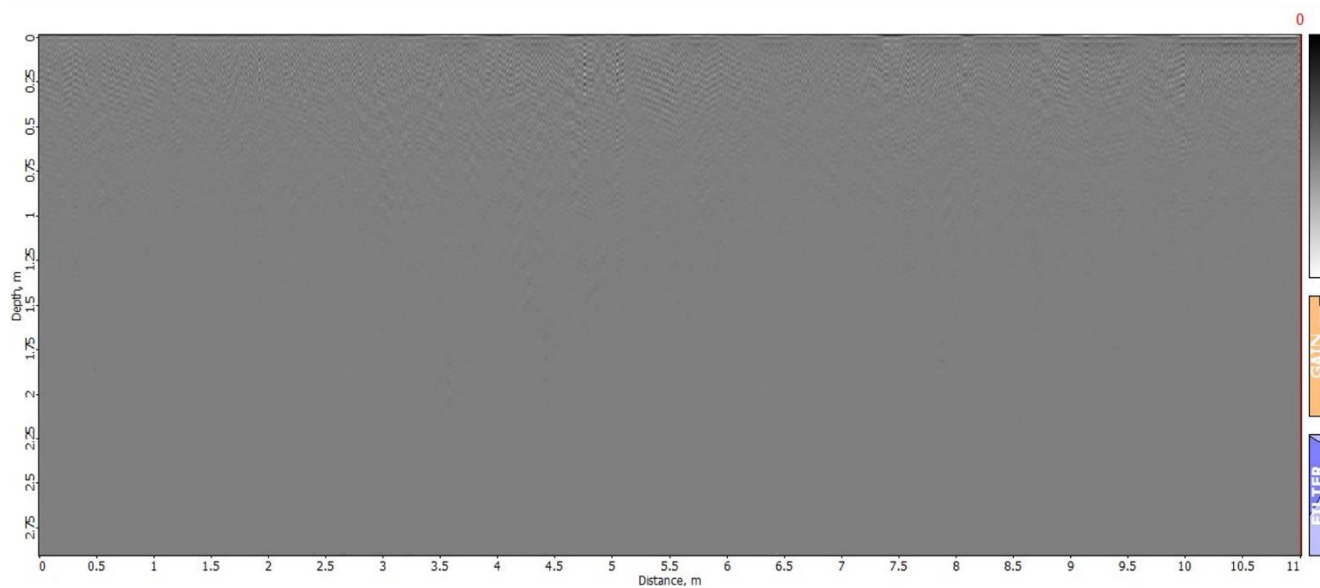
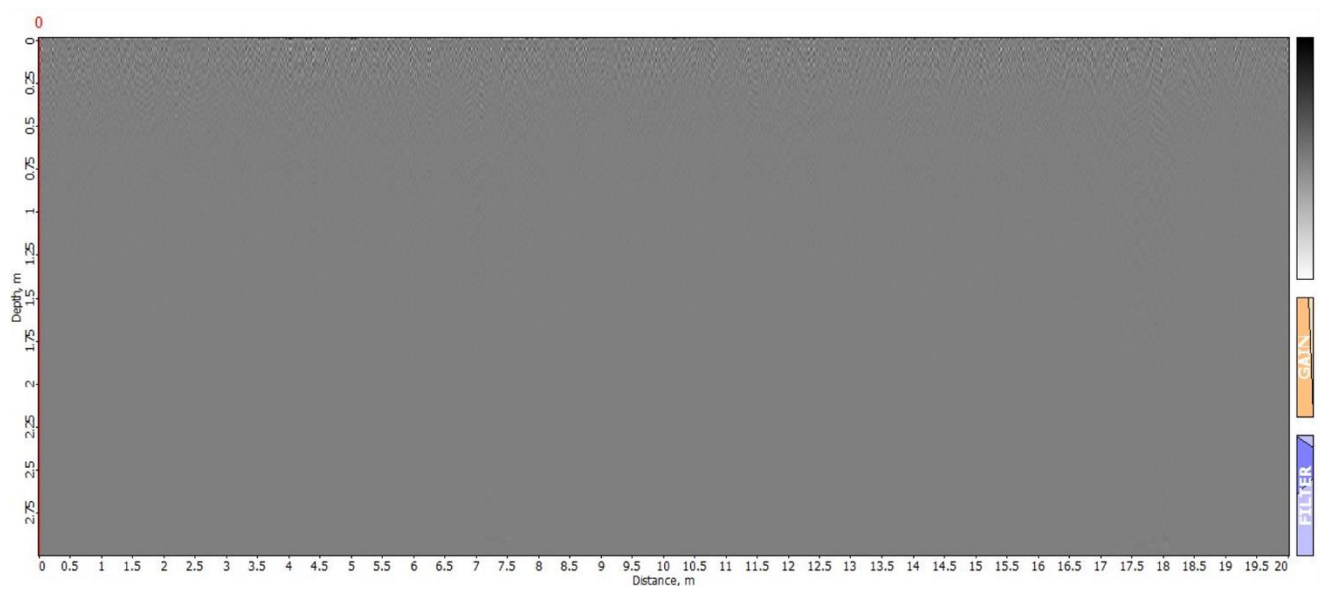


Ilustración 40: Radargramas L5 y L5B procesados

O

L6 (dirección derecha – izquierda)

E



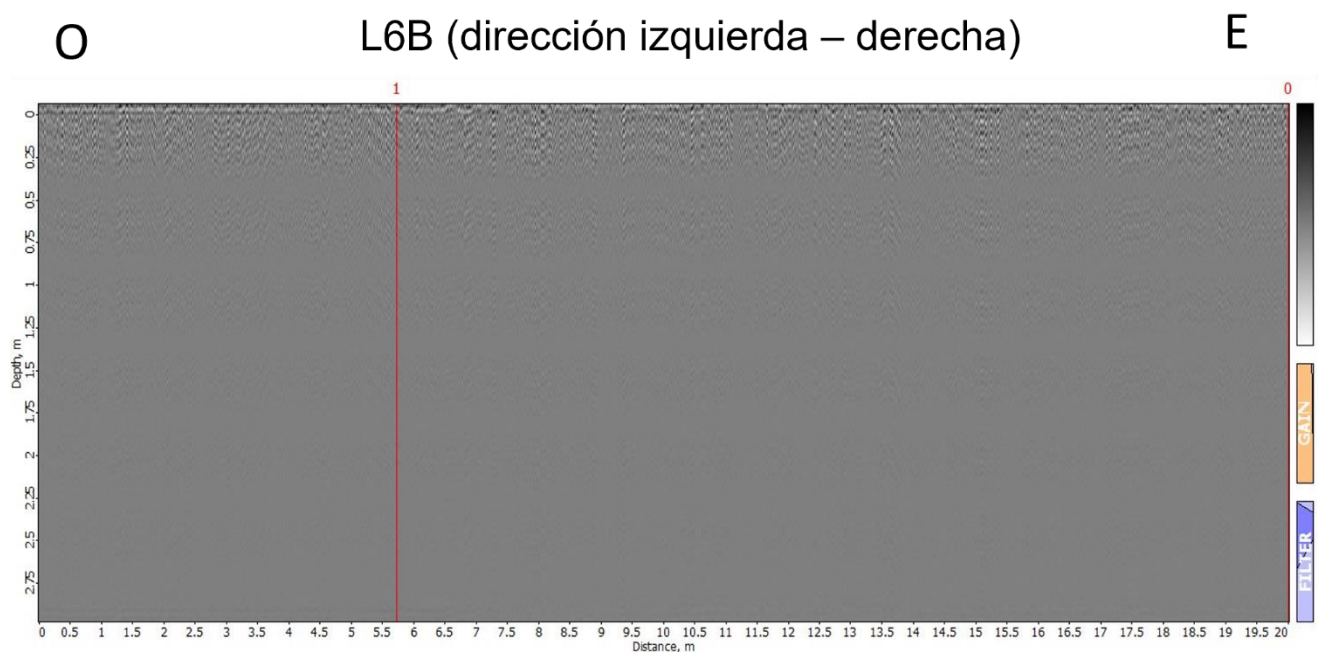


Ilustración 41: Radargramas L6 y L6B procesados

6.3 Análisis estratigráfico y sedimentológico

Es necesario recabar la información estratigráfica de la zona, misma que será comparada con los materiales que se interpretan como presentes en los modelos resistivos. En las labores de campo realizadas para ejecutar la extracción del material fósil, se encontraron con atributos geológicos importantes.

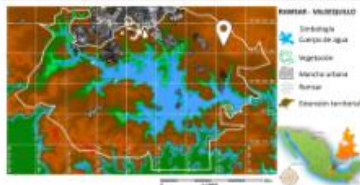
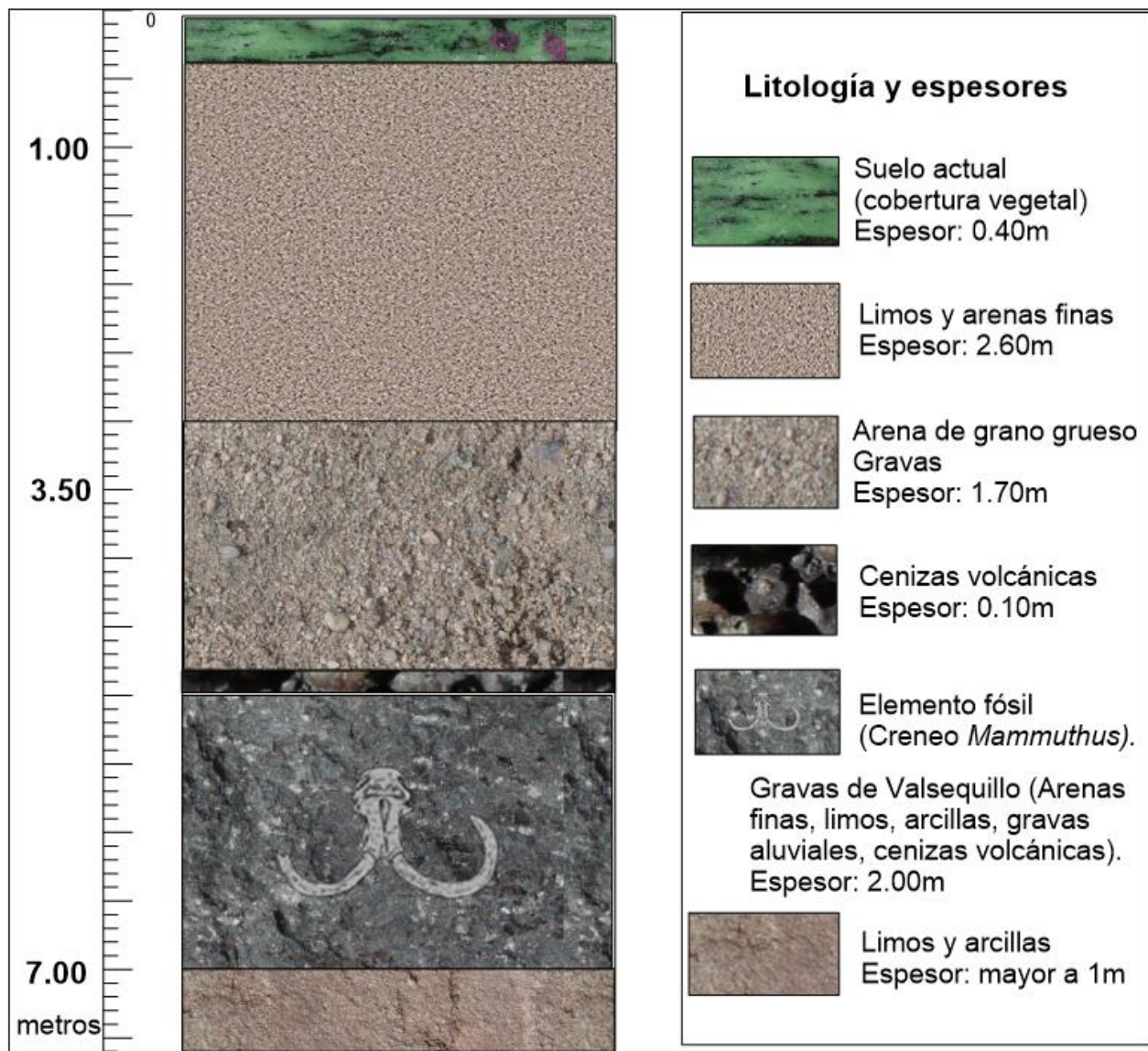
En primera instancia se definió que, limos y arena de grano fino como arenas de grano medio son los sedimentos principales, en donde se encuentran soportados todos los elementos existentes. Conforme se acerca a la presencia del material fósil se obtiene una inclusión de gravas de diversa granulometría. Posteriormente se define la existencia de conglomerados, con clastos del tamaño de grava (> 2 mm).

El descubrimiento geológico principal radica en las rocas que contienen al material fósil, y es que, en ellas se encuentra una conjunción de rocas de diversos tipos. Se identificaron limos, arcillas, arenas de grano fino, arena de grano medio, sedimentos aluviales, gravas, conglomerados y cenizas. Esto representa una complejidad geológica específicamente en esta zona, sin embargo, este conjunto de sedimentos se ha encontrado en otras localidades fosilíferas correspondientes a Valsequillo y descritas anteriormente, por lo que, se interpreta que el conjunto de rocas en el que se almacena el material fósil corresponde a las

denominadas “Gravas de Valsequillo” las cuales están conformadas por sedimentos aluviales, arcillas y grava con marcas de ceniza y lapilli (Malde *et al.*, 2011), asociado a las localidades fosilíferas de: Hueyatenco en donde Malde *et al.*, (2011) reportaron la presencia de artefactos unifaciales, objetos puntiagudos unifaciales y fósiles de diferentes tamaños correspondientes a caballo y camello; El Mirador en donde Solís (2015) reportó la aparición de vértebras de caballo; El Horno y Barranca Caulapan en donde considerando los datos presentados por Gonzales *et al.*, (2006a) se tiene la presencia de fósiles en su mayoría moluscos. Es importante mencionar que si bien diversos autores no mencionan una composición exacta de este conjunto de rocas, se considera entonces la relación entre las unidades geológicas principales (sedimentos aluviales, gravas y marcas ceniza), las localidades fosilíferas y la aparición de material asociado a estas, para determinar que se tiene la presencia de “Gravas de Valsequillo” en la zona de estudio.

ESTRATIGRAFÍA

Zona de estudio: "La Taza", Santo Tomás Chautla, Puebla.



Coordenadas:
18,953952 N, -98,134768 W

Ilustración 42: Estratigrafía de la zona de estudio "La Taza" Santo Tomás Chautla, Puebla

Discusión

Posterior a la aplicación de los métodos geofísicos se inició el proceso de excavación, con la finalidad de rescatar el material encontrado. Como ya fue mencionado, las prospecciones se realizaron sobre una columna estratigráfica con un material expuesto y de gran tamaño, por lo que, fue posible detectarlo en ambos métodos. Sin embargo, en el proceso de extracción, se identificaron muestras de menor tamaño cercanas al material de mayor volumen, en consecuencia, los métodos no arrojaron respuesta de la presencia del material pequeño. Esto se infiere en que, si bien ambos métodos son aplicables, la eficiencia en la búsqueda de material pequeño puede verse afectada por condiciones inadecuadas en la ejecución de las prospecciones, por ello, se sugiere la aplicación de los mismos métodos en condiciones distintas, en primera instancia los arreglos deben ser aplicados teniendo como objetivo prioritario obtener datos con una resolución mayor, así como, aplicarlos en condiciones topográficas que permitan establecer tendidos con trayectorias largas y mayor dimensión. Mencionado lo anterior se sugiere la aplicación de los mismos métodos tanto en el Ramsar-Valsequillo como en una zona externa, para comparar las características resistivas y geológicas obtenidas en este trabajo de investigación.

Determinar o inferir un posible escenario geológico, climático y ecológico posterior a los estudios geofísicos y de campo, resulta complicado debido a que, la composición de sedimentos (“Gravas de Valsequillo”) encontradas in situ es compleja, presentan características que no son propias de rocas sedimentarias comunes o transportadas por un cuerpo de agua, e incluso algunas contienen materiales ajenos a su origen. Considerando las características geológicas mencionadas se sugiere realizar estudios con un enfoque geológico, es decir, analizar las propiedades, distribución y datación de las “Gravas de Valsequillo”. Con ello se obtendrá información que permita relacionar la aparición de materiales fósiles con un grupo de rocas en específico.

• Conclusión

La aplicación de ambos métodos generó conocimiento acerca de la posición y dimensiones aparentes del material, siendo significativas para el proceso de extracción de este, sin embargo, es necesario mencionar algunas características de suma importancia.

Se aplicaron dos tendidos de TRE, el primero se realizó en la zona en la que predominaba expuesto parte de material fósil, el segundo se tomó a unos metros de distancia, mismo que no presentó alguna característica que indique o represente material fósil in situ, sin embargo, se obtuvo información que es de importancia para conocer la configuración geológica de la zona. Para el caso del primer tendido se obtuvo una respuesta visual distinguible del material, así como el conjunto de unidades estratigráficas principales. Gracias a esta respuesta se infiere la posición y dimensión aparente del material.

Con la aplicación del método TRE se obtuvo que tanto para el tendido uno y dos, la composición general de las rocas se trata de arena y gravas, con variación en su granulometría. Para el tendido uno se tuvo una respuesta con mayores cambios resistivos indicando una variación mayor en la composición de las rocas, incorporando limos y arcillas saturadas en agua.

A través del estudio litoestratigráfico realizado en campo, se determinó que el conjunto de rocas asociado al material fósil se trata de un conglomerado de gran tamaño con presencia de arcillas, gravas, arena, limos, cantos rodados y marcas de ceniza. Esto representa una complejidad geológica específicamente en esta zona, mismo que se ha encontrado en otras localidades fosilíferas correspondientes a Valsequillo y descritas anteriormente, por lo que, se interpreta que el conjunto de rocas en el que se almacena el material fósil corresponde a las denominadas “Gravas de Valsequillo”, mismas que González *et al.*, (2006a) y Szabo *et al.*, (1969) confirmaron datan de 38,900 a 9,150 años.

La aplicación del método TRE en este trabajo da a conocer que las condiciones resistivas para las unidades principales en la zona de “La Taza” en Santo Tomás Chautla, Puebla, perteneciente al Ramsar-Valsequillo son: “Fósil” con un rango resistivo de 25Ωm – 28Ωm; “Gravas de Valsequillo” con un rango resistivo de 23Ωm – 45Ωm, sin embargo, estos datos deben ser verificados para cada caso en particular, recordando que la configuración

geológica de la zona y en especial el tipo de rocas que alberguen al material, tendrán un impacto importante en este análisis.

Los radargramas L2 y L2B correspondientes a el método GPR se pasaron por encima del material fósil para conocer el comportamiento del modelo ante la presencia de este material. Por esta razón se plantea una metodología propia para el procesamiento de datos electromagnéticos, mismo que arrojó una respuesta eficaz debido a que, fue posible la detección de dos anomalías a través de la visualización de reflectores puntuales. Esta interpretación, así como, la metodología del procesamiento debe ser verificado para cada caso en particular, recordando que la configuración geológica de la zona, la topografía y posición del material in situ, tendrán un impacto importante en los datos visualizados a través del radargrama. Para este mismo método se aplicaron otras 5 líneas de estudio (L1, L1B, L3, L3B, L4, L4B, L5, L5B, L6, L6B), sin embargo, no fue detectada alguna anomalía que fuese asociada a material fósil. Esto se atribuye en gran parte a el hecho de que, el sitio contaba con una topografía compleja, por lo que, al aplicar el método con una antena de poco alcance fue complicado obtener una respuesta convincente y similar a los radargramas base (L2 y L2B).

La integración y aplicación de métodos geofísicos en la paleontología resulta ser una alternativa eficiente, que permite evolucionar la búsqueda de material paleontológico, representando beneficios en cuanto a la no destrucción de suelo no relacionado con el material fósil, mayores espacios de terrenos analizados y datos que permiten interpretar la distribución aparente de material fósil. A través de esto, se hace conciencia acerca de la aplicabilidad de la geofísica y, se re acredita su importancia y valor en otras áreas científicas.

Bibliografía

A

Aguilar Sosa S., 2013. Vegetación en Biodiversidad del Municipio de Puebla. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Puebla, México.

Álvarez Manilla Aceves Alfonso, 2003. Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Secretaria de comunicaciones y transportes. Querétaro, México.

Antón S.C., & Swisher C.C., 2004. Early dispersal of Homo from Africa. *Annu. Rev. Anthropol.* DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.33.070203.144024>.

Aracil E., Maruri U., Vallés J., Martínez Pagán P., & Porres J., 2003. Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica. *Ingeopres.* Madrid, España. Entorno Gráfico Vol. 122, p. 34-39. ISSN: 1136-4785.

Armenta Camacho J., 1978. Vestigios de labor humana en huesos de animales extintos de Valsequillo, Puebla, México. Consejo Editorial del Gobierno del Estado de Puebla. Puebla, México.

Arroyo Cabrales J., Polaco O.J., Johnson E. & Guzmán A.F., 2003. The distribution of the genus *Mammuthus* in Mexico: Reumer J.W.F., De Vos, J. & Mol, D. (eds.). *Advances in mammoth research (Proceedings of the Second International Mammoth Conference, Rotterdam, 1999)*. *DEINSEA* 9: 27-39 [ISSN 0923-9308].

Ayala C. David, 2009. Caracterización de tuberías enterradas para redes de abastecimiento en servicio mediante el análisis de imágenes obtenidas con radar de subsuelo (Ground Penetrating Radar – GPR). Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia, España.

B

Bell C. J., Lundelius L., Barnosky D., Graham W., Lindsay H., Ruez Jr., & Zakrzewsky R. J., 2004. The Blancan, Irvingtonian and Rancholabrean Mammal Ages. In M. O. Woodburne (Ed.), *Late Cretaceous and Cenozoic mammals of North America: Biostratigraphy and Geochronology* (pp. 232-314). Columbia University Press. New York, USA.

Bennett M.R., Harris J.W.K., Richmond B.G., Braun D.R., Mbua E., Kiura P., Olago D., Kibunjia M., Omuombo C., Behrensmeyer A.K., Huddart D., & González S., 2009a. Early hominin foot morphology based on 1.5 million yearold footprints from Ileret, Kenya. *Science* 323, 1197e1201. DOI:10.1126/science.1168132.

Berge C., Penin X., & Pellé É, 2006. New interpretation of Laetoli footprints using an experimental approach and procrustes analysis: preliminary results. *C.R. Palevol.* 5, 561e569. DOI: 10.1016/J.CRPV.2005.09.001.

Blancas Jorge, Barba L. y Ortiz A., 2015. Estudios geofísicos de un mamut encontrado en contexto volcánico. Laboratorio de Prospección Arqueológica IIA-UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México.

C

Cande S.C., and Kent D. V., 1995, Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic: *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, V. 100, p. 6093–6095, DOI:10.1029/94JB03098.

Carrasco García Pedro, 2013. Avance en técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial, Tesis doctoral Universidad de Salamanca. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Programa de doctorado: Investigación y Desarrollo en Geotecnologías: Departamento de Ingeniería Cartografía y del Terreno. Salamanca, España.

Castro Soto Cesar D., 2015. Caracterización geoeléctrica del sitio de disposición final. Prados de la Montaña, Ciudad de México. Tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Ciudad de México, México.

CIEMAD, 2011. Programa parcial de desarrollo urbano sustentable de Valsequillo y su zona de Influencia. Versión Ejecutiva. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Puebla, México.

Coates Richard. 2016. Geofísica. Serie de artículos introductorios. Schlumberger. *Oilfield Review* 28, no.2.

Contreras M. 2015. Descripción de mamíferos Pleistocénicos de la cuenca de Valsequillo y Cuatinchan Puebla, México. Tesis que para obtener el título de Bióloga. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Escuela de Biología. Puebla, México.

Conyers L. B. 2018. En *Ground-penetrating Radar and Magnetometry for Buried Landscape Analysis* (pp. 17-23). Denver: Springer.

Cruz Muñoz V. J., Arroyo Cabrales & Graham, R. W., 2009. Rodents and lagomorphs (Mammalia) from the Late-Pleistocene deposits at Valsequillo, Puebla, México. *Current Research in the Pleistocene*. Núm. 26, Pp.147-149.

D

De Groot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.

Duller G.A.T., 2006. Comment on “Human footprints in central Mexico older than 40,000 years” by S. González D., Huddart M.R., Bennett & Gonzalez H. A. *Quaternary Science Reviews*, v. 25, p. 3074–3076, DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.06.001.

F

Feinberg M., Renne R. Waters J. Arroyo Cabrales P., Ochoa Castillo, & M. Perez Campa, 2007. Age of the Xalnene Ash, Central Mexico: A rock magnetic perspective. Age constraints on alleged “footprints” preserved in the Xalnene Tuff near Puebla, Mexico. *Eos Trans. AGU, Joint Assembly*, Abstract GP24A-07. The Geological Society of America. USA. DOI:10.1130/G24913A.1.

Flores Salgado Jorge L., 2019. Estudio de la estructura somera en el municipio de Cerro de San Pedro por medio del uso de métodos geofísicos. Tesis para obtener el grado de Maestro en Geociencias Aplicadas. Posgrado en Geociencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis Potosí. México.

Friedli H., Lötscher H., Oeschger H., Siegenthaler J., & Stauffer B., 1986. Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature* 324, 237–238. DOI: <https://doi.org/10.1038/324237a0>.

Fujita H., M. Duarte & Bate L. F., 2006. Una probable ocupación desde el Pleistoceno en la Covacha Babisuri, Isla Espíritu Santo, Baja California Sur, México. El hombre temprano en América, CONACULTA-INAH, pp. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.1186/BF03352900>.

G

Gabarrón Sánchez María, 2013. Evaluación de la técnica de Tomografía eléctrica para la estimación de propiedades fisicoquímicas de residuos mineros. Trabajo final de Master. Universidad Politécnica de Cartagena. Master en Ingeniería del Agua y el Terreno. Colombia.

Gascón Eva, 2007. Geo-Radar: Una nueva visión en la arqueología. AKROS. Ciudad Autónoma de Melilla, España.

Geotomo, 2010. RES2DINV ver 3.59. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Geotomo software. Malaysia.

Goodfriend G.A., Magaritz M., & Gat J.R., 1989. Stable isotope composition of land snail body-water and its relation to environmental waters and shell carbonate. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, 3215–3221. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90102-6).

González Rivera Daniel, 2010. La exploración magnética aérea en la prospección de yacimiento de oro y plata: caso Peña de Bernal, Querétaro. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias Aplicadas. Posgrado en Ciencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis Potosí. México.

González S., Huddart D., Bennett R., & González A., 2006a. Human footprints in Central Mexico older than 40,000 years. *Quaternary Science Reviews* 25, 201–222. Puebla, México. DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.10.004.

González S., Huddart D. & Bennett M., 2006b. Valsequillo Pleistocene archaeology and dating: ongoing controversy in central Mexico. Puebla, México. *World Archaeology*, Núm.38. Vol.4, Pp. 611-627. DOI: <https://doi.org/10.1080/00438240600963155>.

Guenther E. Bunde H. & Nobis G., 1973. Geologische und paläontologische Untersuchungen im Valsequillo bei Puebla, México. *Investigaciones geológicas y paleontológicas en Valsequillo cerca de Puebla, México. Serie: Mexiko-Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft*; 6. Publicerad: Wiesbaden: Steiner. LIBRIS-ID: lx7dldb5jn37jt2v.

Goguitchaichvili A., et al., 2009. Paleomagnetic and rock-magnetic study on volcanic units of the Valsequillo Basin: implications for early human occupation in central Mexico. Puebla, México. *Earth Planets Space*, 61, 205–211.

Griffiths D.H. and Barker R.D. 1993, Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.

Guillou H., Singer B. S., Laj C., Kissel C., Scaillet S., & Jicha B. R., 2004. On the age of the Laschamp geomagnetic excursion, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 227, 331–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.018>.

H

H. Ayuntamiento Puebla, 2016. Programa Municipal de Desarrollo Urbano Sustentable de Puebla. Tomo número 1. Periódico Oficial del Estado de Puebla. Puebla, México.

Hernández Edgar Alonso, 2016. Estudio geofísico de resistividad electromagnética para definir las características geohidrológicas del acuífero Apan en un predio delimitado. Trabajo profesional para presentar el título de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Ciudad de México, México.

Huang Y., Street Perrott F.A., Metcalfe S.E., Brenner M., Moreland M., & Freeman K.H., 2001. Climate change as the dominant control on glacial–interglacial variation on C3 and C4 plant abundance. *Science* 293, 1647–1651. DOI: <http://www.jstor.org/stable/3084622>.

I

INEGI., 1987. Síntesis geográfica; nomenclatura y anexo cartográfico del estado de Puebla, México. Pp. 2-56. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

INEGI., 2007. Principales grupos de suelos en México. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250000. Serie II (Continuo Nacional). México.

INEGI., 2007b. Superficie relativa de los principales grupos de suelo en México. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250000. Serie II (Continuo Nacional). México.

Irwin Williams C., 1978. Summary of archaeological evidence from the Valsequillo region, Puebla, Mexico, p. 7-22. In Browman, D.L. (ed.), Cultural Continuity in Mesoamerica, Mouton, London, UK.

Irwin Williams C., 1962. Informe preliminar de investigaciones en la región del embalse de Valsequillo, Informe presentado al Departamento de Prehistoria. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.

J

Jiménez Moreno F. J., 2017. Propuesta de conservación del sitio Ramsar – Valsequillo a partir del estudio de megafauna del Pleistoceno. Tesis para grado de Maestro en Ciencias Ambientales. Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.

Jiménez Moreno F. J., 2017. Edafología de Valsequillo. Elaborado en ARCGis 10.3. Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.

L

Lagunas Rodríguez Z., Carbot Chanona G., & Jiménez Moreno F. J., 2019. Distribución de *Mammuthus columbi* (Mammalia, Proboscidea) en el Pleistoceno tardío de Puebla, México. CIENCIA ergo-sum, 26(2). DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v26n2a7>.

Larrotta M. Lorena., 2020. Aplicación del GPR (Ground Penetrating Radar) con fines paleontológicos, en la vereda salto y la lavandera, Villa de Leyva, Colombia. Proyecto de grado. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Leyva Pablo Tania, 2015. Emisiones de CO₂ y propiedades bioquímicas en suelos bajo diferentes cubiertas vegetales en la zona de conservación del Distrito Federal. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca. Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Protección y Producción Vegetal. Oaxaca, México.

Loke M., 2012. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. <http://www.geoelectrical.com>

Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996a, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152

Lugo E., Playà E. & Rivero LI., 2008. Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección de formaciones evaporíticas. *GEOGACETA*, 44, 223 – 226.

M

Malde Harold E., Steen McIntyre V., Naeser W., Van L., & Sam L., 2011. The stratigraphic debate at Hueyatenco, Valsequillo, Mexico. *Palaeontologia Electronica* Vol. 14, Issue 3; 44A:26p; Recuperado de: palaeo-electronica.org/2011_3/27_malde/index.html.

Malde Harold E., 1968. Preliminary draft on the stratigraphy of Valsequillo region (except valsequillo gravel, volcanic ash stratigraphy, etc.). Submitted to the U.S. Geological survey records library, Denver, Colorado, pp. 1–157.

Mangas Ramírez E., Sánchez H., Molina M., García I., Muñoz L. & Zumaquero R., 2008. Análisis de las Políticas de rehabilitación de presas: el caso de la “presa de Valsequillo” en el estado de Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Escuela de Biología. Puebla, México.

Mark Darren F., Gonzales S., Huddart D. & Bohneld H., 2010. Dating of the Valsequillo volcanic deposits: Resolution of an ongoing archaeological controversy in Central Mexico. *Journal of Human Evolution* 58, 441e445. DOI: 10.1016/j.jhevol.2010.02.009.

Martinez Pagán P., 2006. Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la Región de Murcia. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia.

McDougall I., Polach H.A., & Stipp J.J., 1969. Excess radiogenic argon in Young subaerial basalts from the Auckland volcanic field, New Zealand. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33, 1485e1520. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(69\)90152-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(69)90152-5).

Mochales López Tania, 2006. Prospección magnética aplicada a la detección y caracterización de dolinas en el entorno de Zaragoza. Facultad de Ciencias. Departamento de Ciencias de la Tierra. Área de Geodinámica Interna. Universidad de Zaragoza. España.

Morse S.A., Bennett M., González S., & Hudart D., 2010, Techniques for verifying human footprints: reappraisal of pre-Clovis footprints in Central Mexico. *Quaternary Science Reviews*, 29, 2571-2578. DOI: 10.1016/j.quascirev.2010.03.012.

N

Nier A.O., 1950. A redetermination of the relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon, and potassium. *Phys. Rev.* 77, 789e793. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.77.789>.

Noguera Urbano E. A., 2017. Endemismo: diferenciación del término, métodos y aplicaciones. *Acta Zoológica Mexicana*. ISSN 2448-8445. SCIELO. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372017000100089.

O

Ochoa Tinajero Luis E., 2016. Inversión e interpretación 2D y 3D de datos de resistividad eléctrica en el cenote Chac-mool, Quintana Roo. Tesis para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. México.

Olohoeft, 2006. Ground-Penetrating Radar (GPR) Mapping as a Method for Planning Excavation Strategies. *Society for American Archaeology*, 78-84.

Orellana E., 1982. Prospección geoeléctrica de corriente continua (2° ed.). S.A Ediciones Paraninfo, p.569.

P

Pataky T.C., & Goulermas J.Y., 2008. Pedobarographic statistical parametric mapping (pSPM): a pixel-level approach to foot pressure image analysis. *J. Biomech.* 41, 2136e2143. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2008.04.034.

Pataky T.C., Goulermas J.Y., & Crompton R.H., 2008a. A comparison of seven methods of within-subjects rigid-body pedobarographic image registration. *J. Biomech.* 41, 3085e3089. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2008.08.001.

Pataky T.C., Caravaggi P., Savage R., Parker D., Goulermas J.Y., Sellers W.I., & Crompton R.H., 2008b. New insight into the plantar pressure correlates of walking speed using

pedobarographic statistical parametric mapping (pSPM). J. Biomech. 41, 1987e1994. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2008.03.034.

Pellicer Jiménez Esperanza, 2015. Caracterización mediante Tomografía Eléctrica del deslizamiento de Toledo (Oviedo). Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo. España.

Pueyo Ó., Zamora S.A., & Pocoví J.A., 2005. Aplicación de la Prospección Geofísica por Georradar (GPR) a la Delimitación y Caracterización de Estructuras Arquológicas. Ejemplo de las Ruinas del Convento Agustino de Fraga (Huesca). Geogaceta, pp 131-134.

R

Ramayo Leduar & Rideout Miles, 2010. Aplicación del método geofísico magnetotelúrico Spartan MT en la exploración geotérmica de hidrocarburos y minera profunda. XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. N° 9, Cusco p. 1229-1232. Perú.

Renne R., Feinberg R., Waters J., Arroyo Cabrales P., Ochoa Castillo M., Pérez Campa & Knight, 2005. Age of Mexican ash with alleged 'footprints', Nature438, E7–E8, DOI:1038/04425.

Riga, 2014. Prism2 versión 2.59. User's Manual. Radar Systems, Inc. Latvia.

Rose Burney J., 2011. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Versión 2009 – 2012. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Puebla, México.

Rose Burney J., 2012. Las Aves de Valsequillo y su Zona de Influencia: Resultados Finales (junio 2011- mayo 2012). SEMARNAT Puebla, USAID. Puebla, México.

Rose Burney J. & Hernández Balzac A., 2013. Valsequillo: humedal de importancia internacional. Saberes y Ciencias Nùm.16, Vol.2, Pp.7.

RSIS Ramsar, S/F. Sitio Ramsar Valsequillo. Ramsar Sites Information Service. Recuperado de: <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/21643087/pictures/MX2027map.pdf?language=es>.

Ruiz Sandoval Castillo A., 2005. Variación Espacial y temporal de la comunidad de cladóceros del embalse Manuel Ávila Camacho. Estado de Puebla. Tesis para grado de Licenciatura en

Ciencias Biológicas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Biología. Puebla, México.

S

Sánchez García Maribel, 2019. Resistividad eléctrica de una secuencia evaporítica como herramienta para estudios paleoclimatológicos. Tesis para obtener el título de Ingeniería Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Ciudad de México. México.

Schwenninger J.L., González S., Bennett M., & González Huesca A., 2006. The OSL dating of the Xalnene ash: A reply to comments by G. Duller on "Human footprints in Central Mexico older than 40,000 years: Quaternary Science Reviews, v. 25, p. 3077–3080, DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.06.002.

Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.

Sequera Jiménez Francisco Javier. 2015. Estudio de Tomografía Eléctrica Resistiva 2D para localizar La Muralla Limítrofe de la gran Tenochtitlán; Centro Histórico, CD de México. Tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Ciudad de México, México.

Serralde Ordóñez Diana Paola, 2011. Caracterización electromagnética, una aplicación de la geofísica somera, Templo del Sol, Sogamoso (Boyacá). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias. Bogotá, Colombia.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2017. Estratigrafía. [sgm.gob.mx](https://www.sgm.gob.mx). Recuperado de: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Estratigrafia/Introduccion-estratigrafia.html#:~:text=La%20Estratigraf%C3%ADa%20es%20la%20rama,y%20el%20momento%20de%20los>.

Silva, P.G., Morales, J., Pozo, M., Calvo, J.P. & Peláez-Campomanes, P. (2004). Itinerarios geomorfológicos por Castilla – La Mancha. (En A. Pérez González, et al. coord.). SEG-CSIC., Toledo, 13-48.

Solís R., 2013. Estudio de los restos óseos de fauna del pleistoceno recuperados en la excavación arqueológica de Hueyatenco, temporadas de campo 2001-2004. Escuela Nacional de Antropología e Historia. México.

Solís Torres R., 2015. Análisis Arqueozoológico de los Restos de Animales del Pleistoceno superior de Valsequillo, Puebla, México. Máster International in Cuaternario y Prehistoria. Tesis de Maestría. Departamento de Historia. Universidad Rovira i Virgili. España.

Stevens R., Metcalfe E., Leng J., Lamb L., Sloane J., Naranjo E. & Gonzalez S., 2012a. Reconstruction of late Pleistocene climate in the Valsequillo Basin (Central México) through isotopic analysis of terrestrial and freshwater snails. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* M. J. 319-320, Pp.16-27. DOI: 10.1016/j.palaeo.2011.12.012.

Szabo B.J., Malde E., & Williams C., 1969. Dilemma posed by uranium-series dates on archaeologically significant bones from Valsequillo, Puebla, Mexico. *Earth and Planetary Science Letters* 6, 237. U.S. Geological Survey, Federal Center, Denver, Colorado, USA. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(69\)90163-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(69)90163-0).

T

Tapias J., Himi M. & Casas A., 2003. Estimación de la distribución espacial de las propiedades texturales de los suelos por tomografía eléctrica: principios y aplicaciones. Estudios de la zona no saturada del suelo. Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología. Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona, España.

Tavera Mario, 2008. Aplicación del georradar para la mejora del rendimiento de una red hídrica. Tesina. Máster en Ingeniería hidráulica y medio ambiente. Departamento de Ingeniería hidráulica y medio ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España.

U

Urbieto, J., 2001. La tomografía eléctrica en los métodos de corriente continua. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

Urrutia Fucuguachi J., Trigo A., Téllez E., Pérez L., & Méndez F., 2013. Valsequillo Project Team. Volcano-sedimentary stratigraphy in the Valsequillo Basin, Central México inferred from

electrical resistivity soundings. USA. *Geofísica Internacional* 53–1: 87-94. DOI: 10.1016/S0016-7169(14)71492-8.

V

Vargas Huitzil Eliana, 2015. Tomografía eléctrica aplicada a caracterizar la cantera La Joya ubicada en el municipio de Ixtacuixtla, Tlaxcala. Tesis presentada para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Geofísica. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Colegio de Geofísica. Facultad de Ingeniería. Puebla, México.

Vega P.G., 2002. Radar de Subsuelo. Evaluación para Aplicaciones en Arqueología y en Patrimonio Histórico - Artístico. PhD Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Z

Zanchetta G., Leone T.G., Fallick A.E., & Bonadonna F.P., 2005. Oxygen isotope composition of living land snail shells: data from Italy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 223, 20–33. DOI: 10.1016/j.palaeo.2005.03.024.

Zayas Maldonado A., 2011. Análisis de la Dieta del conejo silvestre (*Silvilagus floridanus*) en San Francisco Totimehuacan, Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Tesis Escuela de Biología. Puebla, México.

Anexos

Tabla 11. Valores resistivos de las rocas (modificado de Vargas, 2015).

Valores resistivos de las rocas	
Tipo de roca	Rango de resistividad (Ωm)
Pórfido de granito	4.5×10^3 (<i>humedo</i>) – 1.3×10^6 (<i>seco</i>)
Pórfido de feldespato	4×10^3 (<i>humedo</i>)
Sienita	$10^2 - 10^6$
Pórfido de diorita	1.9×10^3 (<i>humedo</i>) – 2.8×10^4 (<i>seco</i>)
Pórfido carbonizado	2.5×10^3 (<i>humedo</i>) – 6×10^4 (<i>seco</i>)
Diorita cuarzosa	$2 \times 10^4 - 2 \times 10^6$ (<i>humedo</i>) – 1.8×10^5 (<i>seco</i>)
Pórfido (varios)	$60 - 10^4$
Dacita	2×10^4 (<i>humedo</i>)
Andesita	4.5×10^4 (<i>humedo</i>) – 1.7×10^2 (<i>seco</i>)
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$
Gabro	$10^3 - 10^6$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$ (<i>seco</i>)
Olivino	$10 - 6 \times 10^4$ (<i>humedo</i>)
Peridotita	3×10^3 (<i>humedo</i>) – 6.5×10^3 (<i>seco</i>)
Esquistos (calcáreo y mica)	$20 - 10^4$
Tobas	2×10^3 (<i>humedo</i>) – 10^5 (<i>seco</i>)
Pizarras (varias)	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Gneis (varios)	6.8×10^4 (<i>humedo</i>) – 3×10^6 (<i>seco</i>)
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^6$ (<i>seco</i>)
Cuarcitas (varias)	$10 - 2 \times 10^8$
Esquistos consolidados	$20 - 2 \times 10^3$
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Areniscas	$1 - 6.4 \times 10^8$
Calizas	$50 - 10^7$
Dolomita	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Arcilla húmeda no consolidada	20
Margas	3 – 70
Arcillas	1 – 100
Arenas petrolíferas	4 – 800
Arenas, gravas, pómez	12 – 16
Arenas, tobas, arcillas y gravas	4 – 66
Aluviones	8 – 37
Limos	16 – 38
Arenas basálticas	62 – 85
Basaltos (sanos)	500 – 3000
Basaltos (fracturados)	48 – 585
Andesitas	102 – 334
Piroclastos del plioceno (grano fino)	> 14

Piroclastos del plioceno (grano grueso)	24 – 55
Piroclastos del mioceno	22 – 39
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	> 10000
Basamento. Roca fracturada	1500 – 5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100 – 2000
Basamento. Roca fracturada con agua salada	1 – 100
Gravas no saturadas	500 – 2000
Gravas saturadas	300 – 500
Arenas no saturadas	400 – 700
Arenas saturadas	100 – 200
Limos no saturados	100 – 200
Limos saturados	20 – 100
Limos saturados con agua salada	5 – 15
Arcillas no saturadas	20 – 40
Arcillas saturadas	5 – 20
Arcillas saturadas con agua salada	1 – 10
Andosoles secos	1000 – 2000
Andosoles no saturados	300 – 1000
Andosoles saturados	100 – 300



Ilustración 43. Trabajo en campo. Tomografía eléctrica, tendido 1



Ilustración 44. Zona de estudio, perspectiva en campo.



Ilustración 45. Trabajo en campo. Radar de Penetración Terrestre