UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO E IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D. EL ALTO, PAMPAS DE MAJES

TESIS PRESENTADA POR EL BACHILLER:

MONTOYA COLONNA, VICTOR VOLTAIRE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEOFÍSICO

ASESOR: DR. JORGE SOTO VÁSQUEZ

AREQUIPA – PERÚ
2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO E IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D. EL ALTO, PAMPAS DE MAJES

TESIS PRESENTADA POR EL BACHILLER:

MONTOYA COLONNA, VICTOR VOLTAIRE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEOFÍSICO

JURADOS:

PRESIDENTE: DOC. ARMANDO MINAYA LIZÁRRAGA
VOCAL: DOC. EDGAR GONZALES ZENTENO
SECRETARIO: ING. JAVIER TICONA PAUCARA

ASESOR: DR. JORGE SOTO VÁSQUEZ

AREQUIPA – PERÚ
2019

DEDICATORIA

A mi padre, que desde el cielo me mira y está orgulloso de mis logros.

A mi madre, por su apoyo incondicional y siempre estar conmigo en todos mis triunfos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mi asesor al **Dr. Jorge Soto Vásquez** por haberme dado la oportunidad de realizar este estudio bajo su asesoría, brindándome todos los recursos necesarios y conocimientos para el desarrollo de este trabajo, por sus exigencias, sus consejos, por su apoyo en todo momento y por su confianza en mí. Gracias.

A mi compañero de universidad Gian Franco Taco Juárez, por el apoyo y asesoría para poder realizar con mayor éxito está presente tesis.

A mi madre y hermano Renzo por siempre darme aliento a dar este paso.

A mi novia por el apoyo incondicional y siempre darme ánimos para seguir adelante.

Del mismo modo, extiendo mi agradecimiento a mis queridos docentes de la Escuela profesional de Ingeniería Geofísica, por darme el conocimiento y la motivación de seguir avanzando, en el desenvolvimiento profesional y desarrollo personal.

Simplemente a todos, muchas gracias.

RESUMEN

En este trabajo se realizó el estudio de tomografía eléctrica 2D en el sector “EL ALTO” – Pampas de Majes, donde en sus proximidades de la zona de estudio se observan un deslizamiento que avanza a través de los años, conocido como el deslizamiento “El Zarzal”, por lo que se decidió realizar este levantamiento de líneas geofísicas con el objeto de detectar las discontinuidades estructurales y las características del subsuelo. Para el levantamiento se decidió utilizar el arreglo Wenner, que es un dispositivo simétrico muy utilizado en el caso de capas plano-paralelas. Al ser un dispositivo simétrico es más fiable a la hora de determinar estructuras horizontales que de resolver estructuras verticales. El levantamiento se realizó con la ayuda de un “resistivímetro modelo 6471” de la marca AEMC INSTRUMENTS de múltiple frecuencia (AEMC INSTRUMENTS, s.f.), También se utilizó una “maleta multiplexora” de la marca Innova. Así mismo se utilizaron 37 electrodos impolarizables con la finalidad de reducir el efecto electromagnético circundante y la polarización de estos.

Los datos posteriormente fueron procesados con ayuda de software especializados en datos geofísicos, permitiendo visualizar las anomalías detectadas en diversos puntos de la tomografía eléctrica, realizándose la inversión de los datos, siendo aplicados diversas interpolaciones para obtener mejor resolución a detalle de los datos para una mejor interpretación, se concluye que el método nos dio buena solución a los problemas principales, dándonos excelentes resultados, así como la caracterización del subsuelo y las diferentes discontinuidades estructurales. Toda esta información está sustentada a detalle en el presente informe de tesis.

Palabras clave: Tomografía eléctrica 2D, deslizamientos, discontinuidades, wenner, El Zarzal.

ABSTRACT

In this work, the study of 2D electrical tomography was carried out in the "EL ALTO" sector - Pampas de Majes, where in its vicinity of the study area there is a glide that advances through the years, known as the slip "El Zarzal ", reason why it was decided to carry out this survey of geophysical lines in order to detect the structural discontinuities and the characteristics of the subsoil. For the survey, it was decided to use the Wenner arrangement, which is a symmetric device widely used in the case of plane-parallel layers. Being a symmetric device, it is more reliable when determining horizontal structures than solving vertical structures. The survey was carried out with the help of a "resistivimeter model 6471" of the brand AEMC INSTRUMENTS of multiple frequency (AEMC INSTRUMENTS, s.f.), Also a "multiplex suitcase" of the Innova brand was used. Likewise, 37 impolarizable electrodes were used in order to reduce the surrounding electromagnetic effect and the polarization of these.

The data was subsequently processed with the help of software specialized in geophysical data, allowing the anomalies detected at various points of the electrical tomography to be visualized, with the inversion of the data, with various interpolations being applied to obtain better resolution in detail of the data for a better interpretation, it is concluded that the method gave us a good solution to the main problems, giving excellent results, as well as the characterization of the subsoil and the different structural discontinuities. All this information is supported in detail in this thesis report.

Keywords: 2D electrical tomography, landslides, discontinuities, wenner, El Zarzal.

INDICE

Contenido

AGRADECIMIENTOS III
RESUMEN IV
ABSTRACT V
INDICE VI
LISTA DE PLANOS VIII
LISTA DE FIGURAS IX
LISTA DE TABLAS XI
LISTA DE FOTOGRAFIAS XII
LISTA DE GRAFICOS XIII
CAPITULO I 1
INTRODUCCIÓN: 1
1.1 Justificación 4
1.2 Formulación del problema 5
1.3 Alcances y limitaciones 5
1.4 Variable e indicadores 6
1.5 Objetivos 7
1.6 Hipótesis 7
1.7 Metodología de trabajo 8
1.8 Antecedentes 10
1.9 Accecibilidad y ubicación de la zona de estudio 12
1.10 Clima 14
CAPITULO II 19
CONTEXTO GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO Y GEODINÁMICO 19
2.1 Geología local 19
2.2 Geomorfología 25
2.3 Contexto geodinámico 27
2.4 Deslizamientos 30
2.5 Fallas y fracturas 35

CAPITULO III 36
MARCO TEÓRICO 36
3.1 Método de tomografía eléctrica (ert) 36
3.1.1 Propiedades eléctricas de las rocas 37
3.1.2 Fundamento teórico de la prospección eléctrica 39
3.1.3 Fundamento teórico de la tomografía eléctrica 48
3.1.4 Dispositivos geoeléctricos 49
3.1.5 Pseudosección de resistividad 54
3.1.6 Profundidad de investigación (punto de atribución) 55
3.2 Inversion de datos geoeléctricos 58
3.2.1 Técnicas de inversión 59
3.2.2 Método de optimización y cálculo de la matriz jacobiana 60
3.2.3 Opciones de inversión en el res2dinv 61
CAPITULO IV 64
INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO 64
4.1 Instrumentación especializada 64
4.1.1 Resistivímetro aemc instruments – modelo 6471 65
4.2 Parámetros de adquisición de datos 67
4.3 Metodología de adquisición de datos en campo 67
4.3.1 Disposición de las líneas 68
4.3.2 Elección del arreglo y disposición de la tomografía eléctrica 68
4.3.3 Adquisición de datos 69
CAPITULO V 73
PROCESAMIENTO DE DATOS E INTERPRETACIÓN 73
5.1 Metodología cuantitativa 73
5.2 Interpretación 77
5.3 Interpretación del modelo Geológico – Geofísico 97
RESULTADOS
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFÍA

LISTA DE PLANOS

Plano 1: Plano de ubicación de la zona de estudio. 13
Plano 2: Mapa Hidrogeológico de la cuenca Siguas - Quilca 18
Plano 3: Mapa geológico del cuadrángulo de Aplao 33r..... 24
Plano 4: Plano Geomorfológico del Cuadrángulo de Aplao 33r 26
Plano 5: Mapa de la zona de estudio y zona de deslizamiento “El Zarzal” 29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación climática según Köppen-Geiger (Clasificacion Climatica segun Koppen-Geiger, s.f.) 14
Figura 2: Climograma Alto de Majes. (Climate-data.org, s.f.) 16
Figura 3: Tabla Climática / Datos históricos del tiempo Alto de Majes. (Climate-data.org, s.f.) 16
Figura 4: Diagrama de Temperatura Alto de Majes. (Climate-data.org, s.f.) 16
Figura 5: Cuenca del rio Siguas y Quilca. (Proyecto Majes, s.f.) 17
Figura 6: Geologia local de la zona de Aplao (33 r). (Guizado Jol, 1968) 23
Figura 7: Esquema que muetsra la zona despues del deslizamiento esta cerca a la sub-Estacion Sociedad Electrica y la localidad de El Alto en el Valle de Majes y repercute en el valle de Siguas. (Medina Gallegos, 2015) 28
Figura 8: Esquema que muestra la zona antes del deslizamiento en el valle de majes y tiene repercusion en el valle de Siguas. (Medina Gallegos, 2015) 28
Figura 9: Esquema de un deslizamiento rotacional y partes del mismo (modificado de Vames. 1988). (Gonzales de Vallejo, 2002) 31
Figura 10: Tipos de deslizamientos Rotacionales. (Gonzales de Vallejo, 2002) 32
Figura 11: Esquema de un deslizamiento Traslacional. (Gonzales de Vallejo, 2002) 33
Figura 12: Línea de Tomografía Eléctrica interpretada. (Geoperfo, s.f.). 36
Figura 13: Tipos de conducción de la corriente. (Porras, 2018) 37
Figura 14: Tabla de resistividades de Loke. (Loke M. , 1999) 38
Figura 15: Tabla de resistividades de Telford. (Telford, 1990) 39
Figura 16 :Distribución de Los Electrodos. Tomada de (Patzelt, Kottmann, & Waldohor, 2007) (Betancourt, 2017) 40
Figura 17: Resistividad Eléctrica, material homogéneo de longitud (l) y sección (s). (MI blog de electronica, 2015) 40
Figura 18: Distribución de la corriente en el suelo. (Udiaz, Fundamentos de geofisica, 1997) 43
Figura 19: Lineas de corriente y lineas equipotenciales. (Orellana, Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, 1972) 46
Figura 20: Potencial debido a dos fuentes puntuales. 47
Figura 21: Arreglo geométrico multielectródica. (Dahlin T. , 2001) 48
Figura 22: Representación simplificada de la tomografía eléctrica para un arreglo dipolo-dipolo. (Chavez, 2011) 49
Figura 23: Esquema de configuración electródico del Dispositivo Wenner. (ANAYA, 2010) 50
Figura 24: Esquema de dispositivo electródico del dispositivo Schlumberger. (ANAYA,2010) 51

Figura 25: Esquema de dispositivo electródico del dispositivo Wenner – Schlumberger. (ANAYA, 2010) 52
Figura 26: Esquema de dispositivo electródico del dispositivo Dipolo – Dipolo. (ANAYA,2010) 53
Figura 27: Esquema de dispositivo electródico del dispositivo Polo – Dipolo. (ANAYA, 2010) 54
Figura 28: Representación gráfica de la construcción de una P'seudosecciones Geoeléctricas para una configuración Dipolo – Dipolo. Modificada de Julián Cuesta. (MENDOZA, s.f.)..... 55
Figura 29: Ejemplos de profundidades máximas de investigación con un sistema multielectrodo simple (Figura superior) o mediante la técnica de roll – along (figuras inferiores). Tomado de Martínez Pagan(2006), modificado de bernand,2003). (Pagan, 2006) (Bernand, 2003)..... 57
Figura 30: Estructura general del Software RES2DINV. Mostrando los datos de resistividad aparente medidos, los datos de resistividades aparente calculados y la estimacion del modelo real de resistividad. (Molina, 2006) 58
Figura 31: Resistivímetro AEMC INSTRUMENTS modelo 6471 con accesorios. (AEMC INSTRUMENTS, s.f.) 65
Figura 32: Resistivímetro modelo 6471. (AEMC INSTRUMENTS, s.f.) 66
Figura 33: Representación esquemática de la matriz Wenner – Schlumberger con ubicaciones de electrodos y puntos de referencia. (Arreglo Wenner-Schlumberger, s.f.)..... 69
Figura 34: Ventana de Software UEstudio.exe, mostrando los datos de líneas geofísicas. Fuente : Software UEstudio. 74
Figura 35: Ventana inicial del software RES2INV. Fuente: RES2INV 75
Figura 36: Secciones de resistividad realizadas en el software RES2INV. Fuente: RES2INV. 75
Figura 37: Sección de resistividad en Oasis Montaj. Fuente: Oasis Montaj 76
Figura 38: Ventana principal del Software Surfer 15. Fuente: Surfer 15. 76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas de la zona de estudio, el sector El Alto, Pampas de Majes. 12
Tabla 2: Tabla de coeficientes para determinar la profundidad media de investigación para dos de los principales dispositivos: Wenner y Dipolo – Dipolo. (Edwards L. , 1977) 56
Tabla 3: Rangos de frecuencia..... 66
Tabla 4: Medición en punto..... 67
Tabla 5: Parámetros de Adquisición de datos. 67
Tabla 6: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 1..... 78
Tabla 7: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 2..... 80
Tabla 8: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 3..... 82
Tabla 9: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 4..... 84
Tabla 10: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 5..... 86
Tabla 11: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 6..... 88
Tabla 12: Resumen de los datos tomados para las líneas de tomografía eléctrica, corresponde las líneas 01,02,03. 109
Tabla 13: Resumen de los datos tomados para las líneas de tomografía eléctrica, corresponde las líneas 04,05,06. 110

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1: Formación Moquegua Inferior y Superior, conglomerado aluvial pleistocénico y depósitos recientes. 19
Fotografía 2: Conglomerado Aluvial Pleistocénico. 21
Fotografía 3: Tufos Volcánicos del Cuaternario. 22
Fotografía 4: Instalación del resistivímetro AEMC modelo 6471 en la zona de estudio, consola, carretes de cable, electrodos impolarizables, y accesorios. 71
Fotografía 5: Resistivímetro AEMC ISNTRUMENTS modelo 6471 tomando datos en zona de estudio, Sector el Alto. 71
Fotografía 6: Consola Resistivímetro AEMC modelo 6471 en total funcionamiento en campo. 72
Fotografía 7: Contacto entre el cuaternario reciente y el tufo volcánico..... 72

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1: Unidades Estratigráficas de la zona de Aplao (33 r). 23
Gráfico 2: Ubicación de las lineas de tomografia electriaca. Fuente (surfer 15) 77
Gráfico 3: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 1 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 78
Gráfico 4:Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 1 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 78
Gráfico 5: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 2 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 80
Gráfico 6: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 2 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 80
Gráfico 7: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 3 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 82
Gráfico 8: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 3 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 82
Gráfico 9: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 4 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 84
Gráfico 10: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 4 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 84
Gráfico 11: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 5 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 86
Gráfico 12: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 5 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 86
Gráfico 13: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 6 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 88
Gráfico 14: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 6 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV) 88
Gráfico 15: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 1 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj). 91
Gráfico 16: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 2 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj). 92
Grafico 17: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 3 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj). 93
Gráfico 18: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 4 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj). 94
Grafico 19: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 5 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj). 95

Gráfico 20: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 6 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj). 96
Gráfico 21: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 1, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15). 97
Gráfico 22: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 2, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15). 99
Gráfico 23: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 3, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15). 101
Gráfico 24: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 4, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15). 103
Gráfico 25: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 5, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15). 105
Gráfico 26: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 6, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15). 107
Gráfico 27: Mapa 3D de las líneas de tomografía eléctrica tomados en el sector EL ALTO – Pampas de Majes. Fuente (Oasis Montaj). 111

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN:

Los métodos de prospección eléctrica en corriente continua se fundamentan en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica, natural o inducida, por el subsuelo. Se ha calculado que casi el 70% de los trabajos realizados a nivel mundial, tienen que ver con el uso de técnicas eléctricas.

En 1829, el inglés Robert Were Fox descubrió que ciertos minerales producen débiles corrientes eléctricas apreciables desde la superficie (polarización espontanea) y sugirió su uso para la prospección de yacimientos. A partir de esa fecha los métodos prospectivos fueron evolucionando hasta que Conrad Schlumberguer (1913) introduce una fuente artificial (inyección de corriente al suelo) para estudiar la cuenca silúrica de calvados (Francia) y, él y Fran Wenner (1925) idean el dispositivo tetraelectródico base de la prospección actual.

El método para obtener los modelos de resistividad del terreno se basa en la inyección de una corriente eléctrica en el subsuelo de intensidad conocida y en la medición de la diferencia de potencial generada por la misma en dos puntos. Este procedimiento se repite en toda el área de prospección, y una vez obtenidas las medidas se dispone de una distribución de resistividades experimentales o aparentes a lo largo del subsuelo. Dado que el terreno es heterogéneo, este conjunto de resistividades no corresponde a la distribución real. El cálculo para obtener el modelo real de resistividades se realiza a partir de la resistividad aparente registrada en campo, utilizando técnicas de inversión. (Pellicer Jiménez, 2015)

El objetivo de este método se basa en obtener secciones 1-D, 2-D y 3D de resistividades reales del subsuelo, modelo a partir del cual podremos determinar la presencia o no de filtraciones de agua en profundidad, detección de cavidades y cuevas, detección de aguas subterráneas, indicando con gran precisión el volumen y profundidad del agua mediante la localización de áreas en donde tengamos una anomalía característica del valor de la resistividad del terreno. Para ello será preciso el empleo de un programa de inversión, con el cual transformar las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad reales del terreno.

Existen infinidad de configuraciones de campo diferentes a la hora de proponer métodos eléctricos. La diferencia entre las distintas configuraciones reside en el tipo de transmisor y receptor de corriente utilizados en el campo, y en cómo se sitúen en el campo estos transmisores o receptores. Estos métodos eléctricos tienen la ventaja de ser mucho más

sencillos en el procesado y la interpretación, pero su mayor desventaja es que cualquier material aislante o muy conductivo puede apantallar los materiales que lo rodean. (Ali Murillo, 2016)

Las discontinuidades estructurales son uno de los elementos que conforman y afectan a una formación geológica, y que tiene una mayor incidencia en el inicio del emplazamiento de un deslizamiento, este fenómeno afecta principalmente *las laderas del Valle de Siguas*, estas anomalías se presentan en forma de fracturas, grietas, fallas y cavidades; están definidas por su longitud, orientación, tasa de cambio, etc. En el sector El Alto y en general en los márgenes del valle de Siguas se ve afectado por deslizamientos, en los últimos 15 años, posiblemente esto debido al desarrollo agrícola del Proyecto Majes en su primera etapa a través del indiscriminado uso y mal manejo de los recursos hídricos para el regadío de los cultivos. Este fenómeno inició con filtraciones en la base de las laderas del valle Siguas, posteriormente con pequeños agrietamientos en la cresta del talud del valle y posteriormente el desarrollo del deslizamiento hasta llegar a su desarrollo completo. Los deslizamientos son fenómenos geológicos complejos que pueden acarrear un alto impacto socioeconómico e importantes daños, por eso es importante su estudio tanto para las fases previas del evento como las posteriores.

La prospección geofísica consiste en un conjunto de técnicas físicas, matemáticas y geológicas aplicadas a la exploración del subsuelo mediante observaciones realizadas en la superficie de la Tierra para la búsqueda y estudio de estructuras ocultas en ésta y de la localización de las mismas a través de contrastes en las propiedades físicas de los cuerpos con el medio circundante, conocidas también como anomalías. Lo que se busca, es determinar con éxito dichas anomalías, las cuales dependerán tanto del grado de contraste existente como de las dimensiones del cuerpo respecto de la profundidad a la que se encuentra. Esta dualidad produce que el problema de inversión geofísica para la interpretación requiera de antecedentes preexistentes de la zona de estudio, como sondajes litológicos, calicatas y/o de otros métodos geofísicos. Se asume así que la corteza de la Tierra es un medio no homogéneo, formada por bloques individuales, y estos a su vez, por rocas de varios orígenes y edades geológicas con propiedades físicas como densidad, susceptibilidad magnética, resistividad, propiedades radioactivas, conductividad termal y parámetros elásticos que afectan localmente los campos físicos que gobiernan la Tierra. Ahora bien, si somos capaces de medir los cambios de dichos campos (anomalías), podremos inferir tipos y profundidades de heterogeneidades existentes en la corteza terrestre.

Para el presente estudio se optó por el uso de métodos geofísicos en concreto la caracterización mediante el uso de tomografía eléctrica. Esta técnica se usa frecuentemente para este tipo de estudios ya que las áreas deslizadas suelen están asociadas a cambios en la resistividad del terreno (Perrone, 2014)

Este método permite una rápida adquisición y modelización de los datos en campo, y su coste es bajo si se compara las técnicas de prospección tradicionales (sondeos o calicatas). Permite estudiar la geometría del cuerpo deslizado, la profundidad a la que se genera el

mismo y conocer el espesor de los materiales que están involucrados en el deslizamiento. También puede aportar información sobre la estratigrafía de la zona, lineamientos tectónicos y la presencia de niveles freáticos que puedan ser el desencadenante de estos movimientos (Perrone, 2014)

1.1 JUSTIFICACIÓN

El estudio directo del suelo y la obtención de sus parámetros físicos tienden a ser muy costosos a través de métodos de perforación y/o excavación directa, pero gracias a las investigaciones geofísicas indirectas y no destructivas ayudan a obtener un modelo geológico – geofísico aproximado del subsuelo a bajos costos. A través del método de tomografía eléctrica (ERT) es más fácil poder identificar estructuras geológicas bajo la superficie y el grado de conservación y disposición en que estas se encuentran. La escasa información geológica de la zona de estudio referente al comportamiento del talud ubicado cerca a los deslizamientos que se vienen suscitando en la actualidad, trae consigo la preocupación de los pobladores del sector El Alto. Las autoridades deben informarles sobre los posibles efectos que puedan suceder a largo y corto plazo sobre el posible fallamiento del talud. Para ello se planteó realizar el estudio geofísico de tomografía eléctrica 2D, para caracterizar e identificar anomalías estructurales que posiblemente se estén desarrollando internamente y que a simple vista parecen imperceptibles y que pueden desencadenar un lamentable suceso.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Existencia de discontinuidades estructurales producidas por los deslizamientos del sector de EL ALTO mediante el método geofísico de tomografía eléctrica 2D

1.2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El escenario de estudio permite proponer las siguientes interrogantes: ¿Existe alguna relación directa entre la respuesta del suelo a partir de la propiedad de resistividad eléctrica y la identificación de discontinuidades (grietas, fallas y fracturas) ?, ¿Cuál sería el dispositivo electródico que otorgue mejores resultados para la identificación de anomalías estructurales, en zonas potenciales de deslizamiento?, ¿Cómo identificar la superficie de falla de un talud frente a un posible deslizamiento, a través de la integración de secciones de tomografía eléctrica 2D/3D?

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.3.1 ALCANCES

- El alcance general del presente trabajo de grado es las técnicas geofísicas que se tienen para trabajar, específicamente el método eléctrico de tomografía eléctrica 2D, para poder caracterizar las discontinuidades estructurales presentes en el talud cercano al deslizamiento principal del sector El Alto.
- Con este método de tomografía eléctrica se identificará la litología y sus propiedades eléctricas a un bajo costo y en un corto periodo de tiempo.
- Serán beneficiados los pobladores del sector El Alto, ya que les brindara información relevante sobre el estado actual y el comportamiento de la estabilidad del talud.

1.3.2 LIMITACIONES

- Las limitaciones del presente estudio se basan en la elevada resistividad de ciertas zonas estudiadas, que hacen difícil poder ser estudiadas, esto debido a que la zona de estudio se ubica sobre materiales extremadamente secos, ya que se ubican en una zona desértica.
- Se tuvo que preparar el terreno para que el material pueda conducir la corriente y por lo tanto sea más conductivo.
- El estudio presenta escasa información geológica de la zona.

1.4 VARIABLE E INDICADORES

1.4.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

- Deslizamiento.

1.4.2 VARIABLES DEPENDIENTES

- Resistividades

1.4.3 INDICADORES

- Resistividad (Ohm-m).
- Diferencia de potencial (mV).
- Intensidad de corriente (mA).
- Profundidad de investigación (m).
- Deslizamientos (m).

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar el Subsuelo e identificar el comportamiento Geodinámico: (Grietas, Fallas y Fracturas) de los deslizamientos producidos en el sector El Alto mediante el método de Tomografía Eléctrica 2D.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las resistividades los horizontes geoelectricos.
- Determinar sus espesores.
- Determinar discontinuidades estructurales a partir de los contrastes de resistividad y su correlación con zonas de deslizamientos.

1.6 HIPÓTESIS

Por medio de la Tomografía Eléctrica 2D podemos identificar la Geodinámica del suelo como grietas, fracturas y fallas a partir de su localización en base a P'seudosecciones Geoeléctricas.

1.7 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El presente estudio se desarrolló en base a la aplicación del método de tomografía eléctrica 2D en el sector El Alto.

1.7.1 REVISIÓN DE BASE BIBLIOGRÁFICA

La revisión de la base bibliográfica comprende fundamentalmente la síntesis del marco teórico del presente estudio, el cual está conformado por la descripción geológica, geomorfológica y geodinámica de la zona de estudio, de mismo modo un resumen de las bases teóricas claves del método geofísico de tomografía eléctrica. Los antecedentes correspondientes a los estudios anteriores realizados en la zona de estudio o lugares aledaños también forman parte de la base bibliográfica, pero con mayor relevancia.

1.7.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos es la etapa más importante del presente trabajo tesis, consta básicamente del desplazamiento en campo de los equipos de medición y la recolección de los datos.

1.7.3 ANÁLISIS, PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Durante el desarrollo del análisis y procesamiento de este trabajo se utilizó el siguientes Software especializado:

- **RES2DINV:** Software que sirvió para la inversión de los datos de resistividad adquiridos en campo, según la configuración predeterminada. Aquí se obtiene los datos finales a ser interpretados.

- **GEOSOFT OASIS MONTAJ:** software que se utilizó para la presentación de las de las secciones de resistividad procesadas. Este software ofrece una mejor visualización de los datos que fueron interpretados por el autor.

- **ARCGIS-ARCMAP:** software utilizado para la obtención de los distintos mapas de referencia, así como la presentación final de los resultados interpretados por el autor.

- **U ESTUDIO:** Utilizado para organizar todos los archivos en formato ".DAT. Otorga más facilidad a la edición de los datos y una mejor visualización.

- **SURFER 15:** Software utilizado para el procesamiento de los datos y de las secciones.

1.8 ANTECEDENTES

- **Martínez Vargas (1980)** indicó la existencia de suelos compuestos por un conglomerado de partículas gruesas (gravas y bolones) embebidas dentro de una matriz de partículas menores (arenas, limos y arcillas), que en conjunto le da al suelo un comportamiento colapsable, dicho investigador atribuyó dicho comportamiento principalmente a el suelo de la formación Moquegua inferior o Sotillo (Valle de Vítor) que por cierto ya tenía problemas de deslizamientos en el año de 1974. (Medina Gallegos, 2015), (Martinez Vargas, 1980).

- **Fernández (1997)** concluyó las siguientes propiedades en el conglomerado de gravas de la formación Sotillo:
  Suelo macro-poroso (e=0.1)
  Estructura bien acomodada (ɣ=2kg/cm^3)
  Baja humedad (w=1.5%)
  Naturaleza cementada del suelo con concentraciones mayores del 60% de Na2CO3 (carbonato de sodio) y 11% de arcilla montmorillonítica. Estos suelos al tener carbonato son disolubles y forman cavernas en presencia de agua y la presencia de montmorillonita indica que son expansivos en presencia de agua. Este suelo no sería peligroso, en teoría ya que la zona presenta baja humedad pero en la parte del Talud Pachaqui, la irrigación Majes-Siguas esta sobre el talud. Dicho investigador clasificó al suelo del lugar como una grava colapsable. (Medina Gallegos, 2015) (Fernandez Sixto, 1998)

- **Barreda de la Cruz (2003)** reporta que la ocurrencia de un deslizamiento repentino en Santa Isabel de Siguas y determina que la causa del deslizamiento son las filtraciones de agua de regadíos sobre un conglomerado de gravas altamente cementado, atribuyéndole a ese suelo un comportamiento colapsable. Dicho autor atribuyó las siguientes características geofísicas a dichos suelos:
  Resistividad de 1080 Ohmios/m con un espesor de 5.1 metros.
  Cubierta de material aluvial seco (Formación Moquegua Superior) y presencia de cantos rodados, arenas, limos y arcillas poco consolidadas, con agrietamientos y sin humedad. (Medina Gallegos, 2015) (Barrera de la Cruz, 2003)

- **Tejada (2004).** Las características que presenta el conglomerado de gravas de la Formación Moquegua superior del Valle de Siguas son las siguientes:
  Estructura no macro-porosa (relación de vacíos menor a 0.8)
  Estructura del suelo no mal acomodada (ρ>2kg/cm^3)
  Humedad apreciable, con valores promedio de 4.25%

Naturaleza del suelo: cementada. Tejada encontró altas concentraciones de CaCO3, arcilla montmorillonítica y sales de sodio en matriz fina. También granulométricamente está compuesto por gravas pobremente gradadas con bolonerías (GP-GM). Estas gravas tienen una fracción fina 6-30% y una fracción gruesa 30-60%.(Fuente: Medina Gallegos 2015).

- **Martínez, A (2006).** En sus trabajos de consultoría "Estudio Geotécnico del Deslizamiento Compuesto Gloria" Siguas–Arequipa. y "Tratamiento del deslizamiento Compuesto Gloria" Gloria S.A. describe el comportamiento de las gravas colapsables, su condiciones geológicas, geomorfológicos de Mecánica de suelos especiales, y sus efectos, así mismo da algunas recomendaciones de prevención y alternativas de tratamiento para controlar sus efectos en base a los deslizamientos del talud el Zarzal. (Martinez, 2006)

- **Ticona y Toledo (2007).** En su tesis de segunda especialidad "Plan de Mitigación de los Deslizamientos producidos por efecto de la saturación en los Terrenos de la Irrigación Majes" detallan minuciosamente las potenciales zonas de peligro frente a los deslizamientos de la margen derecha del Valle de Siguas, en base a las metodologías geofísicas de Prospección Eléctrica (SEV) y el Método de Georradar. Mediante el método geoeléctrico lograron identificar cuatro horizontes bien definidos (H1 = Suelos superficiales, H2 = Formación Moquegua superior, H3 = Formación Moquegua inferior y H4 = Basamento rocoso respectivamente). Mientras que por medio del método de Georradar se logró identificar zonas con presencia de agrietamientos y niveles de humedad. (Ticona Paucara, 2007)

1.9 ACCECIBILIDAD Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.9.1 ACCESIBILIDAD

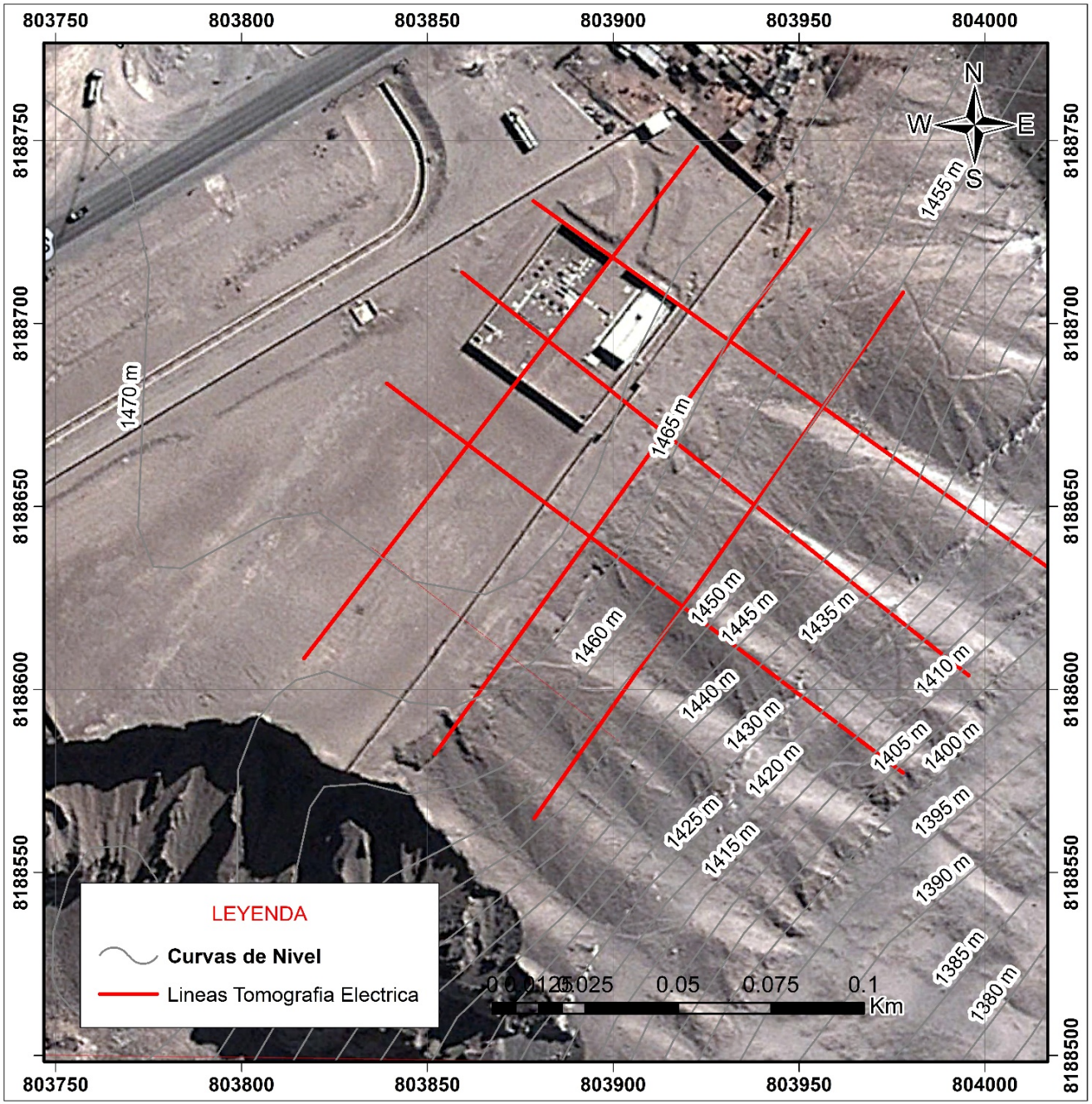
La zona de estudio es accesible por la carretera asfaltada de la Panamericana Sur (km 920+300). Teniendo como punto de partida la ciudad de Arequipa, se recorre 70 km en un tiempo promedio de 1 hora con 30 minutos; por el sector de Camaná y Huambo al sur oeste y norte respectivamente de la ubicación del deslizamiento se tiene un tiempo de llegada promedio de 1 hora y 30 minutos por carretera asfaltada. El deslizamiento compromete la carretera Panamericana Sur en un tramo de 2.5 kilómetros.

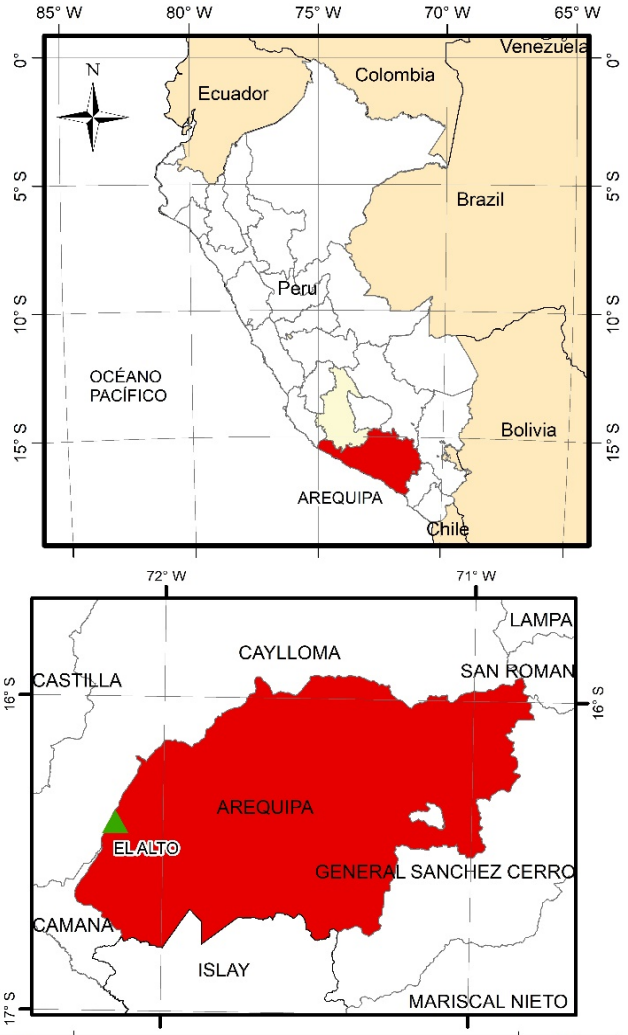
1.9.2 UBICACIÓN

El Sector El Alto se ubica entre los límites de las provincias de Arequipa y Caylloma, específicamente en el distrito de San Juan de Siguas, Provincia de Arequipa y departamento de Arequipa.

VÉRTICES	ESTE (m)	SUR (m)
1	803519.98 m E	8188912.40 m S
2	804266.62 m E	8188925.41 m S
3	804302.78 m E	8188446.44 m S
4	803514.98 m E	8188489.37 m S

Tabla 1: Coordenadas de la zona de estudio, el sector El Alto, Pampas de Majes.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

TESIS:
"CARACTERIZACIÓN DEL SUELO E IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TOMOGRAFIA ELECTRICA 2D. EL ALTO, PAMPAS DE MAJES"

PRESENTADO POR:	BACH. VICTOR VOLTAIRE MONTOYA COLONNA		
TITULO DEL PLANO:	UBICACIÓN GENERAL		
ASESOR:	DR. JORGE SOTO VASQUEZ	FECHA: 15/01/2019	PLANO: 01
UBICACIÓN:	SECTOR EL ALTO - AREQUIPA	ESCALA: INDICADA	

Plano 1: Plano de ubicación general.

1.10 CLIMA

La zona de estudio posee un clima seco y árido con una permanente escasez de precipitaciones durante el año (Fuente SENAMHI). La estación Meteorológica automática EMA PAMPA DE MAJES es la más cercana a la zona de estudio y se ubica aproximadamente a 4.5 Km al NO del sector El alto. (SENAMHI, s.f.)

1.10.1 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA SEGÚN KOPPEN-GEIGER

La clasificación climática de Köppen fue creada en 1900 por el científico ruso de origen alemán Wladimir Peter Köppen que posteriormente modificó en 1918 y 1936. Consiste en una clasificación climática mundial que identifica cada tipo de clima con una serie de letras que indican el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones que caracterizan dicho tipo de clima. Ver Figura N° 1.

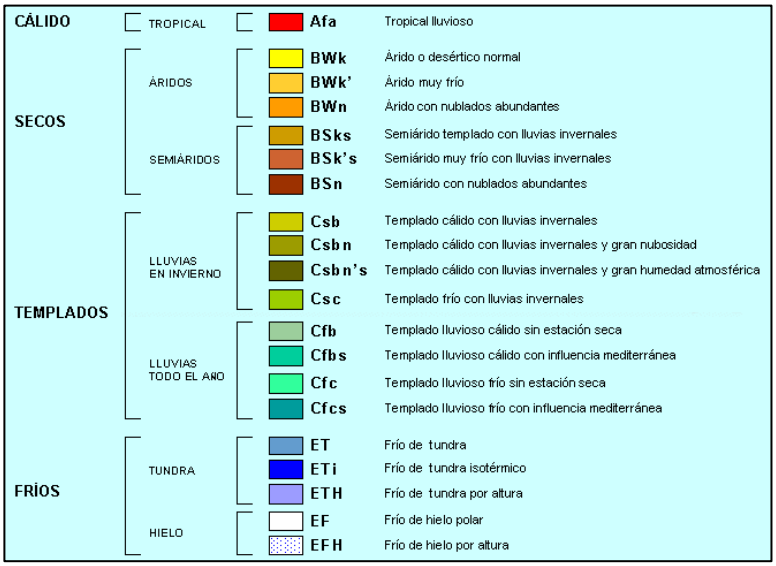


Figura 1: Clasificación climática según Köppen-Geiger (Clasificacion Climatica segun Koppen-Geiger, s.f.)

La clasificación climática para esta zona es desértica. No hay virtualmente ninguna lluvia durante el año en el sector del Alto Siguas. La clasificación del clima de Köppen-Geiger es **BWh**. En el sector El Alto Siguas, la temperatura media anual es de 19.1 ° C. La precipitación es de 3 mm al año. (Climate-data.org, s.f.)

1.10.2 DATOS HISTÓRICOS

La precipitación es la más baja en marzo, con un promedio de 0 mm. La mayor parte de la precipitación aquí cae en enero, promediando 2 mm. (Figuras N° 2 y N° 3), donde la temperatura media es de 20.5 ° C, enero es el mes más caluroso del año. Junio es el mes más frío, con temperaturas promediando 17.5 ° C. Entre los meses más secos y más húmedos, la diferencia en las precipitaciones es 2 mm. A lo largo del año, las temperaturas varían en 3.0 ° C. (Figura N° 4).

La humedad relativa máxima promedio anual es de 81.3% y la mínima promedio anual 36.4%.

Los vientos predominantes son los Alisios, que soplan del Pacífico con dirección SO a NE y los vientos provenientes de la Sierra. Los vientos más importantes por su constancia e intensidad son los Alisios que se inician entre las 10 y 11 de la mañana intensificándose hacia el mediodía (11 a 16:30 horas), decayendo al entrar la noche. La velocidad máxima registrada es de 3.0 m/s en el mes de junio. En las madrugadas los vientos provienen de la Sierra.

Las horas de insolación son bastante altas durante todo el año (9.3 horas diarias promedio anual), con variaciones mensuales poco significativas (máximo 10.3 horas diarias en octubre y mínimo 7.7 horas diarias en marzo).

La evaporación medida en un Tanque Standard ¨A¨ arroja valores máximos de 91 mm promedio diario en noviembre y mínimo de 4.7 mm promedio diario en mayo y junio. El promedio anual es de 6.0 mm por día. (Autodema, s.f.)

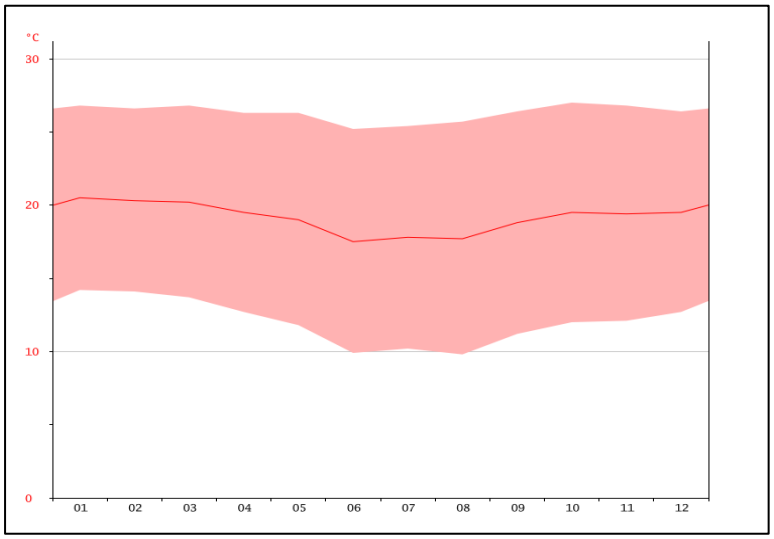


Figura 2: Climograma Alto de Majes. (Climate-data.org, s.f.)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	20.5	20.3	20.2	19.5	19	17.5	17.8	17.7	18.8	19.5	19.4	19.5
Temperatura min. (°C)	14.2	14.1	13.7	12.7	11.8	9.9	10.2	9.8	11.2	12	12.1	12.7
Temperatura máx. (°C)	26.8	26.6	26.8	26.3	26.3	25.2	25.4	25.7	26.4	27	26.8	26.4
Precipitación (mm)	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3: Tabla Climática / Datos históricos del tiempo Alto de Majes. (Climate-data.org, s.f.)

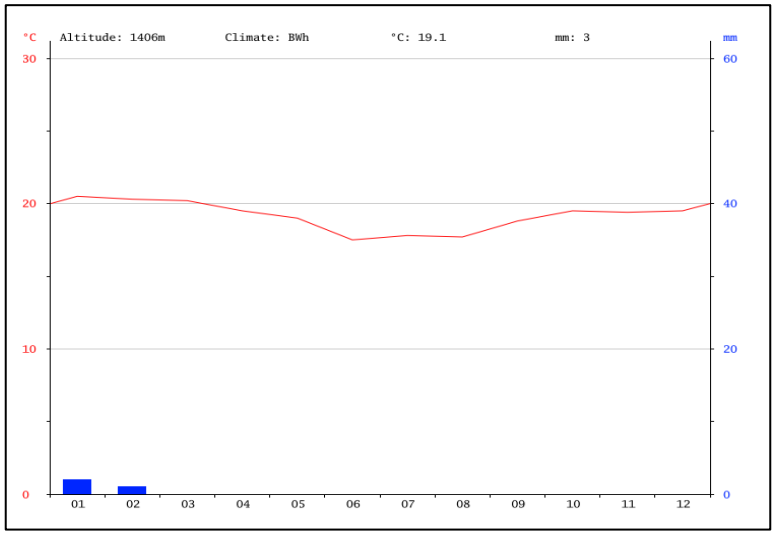


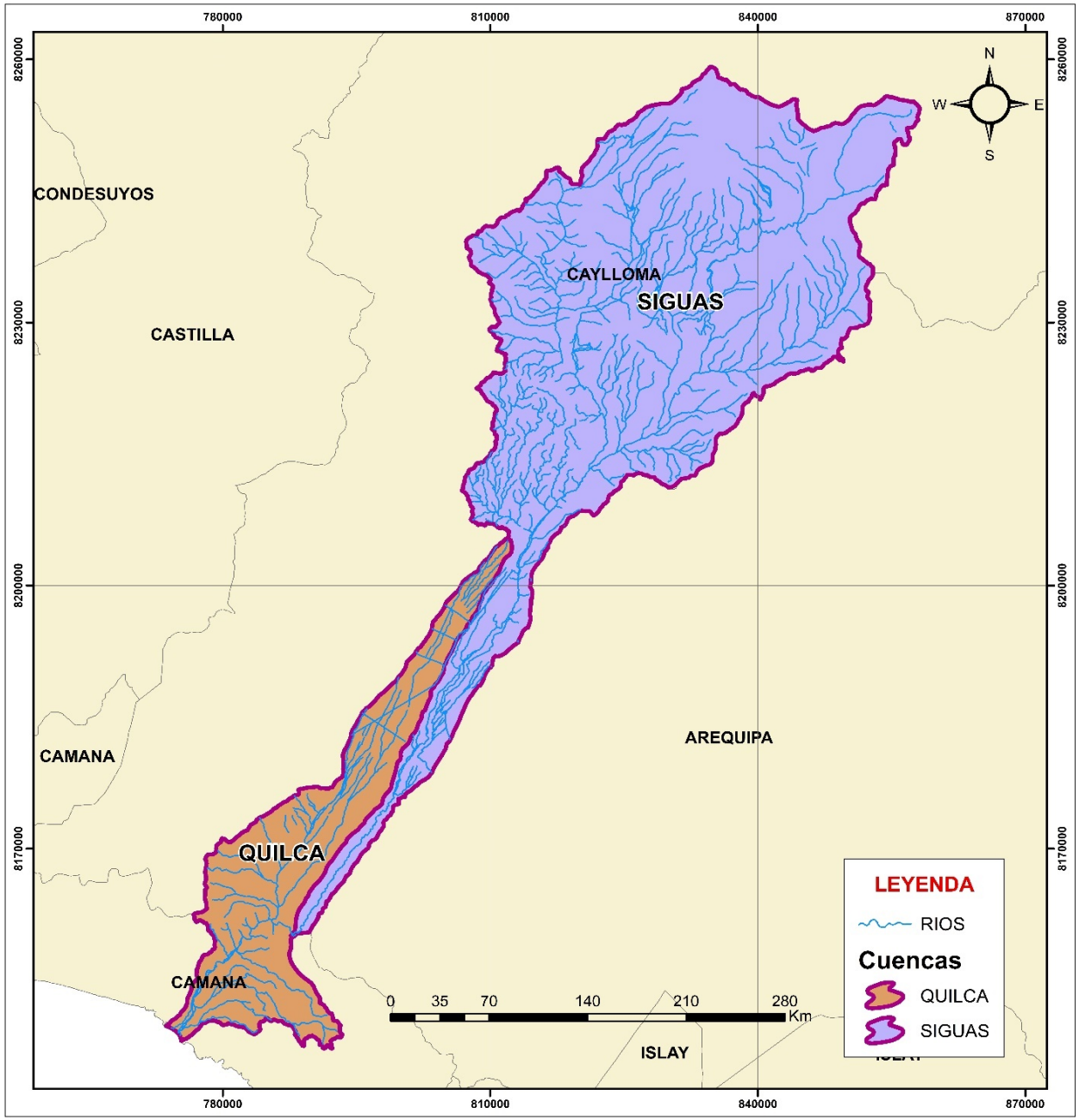
Figura 4: Diagrama de Temperatura Alto de Majes. (Climate-data.org, s.f.)

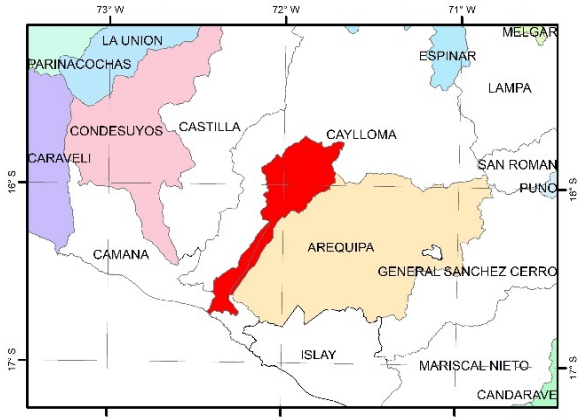
1.11 HIDROLOGÍA

La subcuenca Siguas, es parte de la hidrografía de la cuenca del río Quilca. El río Siguas al unirse con el río Vítor forma el río Quilca, que desemboca al Océano Pacifico. El río Siguas se forma al confluir los ríos Lluta y Lihualla, teniendo como fuentes de alimentación los deshielos de los nevados Ampato y Sabancaya y parte del HualcaHualca y Ananta y además, las precipitaciones pluviales de las partes altas de las cuencas.

En esta superficie se desarrolla un conjunto de drenes naturales, como quebradas, ríos, etc., algunos sirven de colectores locales, están agrupados en cuatro franjas de escorrentía superficial, dos en el lado izquierdo y otros dos en el lado derecho con respecto al nevado Ampato.

Figura 5: Cuenca del rio Siguas y Quilca. (Proyecto Majes, s.f.)





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

TESIS:
"CARACTERIZACIÓN DEL SUELO E IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TOMOGRAFIA ELECTRICA 2D. EL ALTO, PAMPAS DE MAJES"

PRESENTADO POR: BACH. VICTOR VOLTAIRE MONTOYA COLONNA		
TITULO DEL PLANO: MAPA HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA SIGUAS - QUILCA		
ASESOR: DR. JORGE SOTO VASQUEZ	FECHA: 15/01/2019	PLANO: 02
UBICACIÓN: SECTOR EL ALTO - AREQUIPA	ESCALA: INDICADA	

Plano 3: Mapa Hidrogeológico de la cuenca Siguas - Quilca

CAPITULO II

CONTEXTO GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO Y GEODINÁMICO

2.1 GEOLOGÍA LOCAL

El marco geológico local del área de estudio se encuentra dentro del cuadrángulo de Aplao (33r), según la fuente de cartografía geológica del Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), Guizado et al, 1968. Dentro de este contexto se puede describir las unidades geológicas que se encuentran ligadas directamente al área de estudio. (Guizado Jol, 1968)

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias del Paleógeno – Neógeno como la formación Moquegua compuesta por sus miembros inferior y superior respectivamente, el conglomerado aluvial pleistocénico y los depósitos recientes como se observa en la fotografía N° 1.

Fotografía 1: Formación Moquegua Inferior y Superior, conglomerado aluvial pleistocénico y depósitos recientes.

2.1.1 FORMACIÓN MOQUEGUA

La formación Moquegua (Paleógeno - Neógeno) ha sido dividida en dos miembros cartografiables: Miembro inferior Sotillo y Miembro superior Millo. (Guizado Jol, 1968)

2.1.1.1 Miembro Inferior (Ts-moi)

El miembro inferior de la formación Moquegua está compuesto a la base por arcillas arcósicas de grano medio a conglomerádico, arcillas que se intercalan con láminas de yeso y conglomerados que son abundantes y poco consolidados. (Guizado Jol, 1968)

2.1.1.2 Miembro Superior (Ts-mos)

El miembro Superior de la formación Moquegua, está compuesto por sedimentos que se encuentran distribuidos en ambos márgenes de valle de Siguas, compuesta principalmente por areniscas blanco-grisáceas de grano fino a medio y horizontes de conglomerados cuyos clastos son redondeados a sub-redondeados. Se puede observar que en el tope de esta unidad se observa un banco bien definido de tufos riolítico color blanco, compacto y de grano fino, que adquieren una coloración rosácea por intemperismo, estos bancos tienes potencias de 10 m a 20 m.

2.1.2 CONGLOMERADO ALUVIAL PLEISTOCÉNICO

Se encuentra en gran parte de las pampas costaneras, yace en discordancia con el miembro superior de la formación Moquegua y se encuentra en parte cubierto por material eólico y aluvial más reciente, está ligeramente consolidado formado por clastos redondeados a sub-redondeados de gneis, granito, riolita, traquita, andesita y cuarcita con intercalaciones lenticulares de lentes de arcillas y cenizas blanquecinas. El conglomerado aluvial pleistocénico es generalmente macizo, en otros casos con estratificación en bancos gruesos de posición sub-horizontal o suavemente inclinada al Suroeste. (Fernandez, 1998)

Fotografía 2: Conglomerado Aluvial Pleistocénico.

2.1.3 TUFOS VOLCÁNICOS CUATERNARIO

En ambos flancos del valle de Siguas se denotan restos de depósitos volcánicos consistentes de tufos blancos y rosados que descansan sobre el miembro superior de la formación Moquegua. El tufo blanco es poroso y deleznable de grano fino presentando una pequeña proporción de biotita en laminillas de 0.25 mm a 1 milímetros. No se ha podido precisar la edad de este tufo, pero cabe la posibilidad que sea equivalente al volcánico Sencca del Plioceno. (Mendivil, 1965) . Ver Fotografía N° 3.

Fotografía 3: Tufos Volcánicos del Cuaternario.

2.1.4 TERRAZAS FLUVIALES

Están constituidas por un alto porcentaje de arcilla y rodados ígneos angulosos y poco pulimentados, dicha textura evidencia que el depósito se ha formado por procesos aluviales en el curso del rio siguas.

2.1.5 COLUVIOS

Formado por los desprendimientos de los clastos del conglomerado aluvial pleistocénico, estos depósitos supra yacen al miembro superior de la formación Moquegua.

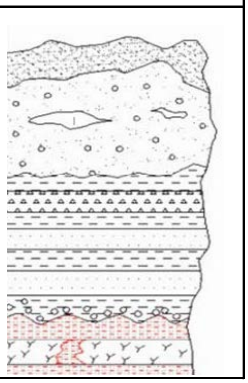
Edad		Serie	Unidades Litoestratigráficas		Descripción Litológica	Columna Estratigráfica
Era	Sistema					
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos recientes		Areniscas eólicas, coluvios, depósitos fluviales y rodados igneos	
		Pleistoceno	Conglomerado aluvial pleistocénico		Clastos consolidados sub-redondeados de gneis, graniro, riolita, andesita	
	Paleógeno - Neóge	Paleoceno Mioceno	Formación Moquegua	Superior	Areniscas blancas a grisaceas con intercalaciones de lentes de arcillas y tufos volcánicos	
				Inferior	Areniscas y arcillas rojas, conglomerados y yeso	

Figura 6: Geologia local de la zona de Aplao (33 r). (Guizado Jol, 1968)

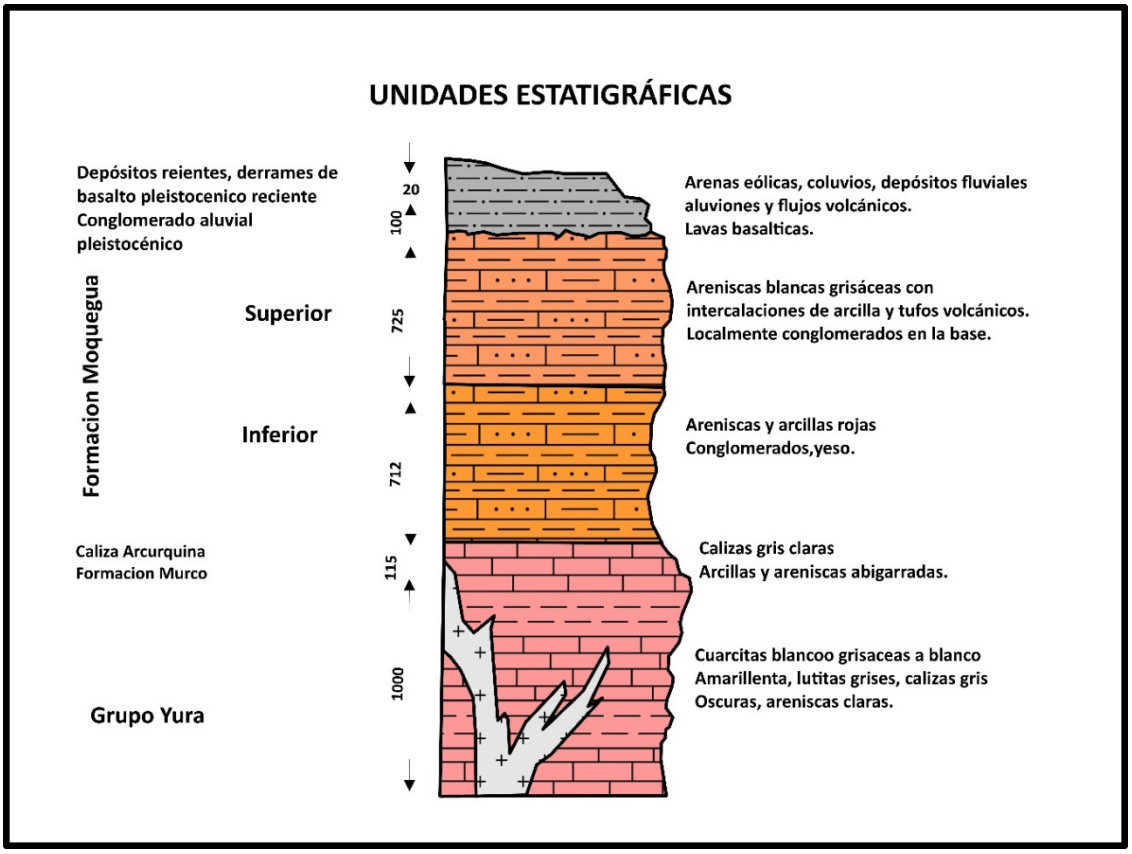
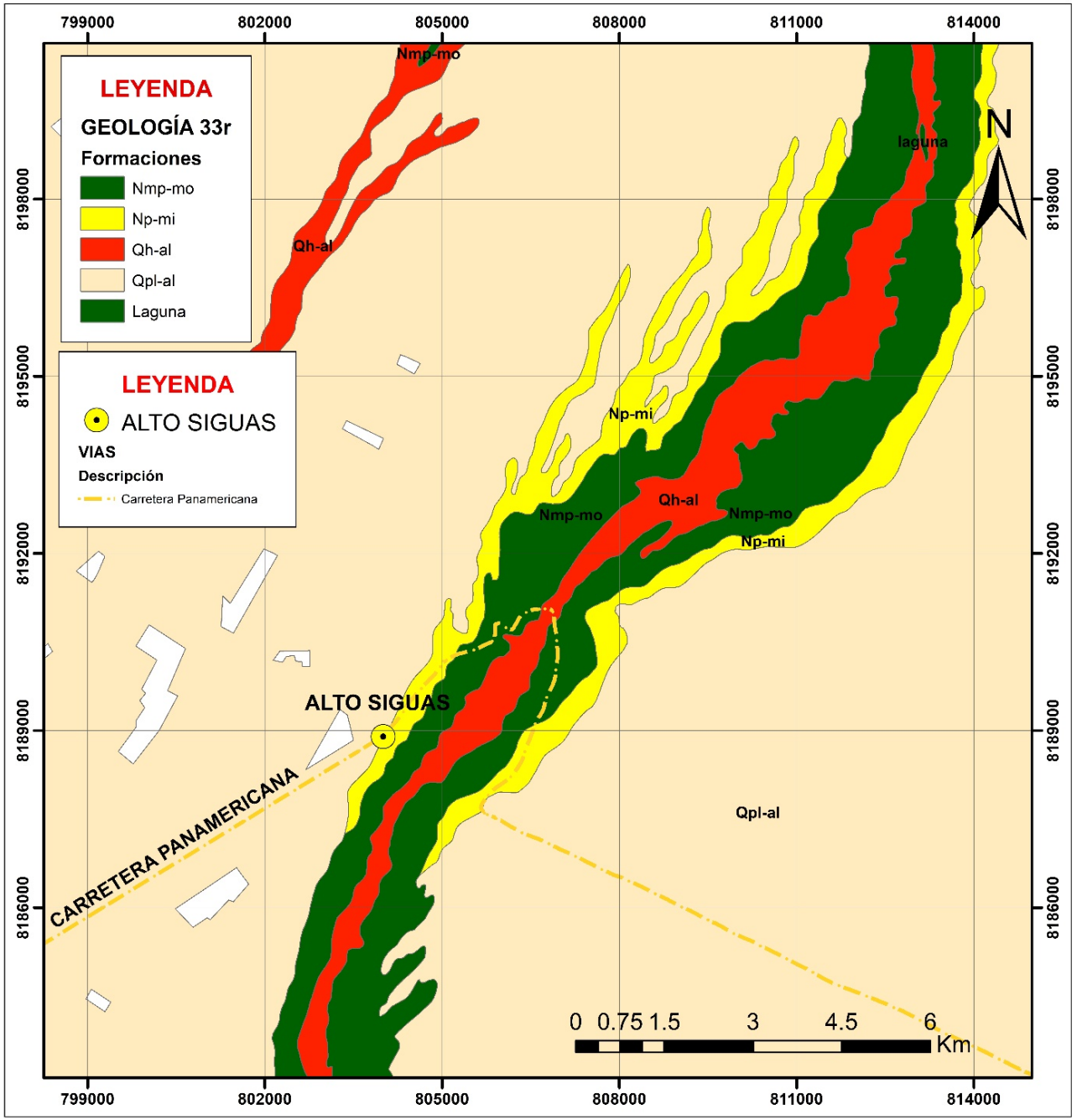


Gráfico 1: Unidades Estratigráficas de la zona de Aplao (33 r).



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

TESIS:
"CARACTERIZACIÓN DEL SUELO E IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TOMOGRAFIA ELECTRICA 2D. EL ALTO, PAMPAS DE MAJES"

PRESENTADO POR:	BACH. VICTOR VOLTAIRE MONTOYA COLONNA
TITULO DEL PLANO:	MAPA GEOLÓGICO DEL CUADRANGULO DE APLAO 33r
ASESOR: DR. JORGE SOTO VASQUEZ	FECHA: 15/01/2019
UBICACIÓN: SECTOR EL ALTO - AREQUIPA	ESCALA: INDICADA
	PLANO: 03

Plano 3: Mapa geológico del cuadrángulo de Aplao 33r

2.2 GEOMORFOLOGÍA

El cuadrángulo de Aplao (33-r) abarca aproximadamente 3000 Km, la zona de extensión, desde el punto de vista geológico es importante porque se encuentra en el límite de dos grandes sectores que se contrastan por su topografía. El sector Suroccidental, es el mayor y cuya topografía es llana y forma parte de la unidad descrita como planicie costanera y el sector Nororiental, topografía abrupta que constituye parte del flanco andino occidental. (Guizado, 1968)

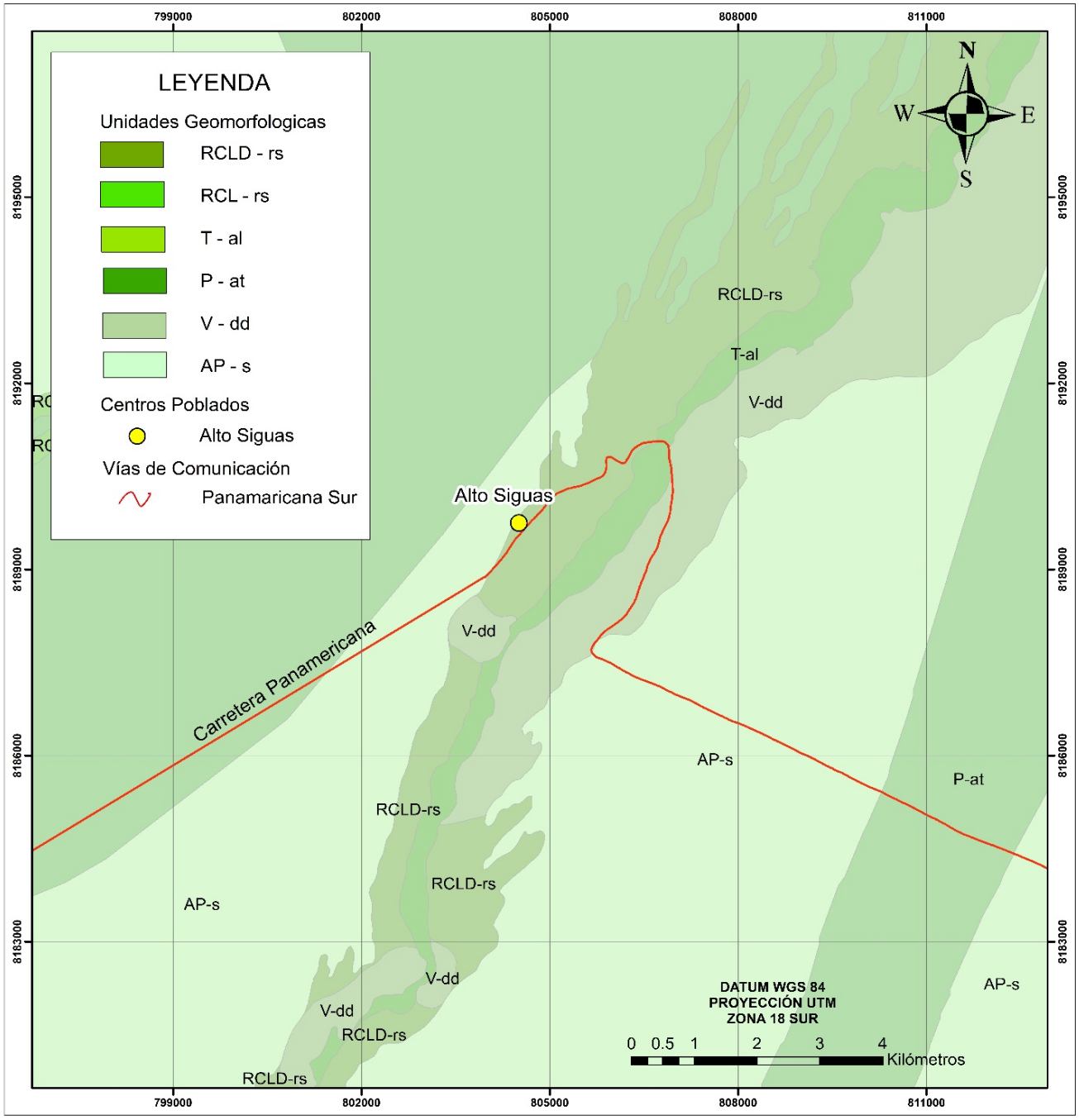
Morfoestructural mente, la mayor parte de la zona de estudio se encuentra dentro de la planicie costanera. Las características que se han considerado para diferenciar las unidades morfológicas locales fueron: altitud sobre el nivel del mar, relieve y tipo de roca que aflora. Como resultado se han diferenciado 3 unidades geomorfológicas (Plano N° 4).

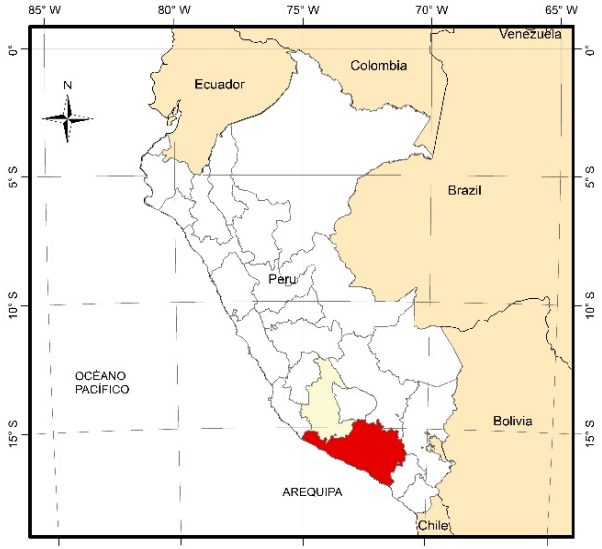
2.2.1 PLANICIE SEDIMENTARIA

La planicie sedimentaria o llanura tiene una cota media de 1400 m.s.n.m. hallándose la mayor altura en los declives montañosos de del flanco occidental y la menor cota hacia la cordillera de la costa. Bajo los aluviones cuaternarios de la planicie sedimentaria, se halla una amplia superficie erosional labrada sobre la formación Moquegua, referida por Jenks en la hoja de Arequipa como pedimento de Vitor.

2.2.2 TERRAZAS ALUVIALES

Formadas principalmente por el cauce del rio siguas, dejando a su paso plataformas y mesetas constituidas por los propios sedimentos del rio Siguas, depositados al lado del cauce principal, en lugares de menor pendiente.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

TESIS:
"CARACTERIZACIÓN DEL SUELO E IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TOMOGRAFIA ELECTRICA 2D. EL ALTO, PAMPAS DE MAJES"

PRESENTADO POR:	BACH. VICTOR VOLTAIRE MONTOYA COLONNA
TITULO DEL PLANO:	MAPA GEOMORFOLÓGICO DEL CUADRÁNGULO DE APLAO 33r
ASESOR: DR. JORGE SOTO VASQUEZ	FECHA: 15/01/2019
UBICACIÓN: EL ALTO - AREQUIPA	ESCALA: INDICADA
	PLANO: 04

Plano 4: Plano Geomorfológico del Cuadrángulo de Aplao 33r

2.3 CONTEXTO GEODINÁMICO

2.3.1 DESLIZAMIENTOS EN EL SECTOR EL ALTO

Los deslizamientos han tenido una actuación muy importante en el desarrollo del valle de Siguas en los últimos años, estos deslizamientos se han venido produciendo probablemente por la infiltración de las aguas que se usan para el riego de las parcelas, las mismas que actúan sobre el conglomerado aluvial pleistocénico de naturaleza permeable hasta alcanzar las areniscas feldespáticas con niveles de yeso y arcillas del miembro superior de la formación Moquegua, estas se comportan como semi-impermeables y una vez saturadas de agua se forma un nivel freático; además las areniscas feldespáticas con matriz arcillosa facilitan la formación de una pasta que sirve como lubricante al contacto con la capa impermeable compuesta de arcillas. (Medina Gallegos, 2015)

Las filtraciones a través de las unidades litológicas presentes en la zona como el conglomerado aluvial pleistocénico con matriz arenosa y continua sobre los estratos subyacentes del miembro superior de la formación Moquegua conformado por areniscas con intercalaciones de arcilla y de tufos volcánicos que se comportan como una capa permeable que al llegar a niveles arcillosos, estos impiden que el agua infiltre, se acumula gua dando paso a un nivel freático, cuya humedad producto de la filtraciones se exponen aguas abajo del margen derecho del curso del rio Siguas. Después que este proceso interviene se pierde el grado de cohesión entre las partículas dando como resultado la inestabilidad de las laderas (Derrumbes y deslizamientos). En las Figura N° 6 y 7 se puede apreciar una representación pre y post deslizamiento del sector el Alto, todo el volumen de suelo deslizado se aproxima a un volumen de 1 500 000 m^3 de suelo y agua producto de las filtraciones.

2.3.2 FILTRACIONES

El uso desmedido de recursos hídricos debido al riego por gravedad y aspersión utilizados en la Irrigación del proyecto Majes – Siguas I etapa, es posible que haya provocado la inestabilidad de las laderas y que haya motivado a la generación de filtraciones que se exponen en la parte inferior del talud de la margen derecha aguas abajo del rio Siguas. Ver Figura N° 07 y 08.

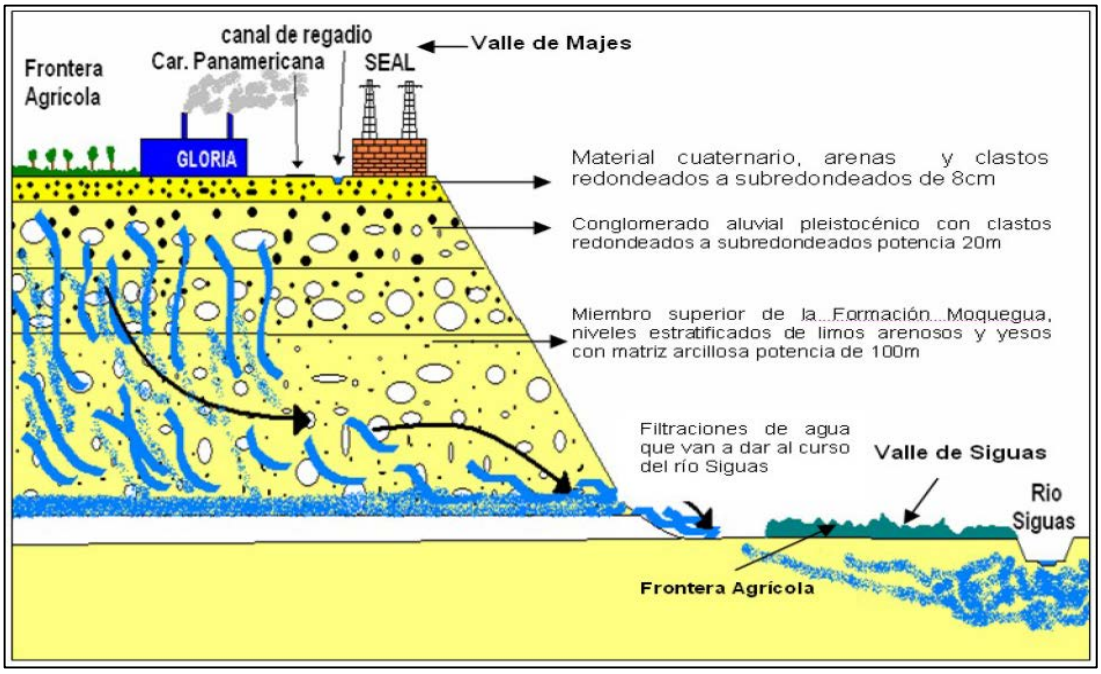


Figura 07: Esquema que muestra la zona antes del deslizamiento en el valle de majes y tiene repercusion en el valle de Siguas. (Medina Gallegos, 2015)

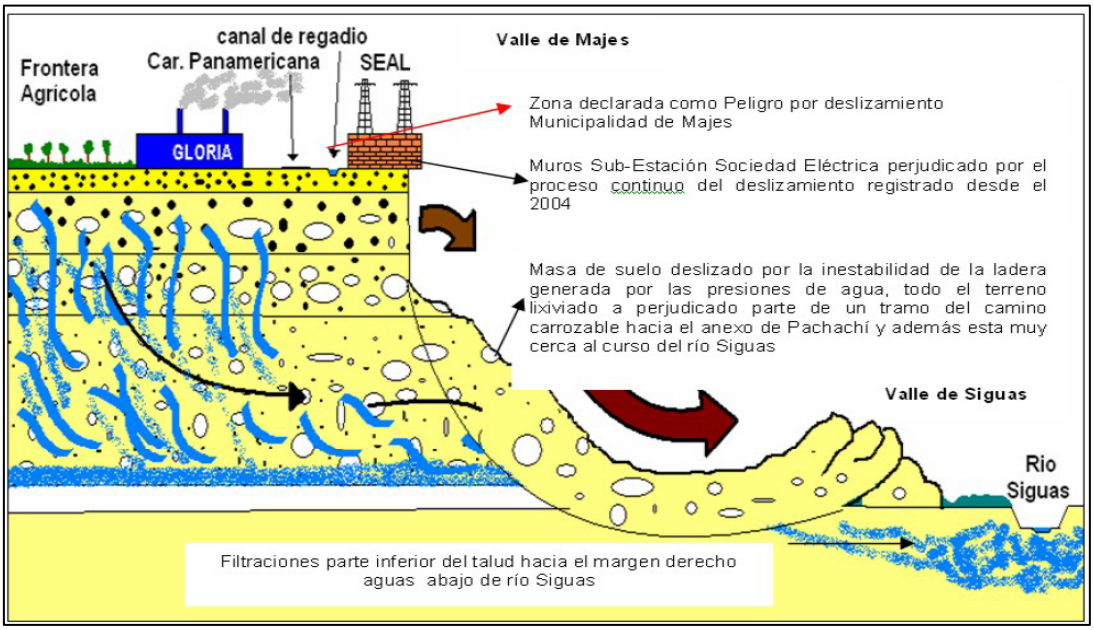


Figura 08: Esquema que muetsra la zona despues del deslizamiento esta cerca a la sub-Estacion Sociedad Electrica y la localidad de El Alto en el Valle de Majes y repercute en el valle de Siguas. (Medina Gallegos, 2015)

Plano 5: Mapa de la zona de estudio y zona de deslizamiento "El Zarzal"

2.4 DEZLIZAMIENTOS

Con la finalidad de establecer las bases para la interpretación geológica de las secciones eléctricas, a continuación, se describen los mecanismos y tipos de deslizamientos más habituales; haciendo énfasis en el tipo de deslizamiento estudiado dentro de los deslizamientos de tipo translacional. Las laderas son zonas de la superficie de la tierra donde suelen afectar en mayor grado los procesos erosivos (geodinámicos y/o climáticos) y su relieve tiende a modificarse para buscar un nuevo equilibrio exigido por dichas variaciones. En este contexto, los movimientos de ladera pueden entenderse como reajustes del terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones (Gonzales de Vallejo, 2002). En general un movimiento de ladera, o landslides (Sharpe, 1938), es un movimiento en la vertiente del terreno que implica el arrastre de algún tipo de material como rocas, sedimentos, derrubios… ladera abajo debido a la acción de la gravedad. El mecanismo de desplazamiento puede ser muy diferente, desde la caída libre de material hasta el lento desplazamiento de una montaña (Cruden, 1996).

Los movimientos de ladera están entre los primeros riesgos naturales del mundo en cuanto a víctimas mortales, y provocan daños materiales severos. De modo que su estudio, entendido como riesgo geológico, es de vital importancia. En España los deslizamientos suelen ser de importancia moderada si se comparan con los grandes deslizamientos de otros países; donde hay implicadas grandes extensiones de masas asociadas a cadenas montañosas importantes (Nevado del Ruíz en Colombia, presa de Vajont en Italia). Aun así, estos deslizamientos moderados deben ser tenidos en cuenta para la planificación territorial, tanto urbanística como para la implementación de infraestructuras (Llorens, 2009)

En términos de clasificación, los movimientos de ladera se engloban en varios tipos: deslizamientos, desprendimientos, flujos, avalanchas y desplazamientos laterales. Este estudio se centra en los deslizamientos que se definen como desplazamiento pendiente abajo debido al efecto de la gravedad, sobre una o varias superficies de rotura, de los materiales que componen la ladera. En un deslizamiento la masa de tierra se desplaza generalmente como un conjunto y su velocidad es muy variable. Entre las causas más comunes de este fenómeno se encuentran los terremotos, las lluvias y la actividad humana, que rompe el equilibrio del sistema.

La distinción entre los distintos tipos movimientos de ladera es importante debido a que su morfología y origen determina los análisis de estabilidad y el diseño de medidas de control y estabilización (Corominas, 2004). Concretamente los deslizamientos se quedan englobados en dos grupos: los deslizamientos rotacionales y los deslizamientos traslacionales.

2.4.1 DEZLIZAMIENTO ROTACIONAL (ROTATIONAL SLIDE)

Este tipo de deslizamiento suele ser el más frecuente de encontrar en suelos cohesivos 'homogéneos' y en macizos rocosos fuertemente fracturados. En estos casos se produce una rotura a lo largo de una superficie curvilínea o cóncava, que puede ser superficial (1 ó 2 metros) o profunda (varios metros), situándose el límite en torno a los 10 metros. El terreno, al iniciarse la inestabilidad, experimenta una rotación según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa deslizada. La masa puede dividirse en varios bloques que se deslizan entre sí dando lugar a unos 'escalones', dando lugar a que la masa de la cabecera efectúe una inclinación contra ladera, donde pueden acumularse unos factores desencadenantes de reactivaciones como es el agua o el hielo. La literatura distingue tres modelos diferentes de deslizamientos rotacionales (Figura N° 9). Mientras que el deslizamiento simple y el deslizamiento múltiple puede darse en casi cualquier suelo (mientras sea cohesivamente homogéneo), el deslizamiento sucesivo sólo suele darse en arcillas duras fisuradas con pendientes cercanas a su equilibrio o en arcillas blandas muy sensitivas, donde el primer deslizamiento da lugar a una acumulación de arcilla remoldada que fluye y deja sin sustento al material superior de la ladera, provocando sucesivas roturas. (Corominas, 2004) (Gonzales de Vallejo, 2002)

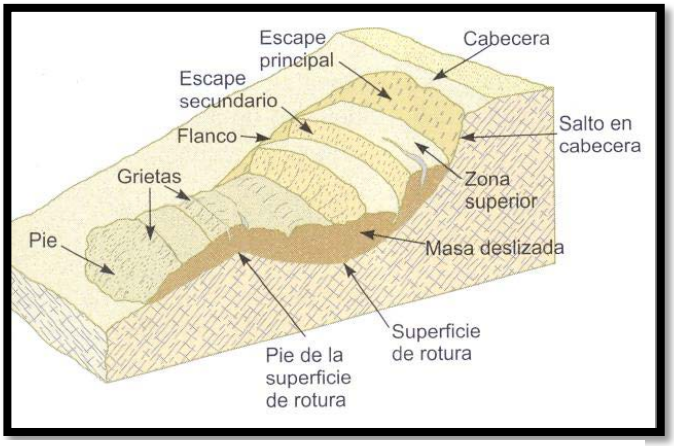


Figura 09: Esquema de un deslizamiento rotacional y partes de este (modificado de Vames. 1988). (Gonzales de Vallejo, 2002)

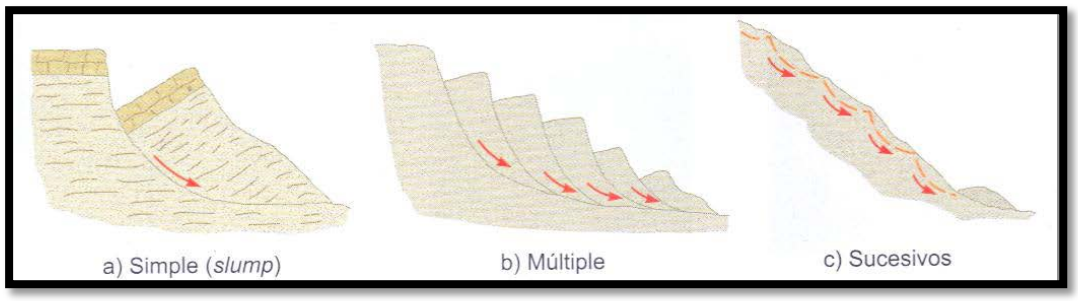


Figura 10: Tipos de deslizamientos Rotacionales. (Gonzales de Vallejo, 2002)

Con respecto a sus dimensiones, estos deslizamientos pueden variar entre decenas y centenares de metros tanto en longitud como en amplitud. Como puede verse en la imagen anterior, la parte inferior de la masa se acumula en el pie del deslizamiento en forma de lóbulo, y normalmente suele ser atravesada por algunas grietas de tracción. En algunos casos, como en presencia de materiales arcillosos, el contenido en agua o su acumulación en el deslizamiento puede hacer que el pie de éste evolucione hasta producir coladas o flujos de tierra.

Este caso de deslizamientos suele ser muy susceptible a su reactivación ya que tras producirse el deslizamiento y encontrar el equilibrio por disminución del momento de giro, cualquier modificación en el contenido de agua o eliminación de la parte inferior puede dar lugar a una nueva inestabilidad, y por consiguiente a una reactivación del deslizamiento. Por tanto, un diagnóstico equivocado de la geometría puede llevar a la adopción de medidas de estabilización ineficaces e incluso contraproducentes (Corominas, 2004).

2.4.2 DESLIZAMIENTOS TRASLACIONALES (TRASLATIONAL SLIDE)

Este tipo de deslizamientos se producen sobre una superficie de rotura plana con una cierta debilidad, ya sea por estar en contacto entre diferentes tipos de materiales o por ser una superficie de estratificación. Pueden darse tanto en suelos como en rocas, siendo la masa que se desplaza bloques que se independizaron del sustrato mediante grietas o discontinuidades (Figura N° 11). Según la clasificación aportada por Corominas se reconocen distintos tipos de deslizamientos traslacionales; cuando los bloques del suelo o roca se desplazan sin trocearse apenas, como una unidad, sobre una superficie se conoce como resbalamientos. Si la rotura por cizalla tiene lugar en suelos no cohesivos que se componen por partículas gruesas se denomina como deslizamientos de derrubios.

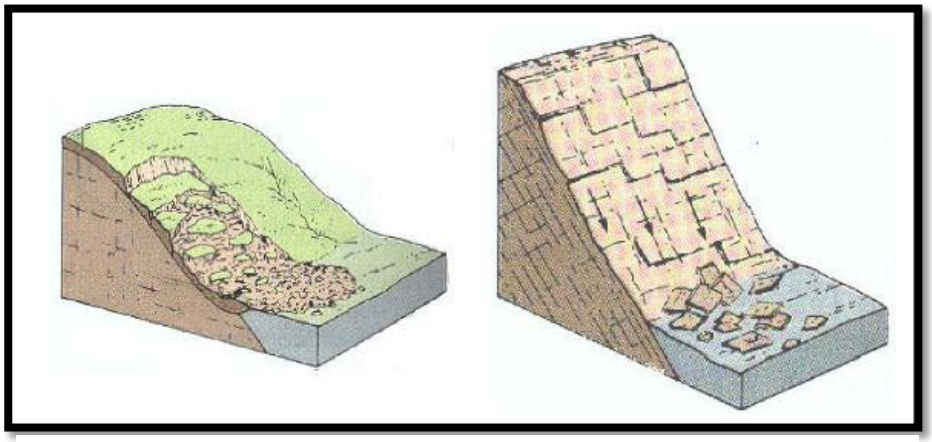


Figura 11: Esquema de un deslizamiento Traslacional. (Gonzales de Vallejo, 2002)

Estos deslizamientos suelen alcanzar grandes distancias en cuanto a longitud, pero no suelen ser demasiado profundos. Los componentes de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad y siguen trayectorias paralelas (Corominas, 2004). Mientras más progresa existe más posibilidad de rotura del deslizamiento, convirtiéndose la masa disgregada en un flujo. Generalmente, los deslizamientos traslacionales son más rápidos que los rotacionales debido a las características cinemáticas del mecanismo de rotura (Gonzales de Vallejo, 2002). Además, mientras que el movimiento de rotación influye en la restauración del equilibrio de la masa del desprendimiento, en el caso de los traslacionales la masa puede mantenerse en movimiento indefinidamente si la superficie es suficientemente inclinada.

2.4.3. CARACTERISTICAS DE LOS DESLIZAMIENTOS

2.4.3.1. FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DELTERRENO:

Factores internos. Son aquellos que condicionan las diferentes tipologías de deslizamiento, los mecanismos y los modelos de rotura. Para ello hay que considerar las características propias del material, las características propias de la ladera y las condiciones ambientales influyentes. Dentro de las primeras se incluyen parámetros como la litología, textura del material, consolidación y espesor de los materiales, y parámetros estructurales relativos a planos de debilidad. Dentro de las otras características se encuentran aspectos morfológicos como el relieve, la pendiente, sus discontinuidades y su orientación, que se relaciona con la humedad. El análisis de factores ambientales consiste fundamentalmente en la valoración estacional de la pluviometría, la temperatura y los tipos de vegetación

Factores Externos. Son aquellos que actúan sobre el material y dan lugar a modificaciones en las condiciones iniciales de las laderas, provocando roturas al romper la estabilidad debido a las variaciones que producen. Estas variaciones se deben principalmente a tres factores: la infiltración de agua, las vibraciones y la actividad humana. La infiltración de agua provoca el aumento de la presión intersticial por lo que se disminuye la resistencia de los materiales, además de influir en el nivel de agua subterránea lo cual está relacionado positivamente con el número de deslizamientos. Las vibraciones provocan aceleraciones del terreno favoreciendo la aparición de roturas y grietas, que pueden ser debido a terremotos o explosiones artificiales. Finalmente, la actividad humana también es influyente porque altera el equilibrio mediante cargas estáticas de construcciones, o mediante cambios en la vegetación, repoblaciones o incendios forestales. (Corominas, 2004)

2.5 FALLAS Y FRACTURAS

Las discontinuidades estructurales son definidas por su longitud, orientación, tasa de cambio y de desplazamiento. Se clasifican de acuerdo con su desplazamiento ya sea de apertura, corte o cierre, y se les conoce como grietas, fallas o cavidades. Las superficies o planos de discontinuidad de las rocas o macizos rocosos condicionan de una forma definitiva sus propiedades y comportamiento mecánico e hidráulico. Muestran un carácter no continuo y anisótropo en los macizos, haciéndolos más deformables y débiles.

Representan planos preferentes de alteración, meteorización y fractura, y algunas veces permiten el flujo del agua. Su reconocimiento, descripción y caracterización es fundamental para el estudio del comportamiento mecánico e hidrológico de macizos rocosos. La estabilidad de las rocas dependerá de la orientación y de la resistencia de éstas. (H.K., 2003)

El término de discontinuidad estructural hace referencia a cualquier plano de separación en el macizo rocoso, pudiendo tener origen sedimentario, como las superficies de estratificación, diagenético (desecación), ígneo como el caso del enfriamiento de cuerpos de magma y/o lava o tectónico.

Las juntas son los planos de discontinuidad más frecuentes en los macizos, y corresponden a superficies de fractura de la roca a favor de las cuales no ha habido desplazamiento o ha sido muy pequeño. Afectan a cualquier tipo de roca.
Las fracturas particularmente son importantes en el almacenamiento ya sea agua o aceite ya que es en ellas donde se almacenan estos recursos naturales para su uso, sin embargo, estas serán enfocadas en este caso a posibles afectaciones estructurales o futuras excavaciones.

Las fallas son discontinuidades particulares que corresponden a planos de ruptura con desplazamiento relativo entre los bloques. La extensión de las fallas puede variar entre algunos metros y centenares de kilómetros. Pueden estar asociadas a zonas de debilidad denominadas zonas de fallamiento o brechas, en las que en ocasiones no se pueden distinguir. (Jacson, 1980)

Las técnicas geofísicas pueden ser usadas para localizar estas discontinuidades haciendo uso del contraste en propiedades físicas y el medio que las contiene. Los métodos geofísicos son particularmente necesarios para identificar ya sea una sola fractura o de familias que pueden o no estar interconectadas en un área específica y a profundidad variable. (Udiaz, Fundamentos de geofisica, 1997)

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 MÉTODO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERT)

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad a detalle, basado en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas). La disposición de este método en campo se ha convertido en una herramienta de investigación no destructiva y de fácil empleo gracias al avance instrumental de nuestra época.

El propósito del método de tomografía eléctrica y el de los estudios de resistividad en general es determinar la distribución de la resistividad del subsuelo mediante mediciones en superficie, ver **Figura N° 12.** Estas mediciones nos ayudan a estimar indirectamente la resistividad aparente del terreno y gracias a las técnicas de procesamiento e inversión de datos geofísicos se puede estimar la verdadera resistividad del subsuelo. La resistividad del suelo está relacionada con varios parámetros geológicos como los contenidos minerales, porosidad, grado de saturación de agua de las rocas, etc.

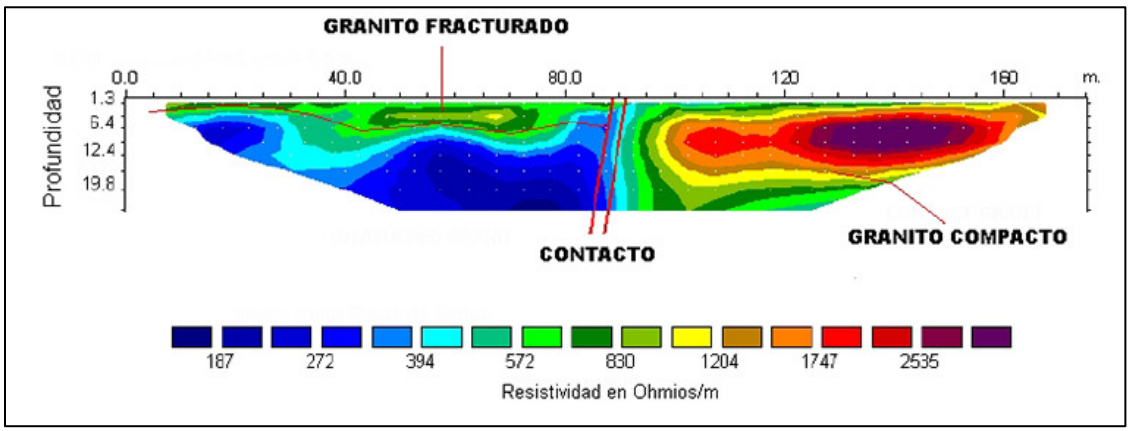


Figura 12: Línea de Tomografía Eléctrica interpretada. (Geoperfo, s.f.).

3.1.1 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS

Las rocas son analizadas a través de los métodos eléctricos de prospección y entre ellos el método de tomografía eléctrica se encarga de inyectar un flujo de corriente eléctrica al terreno, este flujo de corriente puede propagarse en todas las direcciones atravesando rocas y minerales de tres notables maneras, a través de una conducción **electrónica u óhmica** donde los electrones fluyen libremente dentro de una estructura cristalina del material, lo cual se presenta principalmente en los metales o los yacimientos metálicos masivos; por conducción **electrolítica** donde la corriente es transportada por los iones libres en soluciones salinas, a una velocidad lenta, los iones se transportan principalmente por los espacios porales que interconectan los suelos permeables, por los sedimentos no consolidados y por las rocas a través de las fracturas que estas presenten. Finalmente, por conducción **dieléctrica**, esto ocurre en los conductores pobres, materiales poco conductores o aislantes donde la presencia de un campo eléctrico externo produce un pequeño desplazamiento de los electrones atómicos respecto del núcleo, produciéndose un efecto conocido como "polarización eléctrica" que genera unas corrientes denominadas "corrientes de desplazamiento" (Telford W. G., 1990)

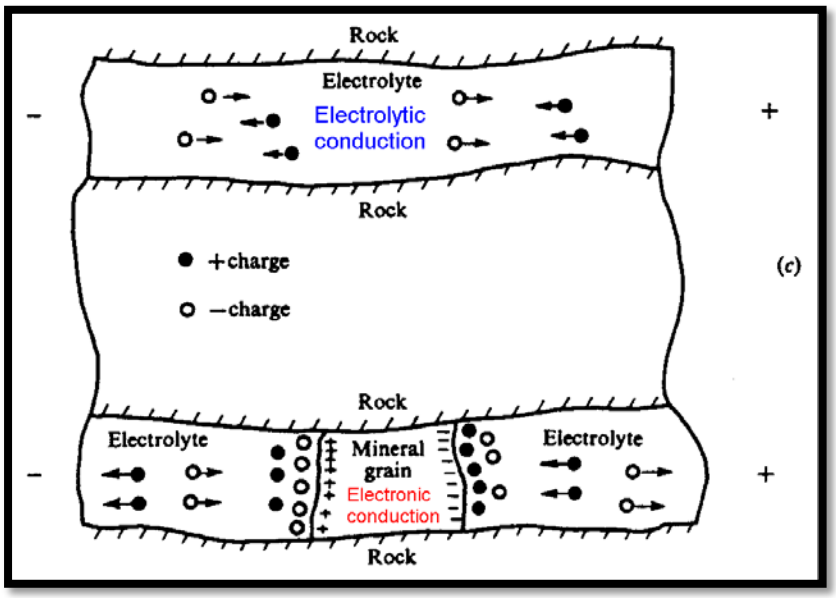


Figura 13: Tipos de conducción de la corriente. (Porras, 2018)

La resistividad de las rocas depende fundamentalmente de la porosidad y de la conductividad de los fluidos que estén albergados en estas, por lo que no se le puede atribuir un valor único y por consiguiente es que los valores de resistividad de las rocas tienen rangos mucho mayores que otras propiedades cuantificables mediante otros métodos geofísicos.

Como principal consideración las rocas ígneas y metamórficas poseen los valores más altos de resistividad, seguido por las rocas sedimentarias y suelos. La resistividad de la mayoría de suelos depende del contenido de agua, así mismo la resistividad de suelos saturados depende principalmente de la concentración de sales disueltas. El agua fresca tiene una resistividad de 10 a 100 Ohm-m por el contrario el agua de mar tiene una resistividad alrededor de 0.2 Ohm-m, el agua salobre tiene una resistividad aproximada de 1 a 10 Ohm-m. La resistividad de los suelos depende principalmente de la porosidad, el contenido de fluidos y la cantidad de arcillas (10 – 1000 Ohm-m) la resistividad decrece al incrementar el contenido de arcilla (1 – 10 Ohm-m) para suelos y sedimentos con bajo contenido de arcilla la conducción de la corriente se distribuye principalmente a través de los fluidos que rellenan los poros de los suelos. La resistividad en rocas sedimentarias es generalmente grande comparado con los suelos, debido que la compactación y la litificación reducen la porosidad, en el caso de rocas clásticas la resistividad está sujeta a la porosidad y la conductividad de los fluidos que los poros albergan. Rocas ígneas y metamórficas tienen típicamente altas resistividades sobre los 1000 Ohm-m. La resistividad en este tipo de rocas depende fundamentalmente del grado de fracturación de la roca y del porcentaje de fracturas rellenadas por agua. Ver Figura N° 14. (Loke M. , 1999)

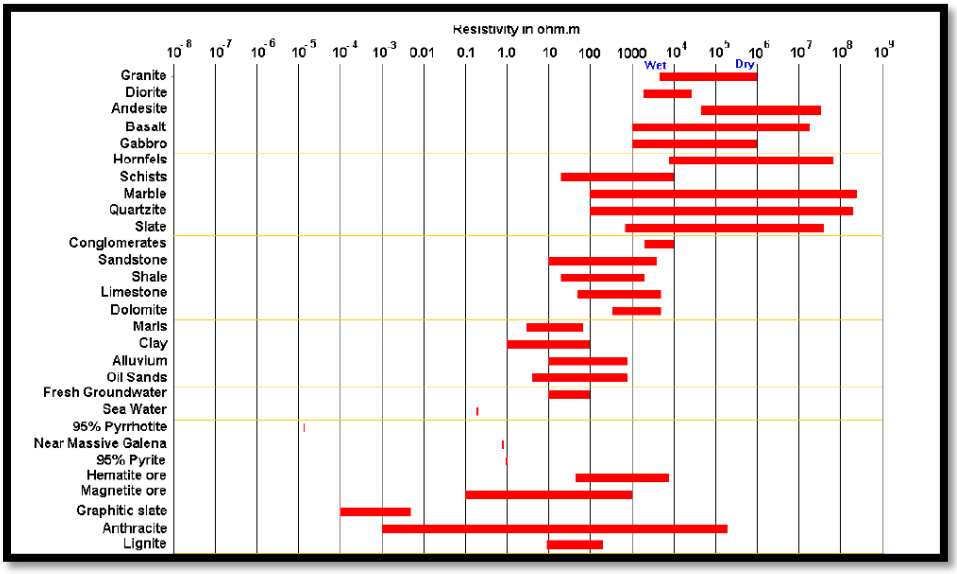


Figura 14: Tabla de resistividades de Loke. (Loke M. , 1999)

Tabla 1. *Resistividad de algunas rocas comunes, minerales y substancias químicas*		
Material	Resistividad (Ω.m)	Conductividad (S/m)
Rocas ígneas y metamórficas		
Granito	$5x10^3 – 10^6$	$10^{-6} – 2x10^{-4}$
Basalto	$10^3 – 10^6$	$10^{-6} – 10^{-3}$
Pizarra	$6x10^2 – 4x10^7$	$2.5x10^{-8} – 1.7x10^{-3}$
Mármol	$10^2 – 2.5x10^8$	$4x10^{-9} – 10^{-2}$
Cuarcita	$10^2 – 2x10^8$	$5x10^{-9} – 10^{-2}$
Rocas sedimentarias		
Areniscas	$8 - 4x10^3$	$2.5x10^{-4}$ - 0.125
Esquistos	$20 - 2x10^3$	$5x10^{-4}$ - 0.05
Limolitas	$50 - 4x10^2$	$2.5x10^{-3}$ - 0.02
Suelos y aguas		
Arcilla	1 - 100	0.01- 1
Aluvio	10 - 800	$1.25x10^{-3}$ - 0.1
Agua subterránea (dulce)	10 - 100	0.01- 0.1
Agua de mar	0.2	5
Substancias químicas		
Hierro	$9.074x10^{-8}$	$1.102x10^7$
0.01 N Cloruro de potasio	0.708	1.413
0.01 N Cloruro de sodio	0.843	1.185
0.01 N Ácido acético	6.13	0.163
Xileno	$6.998x10^{16}$	$1.429x10^{-17}$

Figura 15: Tabla de resistividades de Telford. (Telford, 1990)

3.1.2 FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA PROSPECCIÓN ELÉCTRICA

La prospección eléctrica se fundamenta en la investigación de la distribución de la resistividad del subsuelo mediante la inyección de corriente continua o alterna a través de fuentes artificiales. Ver Figura N° 16. El método se basa en la producción de un campo eléctrico de corriente continua a través de dos electrodos de corriente (A y B) donde se inyecta una cantidad de corriente determinada al subsuelo (I en mA) y se mide la diferencia de potencial eléctrico (ΔV en mV) que se mide con dos electrodos de potencial (M y N).

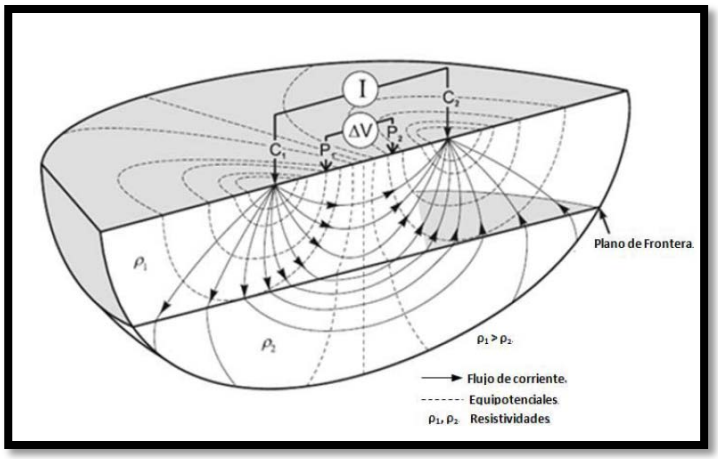


Figura 16: Distribución de Los Electrodos. Tomada de (Patzelt, Kottmann, & Waldohor, 2007) (Betancourt, 2017)

3.1.2.1 RESISTIVIDAD

Dado un volumen de material cualquiera, su resistencia al paso de corriente será proporcional a una cantidad llamada Resistividad Eléctrica (ρ), (ver Figura N° 17) que depende de la composición de la muestra, y a su longitud (l) pero inversamente proporcional a su sección transversal (s). Ver ecuación (3.1). (Orellana, Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, 1972)

$$R = \rho \frac{l}{s} \qquad (3.1)$$

Dónde:

R = Resistencia (Ohm)

S = Superficie (m^2)

L = Longitud (m)

ρ = Resistividad (Ohm-m)

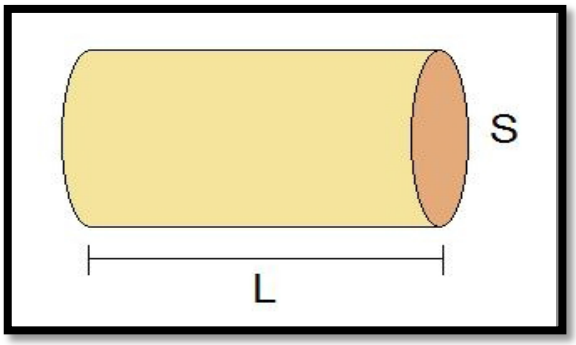


Figura 17: Resistividad Eléctrica, material homogéneo de longitud (l) y sección (s). (MI blog de electronica, 2015)

La resistividad se expresa habitualmente en Ohm metro (Ω-m). También puede definirse otra cantidad que exprese la facilidad de la transmisión de la corriente como la inversa de la resistividad. Esta magnitud se denomina Conductividad eléctrica (σ). Ver ecuación (3.2). (Orellana, Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, 1972)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \qquad (3.2)$$

Sus unidades son el Siemens/metro (S/m).

Dónde:

σ = Conductividad (S/m)

ρ = Resistividad (Ohm-m)

3.1.2.2 LEY DE OHM

Considerando un flujo de corriente a través de una muestra de material homogéneo, la densidad de corriente que pasa por ese material se relaciona con el campo eléctrico a través de la ley de Ohm.

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \qquad (3.3)$$

Dónde:

$\vec{J}$ = Densidad de corriente

$\vec{E}$ = Campo eléctrico

σ = Conductividad

Multiplicando la densidad de corriente por la sección transversal de la muestra, se obtiene la intensidad total de corriente:

$$I = \vec{J}S \qquad (3.4)$$

Dónde:

I = Intensidad de corriente (Amperios)

$\vec{J}$ = Densidad de corriente (Amperios/m^2)

S = Sección transversal (m^2)

Como el campo eléctrico$\vec{E}$ es conservatorio, puede escribirse como el gradiente de una función escalar V denominada potencial eléctrico:

$$\vec{E} = -grad\,(V) \qquad (3.5)$$

La operación gradiente equivale a formar un vector con las derivadas parciales de la función de V respecto a sus variables espaciales (x, y, z) y considerando que $\vec{E}$ tiene una sola dirección tendremos dL.

$$\vec{E} = \frac{dV}{dL} = \frac{V}{L} \qquad (3.6)$$

Entonces se tiene que la ley de Ohm:

$$V = I.R \qquad (3.7)$$

$$\overrightarrow{E}.L = R.\vec{J}.S \qquad (3.8)$$

$$\vec{E} = \frac{R.S}{L}\vec{J} \qquad (3.9)$$

$$\vec{E} = \rho.\vec{J} \qquad (3.10)$$

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}}\ (\Omega.m) \qquad (3.11)$$

Lo que lleva a la expresión de resistividad, para cuerpos isótropos donde σ y ρ son magnitudes escalares. (Udiaz, Fundamentos de Geofisica, 1997)

3.1.2.3 ECUACIÓN DE LAPLACE

Planteando la ecuación de la conservación de cargas eléctricas (ecuación 3.15) y la distribución del potencial eléctrico en un medio homogéneo, infinito e isótropo. Considerando que una fuente puntual A que emite una corriente I y crea un potencial V en un punto M (x, y, z) ver Figura N° 18. Cumple la ecuación de Laplace.

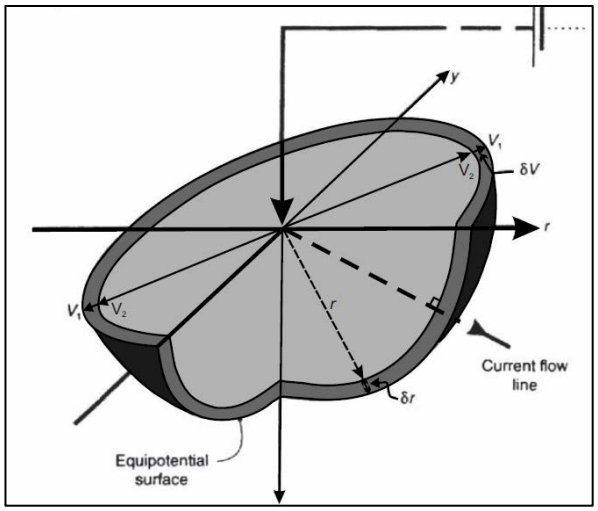


Figura 18: Distribución de la corriente en el suelo. (Udiaz, Fundamentos de geofisica, 1997)

$$\nabla^2 V = 0 \qquad (3.12)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \qquad (3.13)$$

Y sabiendo que:

$$\vec{E} = -grad\,(V) = -\nabla V \qquad (3.14)$$

$$\nabla \vec{J} = 0 \qquad (3.15)$$

Se puede escribir:

$$\nabla(\sigma \vec{E}) = 0 \qquad (3.16)$$

$$\nabla(\sigma \nabla V) = 0 \qquad (3.17)$$

Desarrollando:

$$\sigma \nabla . \nabla V + \sigma . \nabla^2 V = 0 \qquad (3.18)$$

Puesto que la conductividad es constante en el medio, el primer término de la ecuación 3.17 es nulo, entonces quedaría la expresión:

$$\nabla^2 V = 0 \qquad (3.19)$$

Por lo tanto, el potencial eléctrico satisface la ecuación de Laplace.

3.1.2.4 POTENCIAL DEBIDO A UNA FUENTE PUNTUAL

Considerando un medio homogéneo, la corriente emitida por el electrodo A sigue un camino radial a partir del electrodo, la corriente que atraviesa una superficie esférica (Ver Figura N°#) es entonces igual a:

$$\vec{J} = \frac{dI}{dS} (3.20)$$

Considerando la superficie esférica:

$$\vec{J} = \frac{I}{4\pi r^2} (3.21)$$

$$\vec{J} = -\sigma \vec{E} (3.22)$$

$$\vec{J} = -\frac{1}{\rho} \vec{E} (3.23)$$

$$\vec{J} = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dr} (3.24)$$

Igualando las ecuaciones 3.21 y 3.24 se tiene:

$$\frac{I}{4\pi r^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dr} (3.25)$$

$$dV = -\frac{\rho I}{4\pi r^2} dr \quad (3.26)$$

Integrando tenemos:

$$\int dV = -\frac{\rho I}{4\pi} \int \frac{dr}{r^2} (3.27)$$

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{r} \quad (3.28)$$

Por otro lado considerando un medio semi infinito se emplea el mismo razonamiento que anteriormente, con la única diferencia que la superficie analizada será una semiesfera. Entonces el potencial producido por un electrodo puntual de corriente A en un punto M situado a una distancia r en un medio semi infinito homogéneo de resistividad uniforme será:

Considerando la superficie semiesférica:

$$\vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} (3.29)$$

$$\vec{J} = -\sigma \vec{E} (3.30)$$

$$\vec{J} = -\frac{1}{\rho} \vec{E} (3.31)$$

$$\vec{J} = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dr} (3.32)$$

Igualando las ecuaciones 3.29 y 3.24 se tiene:

$$\frac{I}{2\pi r^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dr} (3.33)$$

$$dV = -\frac{\rho I}{2\pi r^2} dr \quad (3.34)$$

Integrando tenemos:

$$\int dV = -\frac{\rho I}{2\pi} \int \frac{dr}{r^2} (3.35)$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r} (3.36)$$

Las líneas de corriente son radiales y las superficies equipotenciales generadas son semicircunferencias. Ver figura N° 19.

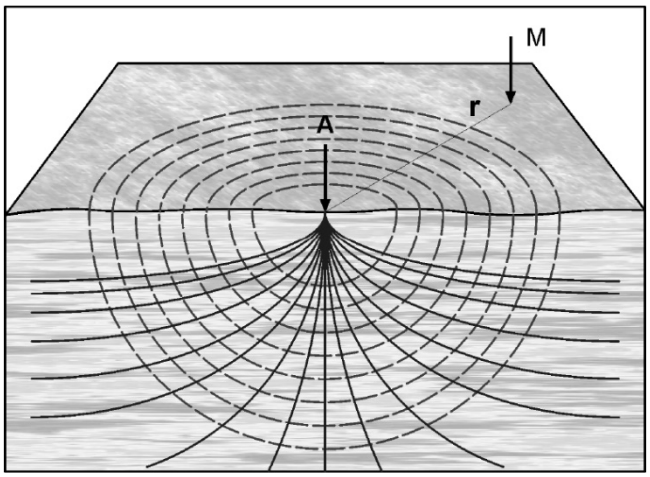


Figura 19: Lineas de corriente y lineas equipotenciales. (Orellana, Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, 1972)

3.1.2.5 POTENCIAL DEBIDO A DOS FUENTES PUNTUALES

En presencia de un electrodo de corriente A y otro de cierre B espaciados a una distancia finita entre ellos entonces el potencial medido en M (ver Figura N°#) será:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) (3.37)$$

Si se toma otro punto de medición de potencial N a una distancia finita de M se tiene:

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) (3.38)$$

La diferencia de potencial entre los puntos M y N será:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) (3.39)$$

$$\Delta V_{M-N} = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) (3.40)$$

$$\rho = \left(\frac{\Delta V}{I}\right)\left(\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}\right) (3.41)$$

La resistividad ρ del terreno viene dada por la corriente introducida a través del dipolo A y B, la diferencia de potencial medida entre el dipolo M y N y la geometría del dispositivo usado.

Al término:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

Que depende exclusivamente de la geometría de dispositivo se le denomina el factor geométrico k.

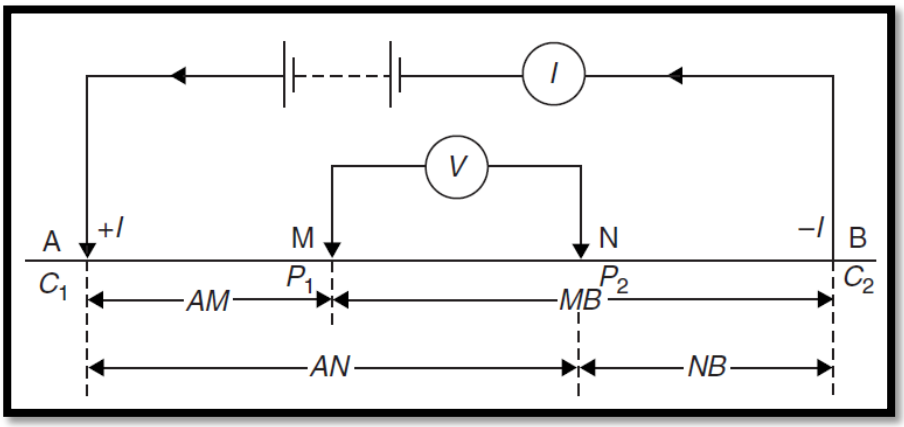


Figura 20: Potencial debido a dos fuentes puntuales.

3.1.2.6 RESISTIVIDAD APARENTE (P_A)

Se ha supuesto con anterioridad de que se trata de un terreno homogéneo e isótropo, lo que en la realidad no se cumple, por lo que al valor de resistividad medido se le denomina resistividad aparente ρ_a que se define como la resistividad de un terreno imaginario homogéneo que es equivalente al terreno real heterogéneo influenciado por la contribución de diferentes materiales (Perdomo, 2009).

3.1.3 FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

El estudio de Tomografía por Resistividad Eléctrica (ERT) (2D) o "Electrical Imaging" (Dahlin, 2001), es un método que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente.

Se estudia a lo largo de líneas en una dirección determinada, donde se inyecta una corriente eléctrica y mediante un dispositivo receptor se observa la respuesta del suelo, siendo los resultados datos de resistividades aparentes. Se caracteriza por ser una técnica de resistividad multielectródica, cuyo arreglo geométrico varía dependiendo del objetivo del estudio. Ver Figura N°21.

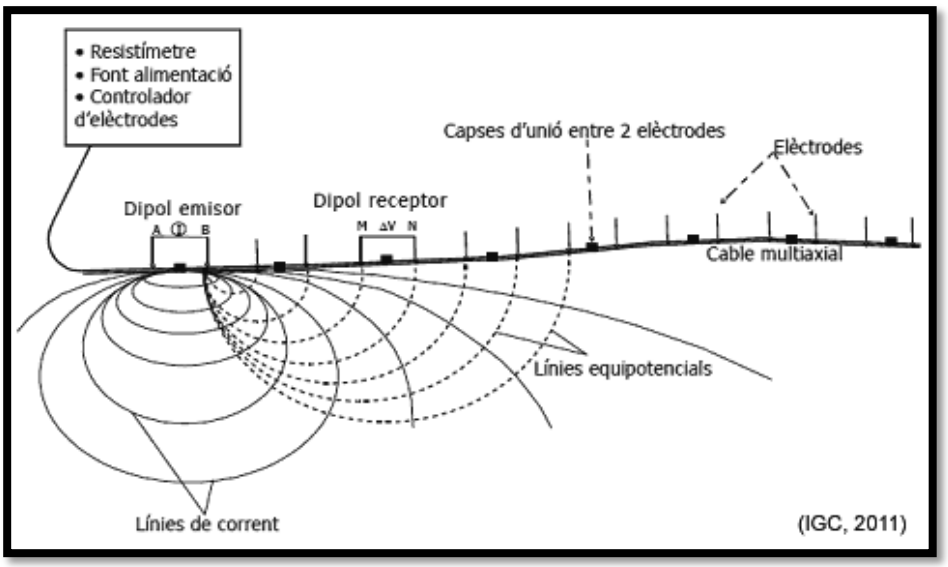


Figura 21: Arreglo geométrico multielectródica. (Dahlin T. , 2001)

Con las mediciones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D) que muestran una primera aproximación de los cambios del subsuelo. Posteriormente se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de las resistividades o imagen eléctrica. Imagen que será resultado interpretable desde el punto de vista geofísico y geológico, y que dará información sobre las características físicas del suelo. (Orellana, Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, 1982) Ver Figura N° 22.

Este método geofísico fue desarrollado para la investigación de áreas de geología compleja. Su aplicación es diversa, como la exploración de recursos naturales y actualmente numerosas aplicaciones ambientales, hidrogeológicas, arqueológicas y geotécnicas. Por ejemplo: detección y caracterización de contactos entre unidades litológicas, lecho rocoso, fracturas y fallas, cavidades subterráneas (naturales o antropogénicas), túneles, pozos abandonados, tumbas y restos arqueológicos; evaluación de sitios por la presencia de rellenos sanitarios y plumas contaminantes, deslizamientos de tierra, determinación de unidades acuíferas, niveles freáticos e intrusiones marinas. (Griffiths, 1993)

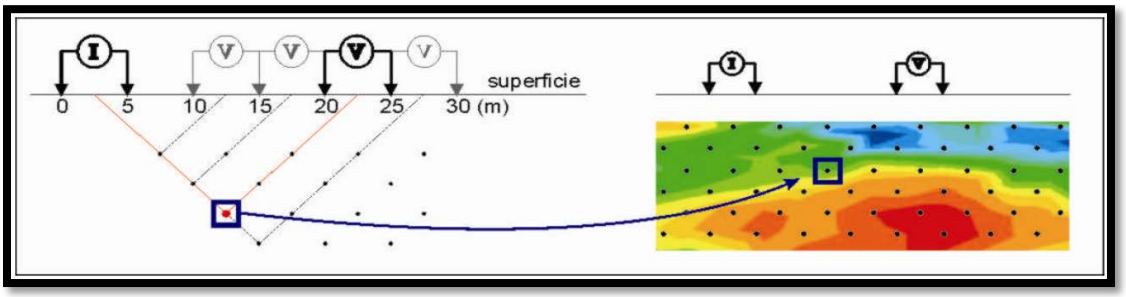


Figura 22: Representación simplificada de la tomografía eléctrica para un arreglo dipolo-dipolo. (Chavez, 2011)

3.1.4 DISPOSITIVOS GEOELÉCTRICOS

Se conoce como dispositivo geoeléctrico al conjunto de electrodos que inyectan corriente al subsuelo y registran la diferencia de potencial generado en el mismo. (Rodriguez, 2005). Los distintos tipos de dispositivos empleados en el método geoelectricos se diferencian entre sí por la distancia relativa y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. En prospección eléctrica uno de los aspectos clave para la correcta adquisición de datos es la elección del dispositivo más adecuado. Para ello las principales características que se deben considerar son (Loke M. , 1999).

- El alcance o cobertura horizontal de los datos.
- La fuerza o fortaleza de la señal.
- La profundidad de investigación del dispositivo.
- La sensibilidad del dispositivo a los cambios laterales y verticales de resistividad.

3.1.4.1 DISPOSITIVO WENNER

El arreglo Wenner “normal” o también llamado Wenner Alpha fue utilizado por primera vez por el grupo pionero de investigación de la universidad de Birmingham.

Los electrodos se mantienen equidistantes, con una longitud de dipolo de “a”, se mueven sobre una línea con la disposición AMNB, aumentando el espaciamiento “na” veces, donde “n” es el factor de separación de los dipolos o comúnmente llamado nivel de estudio. (Loke M. , 1999). Ver Figura N° 23.

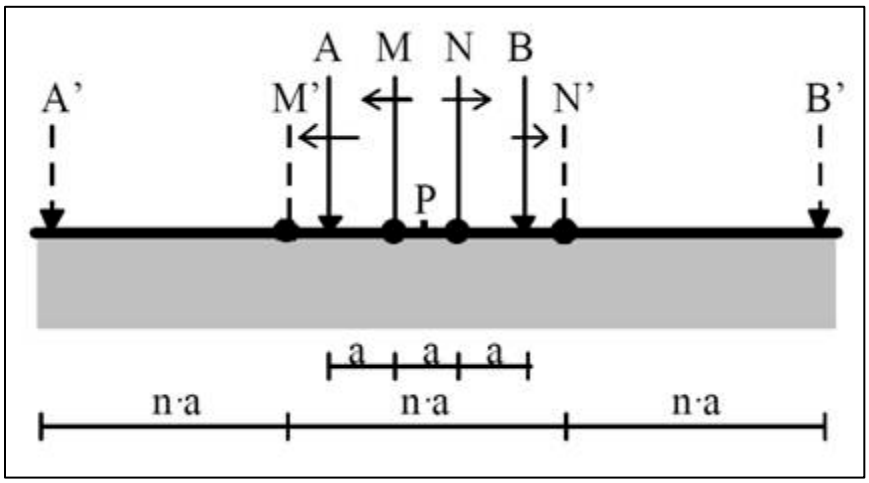


Figura 23: Esquema de configuración electródico del Dispositivo Wenner. (ANAYA, 2010)

El factor geométrico para este dispositivo es:

$$k = 2\pi a \qquad (3.42)$$

El Arreglo Wenner es relativamente sensible a cambios verticales de resistividad del subsuelo, especialmente por debajo del centro del arreglo. Sin embargo es menos sensible a cambios horizontales de resistividad. En general, este resuelve eficientemente estructuras horizontales, pero es relativamente pobre en la detección de cuerpos verticales delgados (Loke M. , 1999).

En cuanto a la profundidad de investigación media, esta es aproximadamente 0.5 veces el espaciamiento entre electrodos "a" otra aproximación es AB/8 (Butler, 2005). Comparado con otros, el arreglo tipo Wenner, tiene una profundidad de investigación moderada. Con la disposición de este arreglo la fuerza de la señal es inversamente proporcional al factor geométrico usado para el cálculo de la resistividad aparente, por lo que tiene mayor fuerza de señal entre los arreglos comunes. Ello es un factor importante a tomar en cuenta si es que existe mucho ruido en la zona a estudiar (Loke M. , 1999).

3.1.4.2 DISPOSITIVO SCHLUMBERGER

Se disponen geométricamente en línea los electrodos AMNB, donde la distancia MN es menor que la distancia entre los electrodos de corriente AB. La condición que debe cumplir es que la distancia que separa a los electrodos de corriente (AB) tiene que ser aproximadamente 5 veces la distancia entre los electrodos de potencial (MN), es decir, AB $\geq$ 5MN. El dispositivo geométrico para el arreglo tipo Schlumberger es: Ver figura N° 24.

$$k = \pi \frac{b(b+a)}{a} (3.43)$$

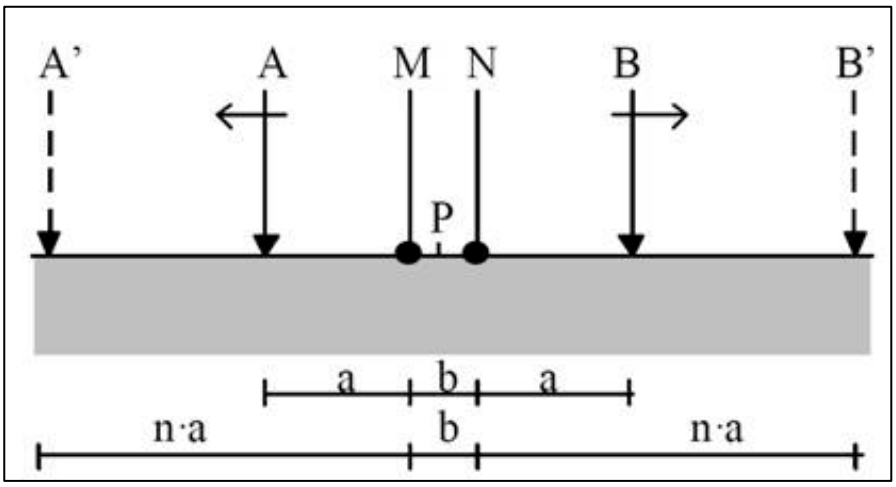


Figura 24: Esquema de dispositivo electródico del dispositivo Schlumberger. (ANAYA, 2010)

3.1.4.3 DISPOSITIVO WENNER – SCHLUMBERGER

Es una de las configuraciones más usadas en tomografía eléctrica, se trata de una modificación de la distribución del tipo Schlumberger para que pueda ser usada con espaciamiento constante entre electrodos. Se ubican los electrodos de corriente en el orden AMNB, con una distancia "a" entre los electrodos de voltaje MN y una distancia "na" entre AM y NB. Ver Figura N° 25.

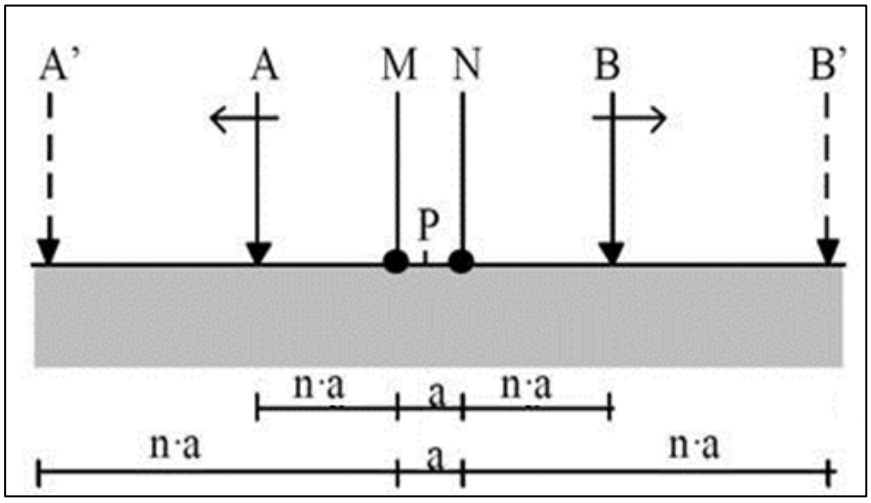


Figura 25: Esquema de dispositivo electródico del dispositivo Wenner – Schlumberger. (ANAYA, 2010)

Su factor geométrico es:

$$k = \pi n(n+1)a(3.44)$$

De aquí puede deducirse que la intensidad de la señal es inversa al cuadrado de "n", por lo cual será más alta que el caso del arreglo dipolo – dipolo. El arreglo tiene una sensibilidad ligeramente menor que el dispositivo Wenner en la región entre A-M y N-B, sin embargo, es un poco más sensible entre los electrodos de potencial MN. Esto indica que este arreglo tiene una sensibilidad moderada tanto para estructuras verticales y horizontales, por lo que es una buena opción en zonas donde se espera encontrar ambos tipos de estructuras geológicas. (Loke M. , 1999).

3.1.4.4 DISPOSITIVO DIPOLO – DIPOLO

Fue creado por Alp'in en 1966 y utilizado en estudios de resistividad y polarización inducida, gracias al bajo acoplamiento entre los circuitos de corriente y potencial. La geometría es ABMN, al principio la distancia es equidistante entre todos los electrodos "a" pero va incrementando "n x a" en AB y MN (Loke M. , 1999). La desventaja de este dispositivo es que la intensidad de la señal es relativamente baja si se le compara la intensidad generada por el resto de los dispositivos. Este dispositivo suele usarse para estudios muy superficiales ya que tiene buena resolución y buena cobertura horizontal (Reynolds, 1997).

Figura 26: Esquema de dispositivo electródico del dispositivo Dipolo – Dipolo. (ANAYA, 2010)

El factor geométrico de este dispositivo es:

$$k = \pi n(n+1)(n+2)a \qquad (3.45)$$

3.1.4.5 DISPOSITIVO POLO – DIPOLO

En este dispositivo el electrodo B se lleva a una gran distancia, teóricamente al infinito de los otros tres electrodos.

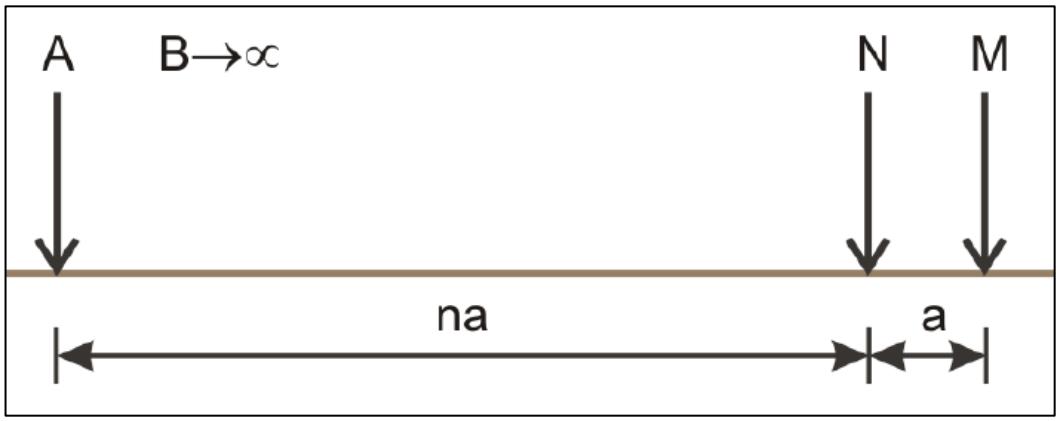


Figura 27: Esquema de dispositivo electródico del dispositivo Polo – Dipolo. (ANAYA, 2010)

El factor geométrico de este dispositivo es:

$$k = 2\pi n(n+1)a \qquad (3.46)$$

3.1.5 PSEUDOSECCIÓN DE RESISTIVIDAD

Una vez que los datos de campo hayan sido adquiridos mediante la configuración electródica seleccionada, en resumen, lo que se obtiene es la variación lateral y vertical de la resistividad, una forma de representar gráficamente dichas variaciones es mediante una **P'seudosecciones de resistividad**. Cada valor de resistividad aparente está representado por un punto en un diagrama donde la posición en dirección horizontal es el punto medio de los electrodos que se utilizan para realizar la medición y la posición vertical es una distancia que es proporcional a la separación de los electrodos, y está relacionado con el nivel de investigación "n". luego de acuerdo con el valor de la resistividad aparente en cada punto se realizan curvas de nivel. Las P'seudosecciones dan solo una imagen aproximada de la distribución real del subsuelo.

Las P'seudosecciones brindan una idea muy general de la distribución de la resistividad del subsuelo, sin embargo, nunca se debe considerar una pseudo-sección como la imagen real del suelo, esto es debido a que la imagen esta distorsionada debido a los distintos tipos de ruido que puede afectar a la medición, como el ruido ambiental, el ruido del equipo, etc. (Edwards, 1997).

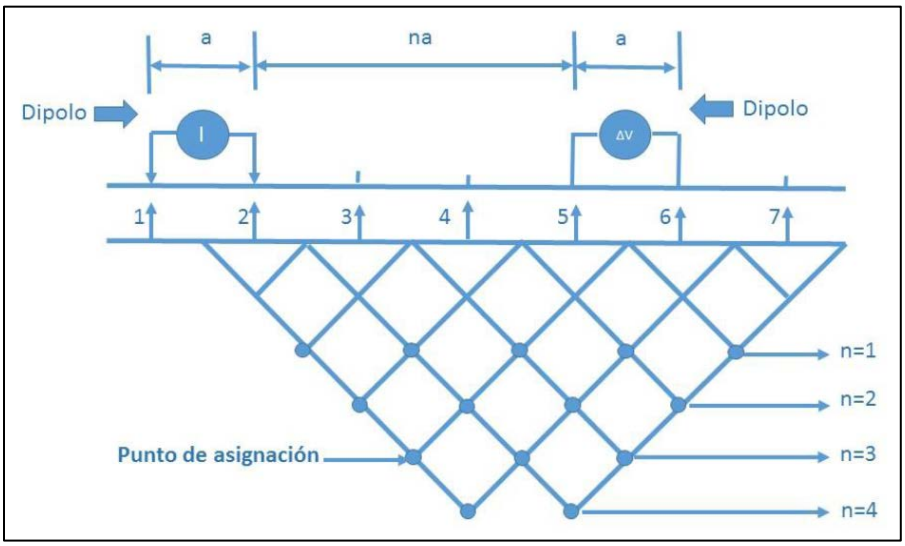


Figura 28: Representación gráfica de la construcción de una P'seudosecciones Geoeléctricas para una configuración Dipolo – Dipolo. Modificada de Julián Cuesta. (MENDOZA, s.f.)

3.1.6 PROFUNDIDAD DE INVESTIGACIÓN (PUNTO DE ATRIBUCIÓN)

Cuando se realiza una medición en campo se obtiene un valor puntual de la resistividad aparente y a dicho valor se le asigna una ubicación en el subsuelo. Este punto, en donde se ubica el valor de resistividad aparente, es conocido como punto de atribución.

La capacidad de profundización de la tomografía eléctrica depende fundamentalmente de la configuración geométrica de los electrodos. En líneas generales, si la distancia de los electrodos aumenta, la profundidad de investigación será mayor. (Ortiz, 2007)

También se puede establecer una relación, en este caso inversa, entre la distancia de los electrodos de medida y la resolución. A mayor espaciado entre electrodos, la profundidad es mayor pero la resolución decrece.

Concretamente, para cada dispositivo, se puede estimar cuáles son las profundidades medias de investigación que alcanzan. Los parámetros que necesitamos saber y de los que va a depender la profundidad son: n, a (espaciado entre electrodos) o L (longitud total del dispositivo). Para el dispositivo Wenner la profundidad se determina multiplicando la distancia a o L por el coeficiente que aparece en la Tabla N° 2. Para el dispositivo Dipolo-dipolo se multiplica la distancia L por el coeficiente correspondiente. (Pagan, 2006)

Tabla de coeficientes para determinar la profundidad media de investigación (z_c) para dos de los principales dispositivos: Wenner y Dipolo-Dipolo. (Edwards L. , 1977)

Tipo de dispositivo	n	Z_e/a	Z_e/l
Wenner	-	0.519	0.173
Dipolo-Dipolo	1	0.416	0.139
	2	0.697	0.174
	3	0.962	0.192
	4	1.220	0.203
	5	1.476	0.211
	6	1.730	0.216
	7	1.983	0.220
	8	2.236	0.224
Wenner-Schlumberger	1	0.520	0.173
	2	0.930	0.186
	3	1.320	0.189
	4	1.710	0.190
	5	2.090	0.190
	6	2.480	0.190

Tabla 2: Tabla de coeficientes para determinar la profundidad media de investigación para dos de los principales dispositivos: Wenner y Dipolo – Dipolo. (Edwards L. , 1977)

Según la Tabla N° 2 la profundidad media de investigación para los dispositivos es del orden de 0,2 veces la longitud total del perfil (Loke, 2000), aunque estas profundidades pueden verse reducidas por otros factores, como por ejemplo por la presencia de un nivel freático somero (Allue, 2014).

Cabe destacar, que para este estudio se utilizó la técnica multi-electrodo llamada roll-along, que fue desarrollada en la universidad de Lund (Dahlin, 1993), y que permite medir perfiles de mayor longitud a los estándar mediante la ampliación de las medidas de resistividad lateralmente. La técnica se basa en ir desplazando los segmentos del dispositivo desde la parte inicial del mismo hacia la final a medida que se van completando las medidas de los primeros electrodos (Figura N° 29).

Si se emplea esta técnica, la profundidad de adquisición media viene dada por (n-1)/n veces la profundidad máxima obtenida en la sección inicial. El valor n es el número de segmentos del perfil eléctrico (Bernand, 2003).

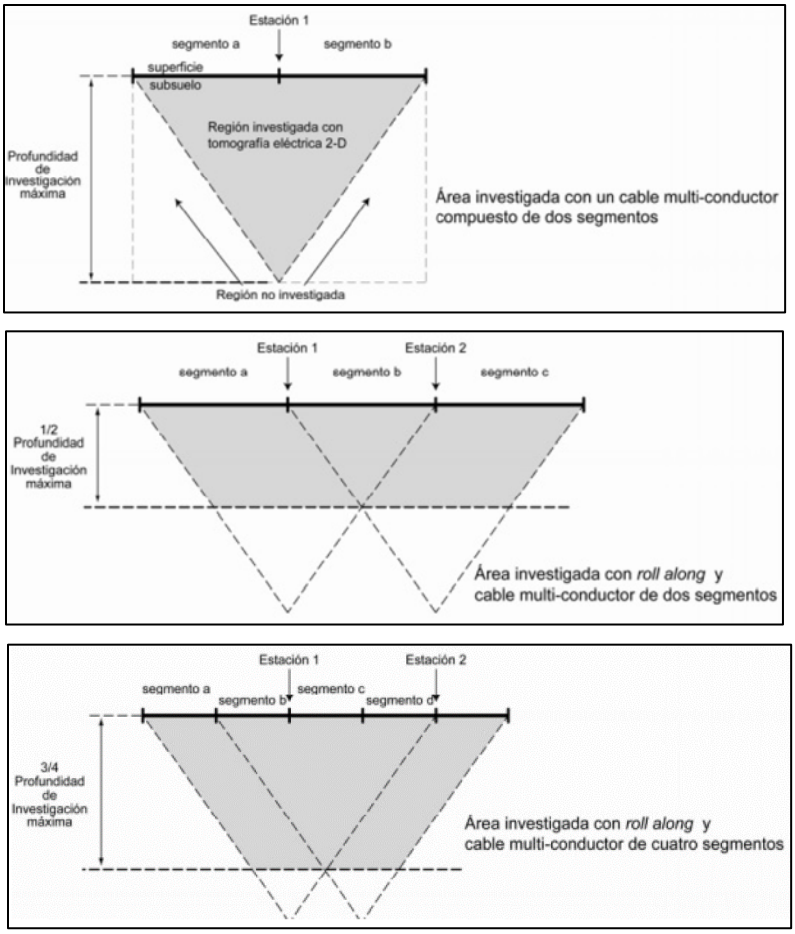


Figura 29: Ejemplos de profundidades máximas de investigación con un sistema multielectrodo simple (Figura superior) o mediante la técnica de roll – along (figuras inferiores). Tomado de Martínez Pagan(2006), modificado de bernand,2003). (Pagan, 2006) (Bernand, 2003)

3.2 INVERSION DE DATOS GEOELÉCTRICOS

Los valores obtenidos mediante las mediciones en campo corresponden a resistividades aparentes del terreno, para obtener las resistividades reales se realiza el proceso de inversión. En la mayoría de Softwares como el RES2DINV, el proceso para obtención de resistividades reales mediante la inversión, parte de los valores de resistividades aparentes representados como un pseudo-perfil. Luego se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo y, resolviendo el llamado "cálculo del problema directo" o "modelización directa" se obtiene el modelo de resistividades aparentes. Estas resistividades aparentes son comparadas con las medidas y se calcula el error. Basándose en este error se calcula nuevamente el modelo hipotético de resistividades verdaderas, y se repite el proceso. Así mediante un conjunto de iteraciones se consigue un modelo de resistividades verdaderas que podrían explicar las resistividades aparentes medidas en campo (Molina, 2006). La Figura N° 30 representa la estructura general que presenta en Software RES2DINV, mostrando los datos de resistividad aparente medidos, los datos de resistividad aparente calculados y la estimación del modelo real de resistividades.

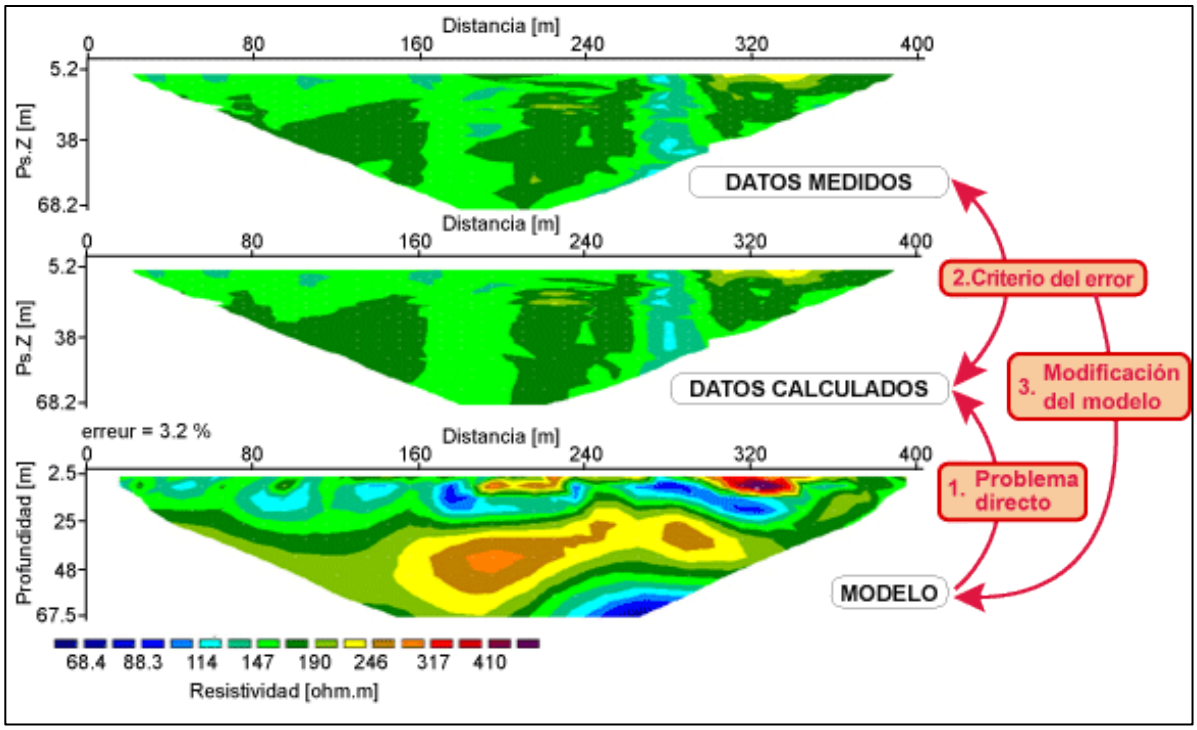


Figura 30: Estructura general del Software RES2DINV. Mostrando los datos de resistividad aparente medidos, los datos de resistividades aparente calculados y la estimación del modelo real de resistividad. (Molina, 2006)

3.2.1 TÉCNICAS DE INVERSIÓN

Uno de los principales problemas en el proceso de inversión de resistividades es que grandes variaciones de las propiedades eléctricas pueden causar cambios muy pequeños en los datos observados, haciendo que los algoritmos de inversión tiendan a ser inestables.

En adición, otros factores como el ruido y la selección inapropiada de los parámetros de inversión pueden incrementar la inestabilidad. Existen numerosos algoritmos de inversión de datos de resistividad diseñados para reducir esta problemática. La mayoría de ellos, están basados en el método de mínimos cuadrados o método Levenberg-Marquadt (Pelton, 1978) (Tripp, 1984) (Smith, 1984). Éste puede producir muy buenos resultados pero pueden aparecer anomalías debido al ruido en los datos; además, el modelo obtenido tendrá una alta dependencia de la elección "accidental" del modelo inicial. (Tsourlos, 1995).

Una manera de combatir la inestabilidad del problema inverso es imponer una restricción de suavizado ("smooth ness constraint"). El "**Smoothness-Constrained leasts quares Inversión Method**", es el método de inversión más óptimo para el análisis de problemas con variaciones graduales de resistividad y el más usado en las rutinas de inversión. Tradicionalmente, el método usa la técnica "**Gauss-Newton least-squares**" (mínimos cuadrados Gauss-Newton) como método de optimización y presenta la ventaja de que no requiere de un modelo inicial; sin embargo, en los programas estudiados, existe la posibilidad de implementar la rutina usando como método de optimización el "**Quasi-Newton least-squares**" (mínimos cuadrados Quasi-Newton), que será explicada más adelante.

La fórmula en la que se basa el método de inversión "**Smoothness-ConstrainedleastsquaresInversionMethod**" es la siguiente:

$$(J^J J + \lambda F)d = J^T g (3.48)$$

Dónde:

$$F = fX.fX^T + fZ.fZ^T (3.49)$$

fX = Filtro de aplanamiento horizontal ("horizontal flatnessfilter")

fZ = Filtro de aplanamiento vertical ("vertical flatnessfilter")

J = Matriz de derivadas parciales (matriz Jacobiana)

λ = Factor de amortiguación ("damping factor")

d = Vector de perturbación del modelo

g = vector de discrepancias

De la aplicación de esta limitante (smoothnessconstraint) se desarrolla uno de los métodos de inversión más usados en la actualidad, el método Occam. Dicha técnica de inversión produce un modelo simplificado del subsuelo y garantiza la estabilidad de la inversión. Además, los resultados que arroja están basados en las características que ha elegido el usuario (llamadas patrón de suavizado o "pattern of thesmoothness") y no en un modelo inicial arbitrario. (Tsourlos, 1995).

3.2.2 MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN Y CÁLCULO DE LA MATRIZ JACOBIANA

Los métodos de optimización, básicamente intentan reducir las diferencias entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados, ajustando la resistividad de los bloques del modelo. Una medida de estas diferencias es el error "root-mean-squared" (RMS o error cuadrático medio) dado por el programa de inversión. Cabe destacar que el error RMS más bajo no siempre corresponde al mejor modelo desde un punto de vista geológico.

En general, la mejor aproximación se obtiene al escoger un modelo cuyo error RMS no cambia significativamente de una iteración a la siguiente; según M. H. Loke, esto generalmente ocurre entre la 3ra y la 5ta iteración.

Durante la optimización, el cálculo de la matriz Jacobiana ocupa aproximadamente el 70% del tiempo de iteración, pero este puede ser acelerado significativamente evitando calcular directamente la matriz en cada iteración (Tsourlos, 1995). Esto puede ser logrado usando el sistema de mínimos cuadrados "Quasi-Newton" para ahorrar coste computacional, que es casi 10 veces más rápido que el convencional pero precisa de variaciones de resistividad más suaves para arrojar buenos resultados.

La técnica de optimización "Quasi-Newton" (QN) busca aproximar la matriz Jacobiana (matriz de derivadas parciales) en cada iteración en lugar de calcularla desde cero. Este tipo de método de optimización es similar al "Gauss-Newton" (que es el tradicionalmente usado), pero su principal diferencia es que la matriz Jacobiana es aproximada por una matriz B que es corregida y actualizada con cada iteración. Una de las desventajas del método QN es que suelen necesitarse 1 a 3 iteraciones más de lo normal para obtener una buena aproximación de las resistividades del subsuelo; a pesar de ello, suele reducir el tiempo de cómputo. Sin embargo, el principal inconveniente que podría presentarse por la aplicación de la

técnica QN es que los errores pueden propagarse de una a otra iteración, ya que cada nueva matriz Jacobiana es función de la anterior. (Tsourlos, 1995).

3.2.3 OPCIONES DE INVERSIÓN EN EL RES2DINV

RES2DINV es un programa desarrollado por Geotomo Software (GEOTOMO SOFTWARE, s.f.) para la inversión de datos de resistividad y potencial espontáneo usando un método de mínimos cuadrados. El modelo 2D usado por el programa consiste en un conjunto de bloques rectangulares, cuya ubicación y tamaño son generados automáticamente usando la distribución de los puntos medidos como una guía. Así, la profundidad de los últimos bloques es calculada buscando que sea aproximadamente igual a la profundidad de investigación media de los puntos medidos con la mayor separación de electrodos (Loke M. , 1999). A partir de los valores de resistividad aparente contenidos en estas unidades rectangulares, se obtienen resistividades reales usando métodos de diferencias finitas, o de elementos finitos, como subrutinas de modelado, junto a una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados que es sometida a una restricción de suavizado (Manual de usuario Res2dInv). Como opciones de inversión, es posible seleccionar en el menú del programa entre:

- Incluir el suavizado de las resistividades del modelo (“include smoothing of model resistivity”).
- Usar un método de inversión combinado, que aplica los métodos Marquardt y Occam (“use combined inversión method”).
- Seleccionar inversión robusta (“selectro bust inversion”).

3.2.3.1 INCLUIR SUAVIZADO DE LAS RESISTIVIDADES DEL MODELO ("INCLUDESMOOTHING OF MODELRESISTIVITY")

El método de mínimos cuadrados aplica una restricción de suavidad sólo al vector de perturbaciones del modelo (d) y no directamente sobre los valores de resistividad. Pero en algunos casos, particularmente aquellos con datos ruidosos, se obtienen mejores resultados aplicando una restricción de suavizado directamente a las resistividad del modelo (Loke M. , 1999). La ecuación de mínimos cuadrados resultante es:

$$(J^J J + \lambda F)d = J^T g - \lambda F u (3.50)$$

Donde "u" es un vector que contiene el logaritmo de los valores de resistividad del modelo. Mientras que, para un mismo factor de amortiguación, esto producirá un modelo con un error de resistividades aparentes RMS mayor, esta modificación asegurará variaciones más suaves en los valores de resistividad (Loke, 2000).

3.2.3.2 USAR MÉTODO DE INVERSIÓN COMBINADO ("USE COMBINED INVERSION METHOD")

Esta opción es recomendada para situaciones inusuales donde los valores de sensibilidad de los datos del modelo sean distorsionados por grandes variaciones de resistividad. En ciertos casos, como en el estudio de un cuerpo de muy bajas resistividades, el paso de la corriente puede variar de su patrón original, causando poca sensibilidad en la adquisición de los datos. Esto puede llevar a distorsiones justo debajo del cuerpo de baja resistividad. Combinando los métodos Marquardt y Occam, la distorsión en algunos casos puede ser reducida. Esta opción debe ser usada como último recurso, en caso de que las otras herramientas no sean lo suficientemente efectivas. Parece dar mejores resultados resolviendo estructuras compactas donde el espesor y la anchura sean ligeramente menores que la profundidad. En teoría, es posible usar sólo el método Marquardt, pero éste es inestable cuando los datos contienen un porcentaje relativamente alto de ruido (Loke M. , 1999).

3.2.3.3 SELECCIONAR INVERSIÓN ROBUSTA ("SELECTROBUSTINVERSION")

El método convencional de mínimos cuadrados intentará minimizar la diferencia cuadrática entre las resistividades aparentes y calculadas. Éste método normalmente da resultados razonables si los datos contienen ruido aleatorio o "Gaussiano". Pero si el set de datos contiene puntos anómalos (donde el ruido viene de fuentes no aleatorias, como errores o problemas con el equipo), este criterio es menos satisfactorio. Tales puntos anómalos pueden tener una gran influencia en el modelo resultante de la inversión, para reducir su efecto, el método de inversión robusta reduce la diferencia absoluta entre los valores medidos y calculados de la resistividad (Loke M. , 1999).

Además, otra diferencia entre la inversión robusta y la tradicional de mínimos cuadrados, es que, esta última, procura minimizar el cuadrado de los cambios en los valores del modelo de resistividades, lo que produce un modelo con variaciones suaves de resistividad. Este modelo se puede semejar a la realidad si los cambios de resistividad del subsuelo también son suaves, sin embargo, si los cuerpos existentes en la zona estudiada tienen bordes filosos o abruptos, como ocurre en una interface suelo-basamento, el método convencional tiende a suavizar los bordes y se aleja de la imagen real del subsuelo (Loke M. , 1999).

CAPITULO IV

INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO

En el presente capitulo se describe la instrumentación y las herramientas necesarias para que haya sido posible la realización del levantamiento geofísico mediante tomografía eléctrica empleando el dispositivo Wenner, con la finalidad de obtener la respuesta del suelo en base a sus propiedades eléctricas para detectar la presencia de anomalías como grietas, fracturas y cavidades que son el principal objetivo de este estudio. Para dar inicio a la etapa de campo junto con la adquisición de datos, se realizó primeramente la planificación y ubicación de las líneas de tomografía eléctrica, con la finalidad de abarcar la mayor parte del área de estudio. La toma de datos se efectuó durante los días 6 hasta el 14 de mayo del 2018. El levantamiento se realizó con la ayuda de un "resistivímetro modelo 6471" de la marca AEMC INSTRUMENTS de múltiple frecuencia (AEMC INSTRUMENTS, s.f.), con capacidad de medir resistencias comprendidas entre 0.01Ω - 99.9kΩ. También se utilizó una "maleta multiplexora" de la marca INNOVA para agilizar la lectura de los datos. Así mismo se utilizaron 37 electrodos impolarizables con la finalidad de reducir el efecto electromagnético circundante y la polarización de estos. Durante el desarrollo del presente capitulo se describirá cada uno de los equipos y materiales utilizados para el levantamiento geofísico, la configuración de parámetros de adquisición y la adquisición de datos propiamente dicha. Los materiales utilizados en el presente estudio son totalmente confiables, puesto que poseen una certificación de calibración de fábrica vigente, lo que conlleva a obtener datos confiables. La toma de datos en campo se inició a través de pruebas de calibración inicial, que consistía en la ejecución de pequeños ensayos in situ, así como la verificación del buen funcionamiento y mantenimiento del equipo.

4.1 INSTRUMENTACIÓN ESPECIALIZADA

El equipo empleado en la adquisición de datos de tomografía eléctrica consta de los siguientes elementos:

- 01 Resistivímetro AEMC INSTRUMENTS – Modelo 6471
- 01 Maleta multiplexora de 50 canales INNOVA
- 35 Electrodos Impolarizables
- 04 Cables de adquisición
- 01 Ordenador portátil
- 01 Batería 12V / 7ah
- 01 GPS
- 01 Cinta métrica de 30m
- Material auxiliar (combas, conectores, multímetro, extensiones, etc.)

Figura 31: Resistivímetro AEMC INSTRUMENTS modelo 6471 con accesorios. (AEMC INSTRUMENTS, s.f.)

4.1.1 RESISTIVÍMETRO AEMC INSTRUMENTS – MODELO 6471

El resistivímetro Modelo 6471 de la marca AEMC de frecuencia variable. Tiene la función de apagado automático y el reconocimiento automático de todas las conexiones de los electrodos y sus valores de resistencia. Almacena hasta 5120 resultados completos de pruebas en la memoria interna, la comunicación con el ordenador portátil se realiza mediante el cable de comunicaciones USB con aislamiento óptico, con el cual el equipo accede a la configuración y operación remota de todas las mediciones usando el software DataView®. Su alimentación interna es a través de baterías de NiMH (Batería de hidruro de níquel-metal) recargables, posee también una carcasa resistente a prueba de polvo y de lluvia – clasificación IP54 en posición cerrada. Satisface las partes 4 y 5 de las normas IEC 61557. (IEC, s.f.).

Figura 32: Resistivímetro modelo 6471. (AEMC INSTRUMENTS, s.f.)

4.1.1.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

- **Fuente de alimentación:** Batería de 12V interna
- **Rangos de frecuencias:** Método de medida: digital por muestreo a 4.028 Hz, filtro de paso bajo, FFT. La frecuencia que se visualiza es de la componente espectral más importante. Ciclo de medida: aproximadamente 3 visualizaciones por segundo.

DESCRIPCIÓN	RANGO
Campo de medida	de 5 a 450 Hz
Resolución	1 Hz
Error de funcionamiento	± 2 Hz

Tabla 3: Rangos de frecuencia.

- **Corriente de salida:** 0.1A hasta 1A.
- **Potencia Máxima:** 300W
- **Voltaje de salida:** 0.1V hasta 650V

DESCRIPCIÓN	RANGO	
Campo de medida	0,00 – 99,9 V	100,0 - 650 V
Resolución	0,01 V	0,1 V
Error intrínseco	± (2% + 1 pt)	
Error de funcionamiento	± (5% + 1 pt)	
Impedancia de entrada	1,2 MΩ	
Frecuencia de utilización	5 - 440 Hz	

Tabla 4: Medición en punto.

4.2 PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos se bajó los siguientes estándares de configuración del equipo y su respectiva disposición en campo.

Parámetro	Descripción
Configuración	Wenner
Espaciado	5 m
Voltaje de salida	0.1 hasta 650 V
Corriente de prueba	0.1 hasta 1 A
Modo de grabado	Mem - Function
Frecuencia de utilización	5 – 440 Hz

Tabla 5: Parámetros de Adquisición de datos.

4.3 METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO

Esta etapa es la más importante en el presente estudio, ya que trata sobre al proceso de obtención de datos de campo que, tras su procesado, permitirá brindarnos información de las características del subsuelo.

4.3.1 DISPOSICIÓN DE LAS LÍNEAS

Debido a la disposición en campo según el reconocimiento previo, la información disponible y los objetivos trazados en el presente estudio se decidió efectuar y planificar la disposición de las líneas geofísicas de tomografía eléctrica en campo, considerando la orientación y disposición de las posibles fracturas, grietas, fallas y el emplazamiento del posible deslizamiento que puede ocurrir en el sector El Alto. Para lo cual se establecieron las líneas (L01, L02 y L03) ubicadas con un rumbo de N30°E, paralelas entre ellas y espaciadas aproximadamente 30 m entre ellas, estas líneas se dispusieron con la finalidad de identificar discontinuidades paralelas a la pendiente del valle de Siguas, así mismo las líneas (L04, L05 y L06) se ubican con un rumbo N59°O, paralelas entre ellas y espaciadas aproximadamente 30 m entre ellas, estas líneas se dispusieron con la finalidad de identificar discontinuidades perpendiculares a la pendiente del valle de Siguas, discontinuidades que podrían estar ligadas al posible deslizamiento del sector El Alto. Las líneas se encuentran emplazadas longitudinal y transversalmente entre ellas abarcando el área de interés a fin de caracterizar la distribución de la resistividad del subsuelo y detectar posibles anomalías ligadas a agrietamientos, discontinuidades y pequeñas zonas de fallamiento del terreno. Las líneas geofísicas tienen una longitud de 165 m. Cada línea geofísica fue referenciada en campo mediante la obtención de sus coordenadas en el Datum WGS-1984, con una Proyección UTM, donde la zona de estudio se ubica en la Zona 18. Los espaciamientos inter electródicos fueron medidos con la ayuda de una cinta métrica, para mayor precisión de los espaciamientos entre los electrodos.

4.3.2 ELECCIÓN DEL ARREGLO Y DISPOSICIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

La evaluación de las distintas configuraciones electródicas se optó por el dispositivo Wenner, ya que brinda una mayor sensibilidad a los cambios horizontales de resistividad para la ubicación de fallas verticales, nos brinda una buena resolución horizontal y la operación en campo es muy sencilla y facilita el avance de adquisición.

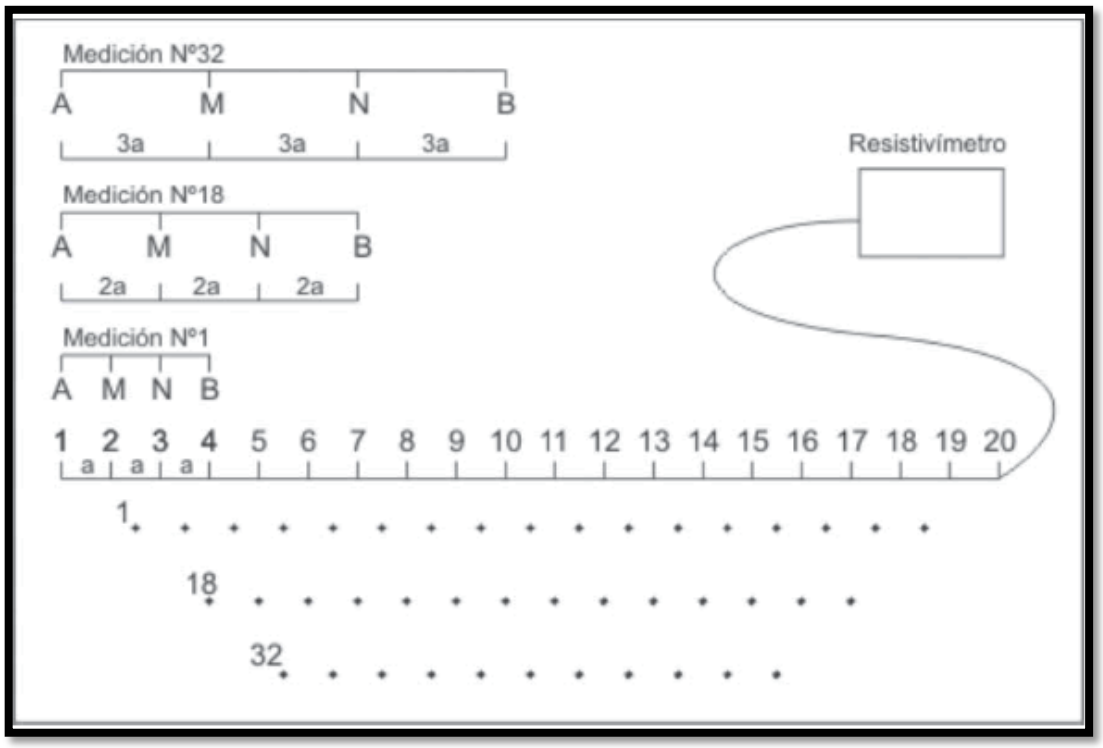


Figura 33: Representación esquemática de la matriz Wenner con ubicaciones de electrodos y puntos de referencia. (Arreglo Wenner, s.f.)

4.3.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

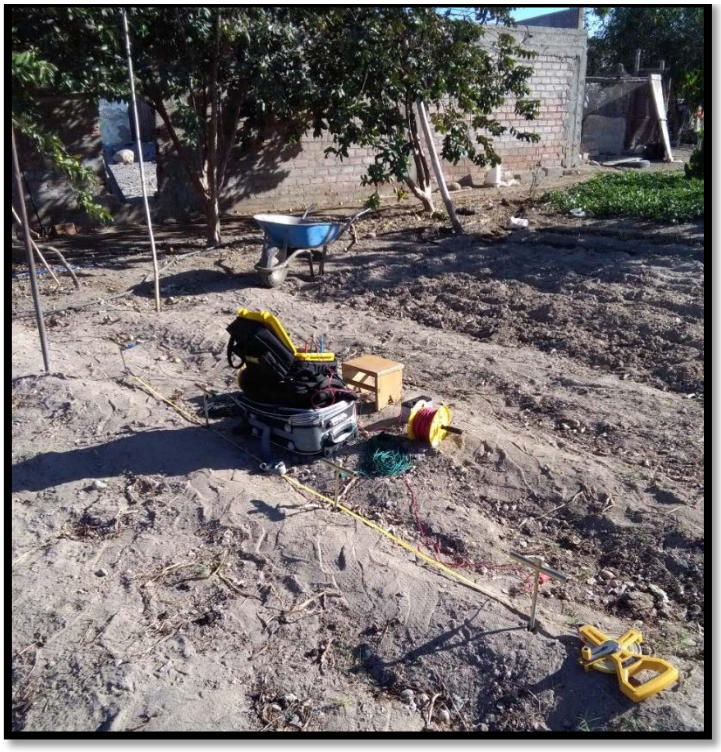
La adquisición de datos fue realizada por una brigada conformada por un Geofísico y cuatro ayudantes, las lecturas de los datos se realizaron mediante la configuración Wenner, ya que como se sabe este es un arreglo que nos muestra una mejor resolución horizontal, para poder identificar las discontinuidades, así como que el arreglo contrarresta muy bien las corrientes parasitas (fuerte ruido ambiental). Se usaron 37 electrodos espaciados 5 metros entre sí, alcanzando una longitud de 185 metros. Una vez dispuestos los electrodos en campo se procede a conectar los cables a los electrodos, así mismo al equipo de resistividad, el equipo de resistividad debe estar completamente cargado al 100% de batería y conectado al ordenador portátil, luego se procede a configurar el resistivímetro desde el ordenador, ingresando el espaciamiento entre electrodos y seleccionando la configuración. Del mismo modo

se configura la maleta multiplexora para ir realizando cada movimiento. Luego se procede a realizar la toma de datos de forma automática y guardándolos en la memoria del equipo.

Cabe destacar que este tipo de terreno presente en la zona de estudio es un suelo muy resistivo, así que se realizó la preparación del terreno un día previo a la lectura de cada línea, colocándose una solución de agua y sal para mejorar la conducción electrolítica, una buena manera de generar una mejor conducción eléctrica del terreno y mejorar la resistencia de contacto es que al preparar el terreno procurar que donde se colocan los electrodos estén bien húmedos. Al mejorar cada punto de lectura con la solución mejorara claramente la resistencia de contacto, facilitando la lectura de los puntos en el trabajo.

Lo que pudo facilitar un poco la lectura de algunos puntos iniciales de las líneas, es que la superficie plana de inicio de los puntos que esta mas cercana a la zona de EL ALTO, se encuentra en constante riego. Esta situación ayudo un poco en la lectura de estos puntos, pero en las líneas que van en dirección hacia el valle de Siguas, son un poco mas resistivas por estar más secos. Con toda la preparación del terreno la lectura de los puntos se realizo con total facilidad dándonos buenos datos de resistividad. Ver Fotos:

Fotografía 4: Instalación del resistivímetro AEMC modelo 6471 en la zona de estudio, consola, carretes de cable, electrodos impolarizables, y accesorios.



Fotografía 5: Resistivímetro AEMC ISNTRUMENTS modelo 6471 tomando datos en zona de estudio, Sector el Alto.

Fotografía 6: Consola Resistivímetro AEMC modelo 6471 en total funcionamiento en campo.

Fotografía 7: Contacto entre el cuaternario reciente y el tufo volcánico.

CAPITULO V

PROCESAMIENTO DE DATOS E INTERPRETACIÓN

5.1 METODOLOGÍA CUANTITATIVA

5.1.1 SOFTWARE UTILIZADO PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS

Los Software que se utilizaron para el procesamiento de datos de la presente tesis son los siguientes:

ARCGIS: Utilizado para la realización de los mapas de ubicación, geológicos, geomorfológicos, hidrográficos entre otros.

U Estudio: Utilizado para organizar todos los archivos en formato .DAT. Otorga más facilidad a la edición de los datos y una mejor visualización.

RES2INV: Utilizado para procesar datos de resistividad eléctrica y realizar su inversión.

OASIS MONTAJ: Utilizado para la interpolación de los datos.

SURFER 15: Utilizado para el procesamiento de los datos y de las secciones.

5.1.2 PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos tomados en campo son guardados en la memoria del equipo (resistivímetro Aemc modelo 6471), lo que se procede es descargar los datos a un computador con ayuda de un cable serial conector USB que da conexión (equipo-Computador) para seguir con su procesamiento. Estos datos cuando se descargan del equipo están en formato ".DAT", los cuales puedes ejecutarlos con ayuda del block de notas, pero se recomienda trabajar con el programa "UEstudio.exe" (Ultra Edit, s.f.). Este programa tiene un manejo sencillo para organizar bases de datos y permite una mejor visualización de ello. Podemos revisar la ventana del programa en la figura N° 34.

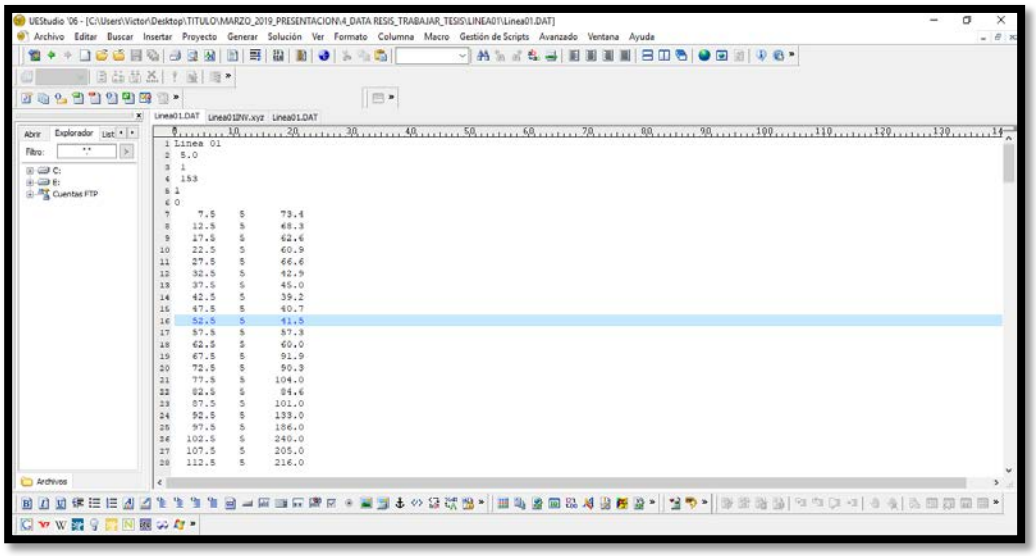


Figura 34: Ventana de Software UEstudio, mostrando los datos de líneas geofísicas. Fuente : Software UEstudio.

Los datos descargados son "datos sin modificación alguna" ello implica que deben ser sometidos a un trabajo de procesamiento, por lo que se recurre al software RES2INV, ya que este programa realizara la inversión de los datos para poder llegar a los resultados que necesitamos para nuestra interpretación. Nos permitirá el software res2inv, realizar el número de iteraciones que nosotros le permitamos al programa y colocar una serie de vínculos que nos darán el resultado esperado para nuestra investigación. Este software puede ser descargado desde su página GEOTOMO SOFTWARE. (GEOTOMO SOFTWARE, s.f.) . En la figura N° 35 muestra la ventana

inicial del RES2INV, en la figura N° 36 podemos ver las secciones de resistividad para una línea geofísica, mostrándonos la inversión de los datos.

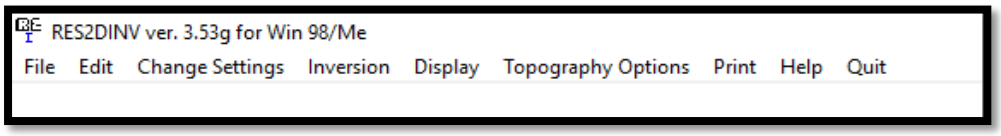


Figura 35: Ventana inicial del software RES2INV. Fuente: RES2INV

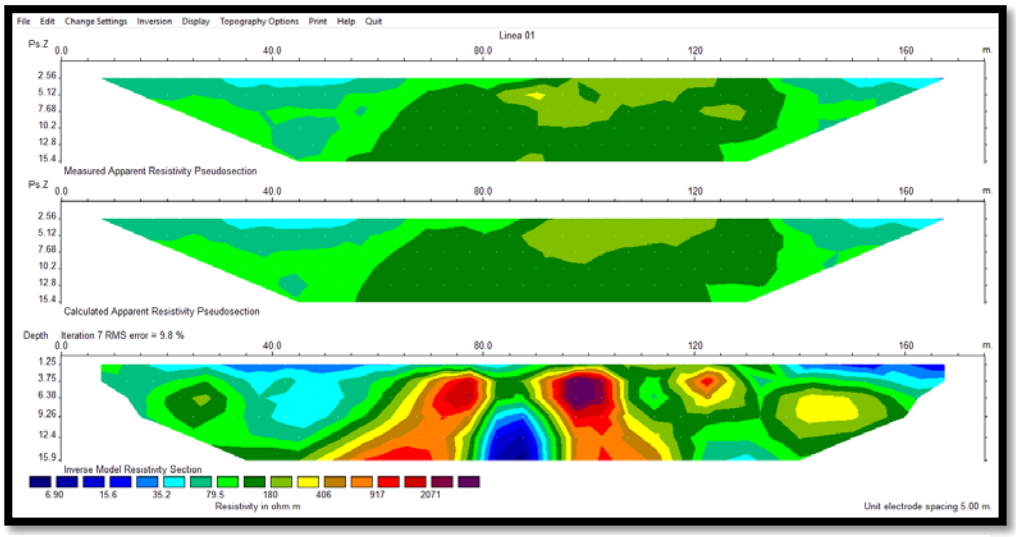


Figura 36: Secciones de resistividad realizadas en el software RES2INV. Fuente: RES2INV.

Luego de obtenidos los datos de inversión en formato ".XYZ", procedemos a utilizar el software "Oasis Montaj", este programa mejorara la resolución de las secciones de resistividad, y nos permitirá mejores interpretaciones para los estudios geofísicos. Este programa es muy versátil y permite recurrir a una buena variedad de comandos para realizar muchas operaciones en el mismo. Se procedió a realizar un voxler con interpolación Kriggin, el cual nos permitió extraer todas las secciones de resistividad pertenecientes a las líneas de resistividad leídas en campo. Estos resultados nos permitirán interpretar mejor las fallas, discontinuidades, cavidades, etc. Que es lo que buscamos con este estudio. Toda nuestra data la organizamos en el UEstudio agregándole la topografía, y una vez allí ejecutarla en el programa Oasis Montaj para su procesamiento de todas las secciones de resistividad que tenemos para examinar, tenemos 6 líneas de resistividad. En la figura N° 37 podemos ver la ventana con la sección de resistividad realizada en el software Oasis Montaj que pertenece a la línea 1.

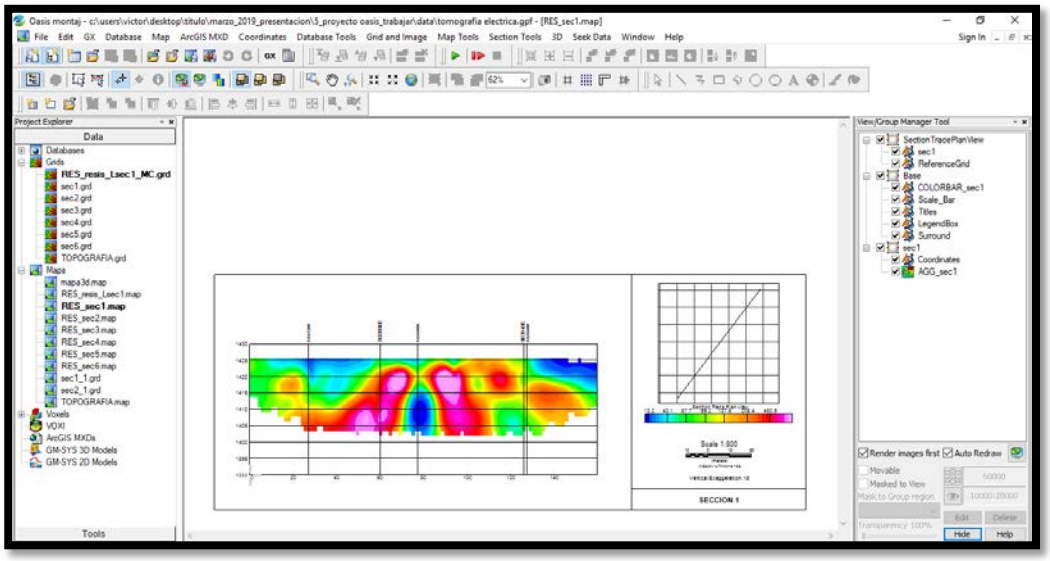


Figura 37: Sección de resistividad en Oasis Montaj. Fuente: Oasis Montaj

Con los datos interpolados del programa anterior, aplicamos luego un programa que nos permita mejorar nuestra interpretación. Para tal efecto se utilizó el software SURFER 15. Este programa nos permitirá analizar y obtener resultados relacionados con las secciones de resistividad que obtuvimos a lo largo de nuestro estudio. En la figura N° 38 podemos ver la ventana principal del programa Surfer 15.

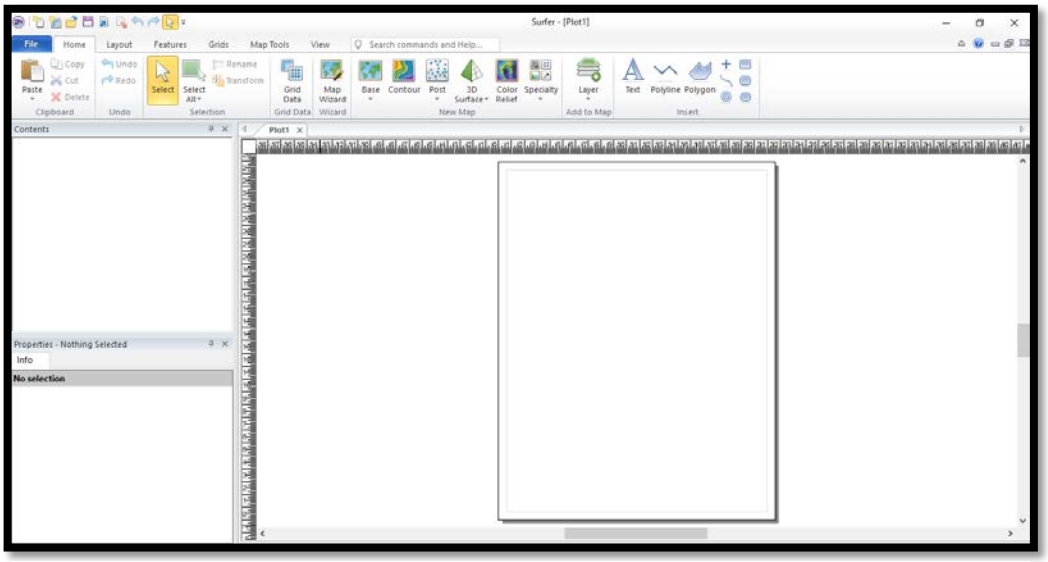


Figura 38: Ventana principal del Software Surfer 15. Fuente: Surfer 15.

5.2 INTERPRETACIÓN

Se realizaron seis líneas de tomografía eléctrica (Ver gráfico 3), generándose así perfiles a partir de los datos adquiridos en campo tanto en dirección paralela como perpendicular al sector EL ALTO-Pampas de majes. Las líneas geofísicas atraviesan el área de interés esperando encontrar anomalías que nos permitan identificar los diferentes horizontes a diferentes profundidades de esta zona de estudio, a su vez poder reconocer por nuestros datos de resistividades la estructura geodinámica que posee nuestra zona de estudio.

En el software RES2INV, al ingresar los datos nos presenta la opción de colocarle un factor de amortiguación, el cual interpola los picos de los datos tomados, es decir ayuda con los datos ruidosos. Este programa utiliza seguidamente un interpolador muy bueno que es el de los Mínimos Cuadrados, esto lo realiza para generar el modelo de inversión. Lo que sucede es que realiza una serie de iteraciones (modelo matemático que se asemeja al valor real del terreno, resistividad aparente), el programa por defecto te realiza hasta 5 o 6 iteraciones, pero manualmente puede agregarle más, el res2inv te permite dar hasta < 5% de error. En nuestro caso utilizamos hasta 8 iteraciones para poder examinar todas las probabilidades y usar el menor error, así usted siga intentando crear más iteraciones en programa empezara a converger con los datos, es decir los resultados serán iguales siempre. Finalmente empleara un contorno logarítmico para darle el procesado final a la sección y mostrarnos el modelo inverso de resistividad real. A todo esto, podemos agregarle posteriormente la topografía para poder dar mejores interpretaciones de nuestras secciones.

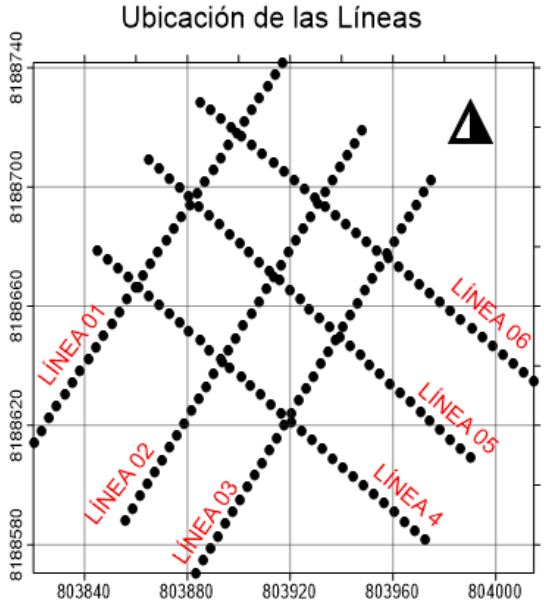


Gráfico 02: Ubicación de las líneas de tomografía eléctrica. Fuente (Surfer15).

5.2.1 LÍNEAS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN RES2INV

5.2.1.1 LÍNEA 1

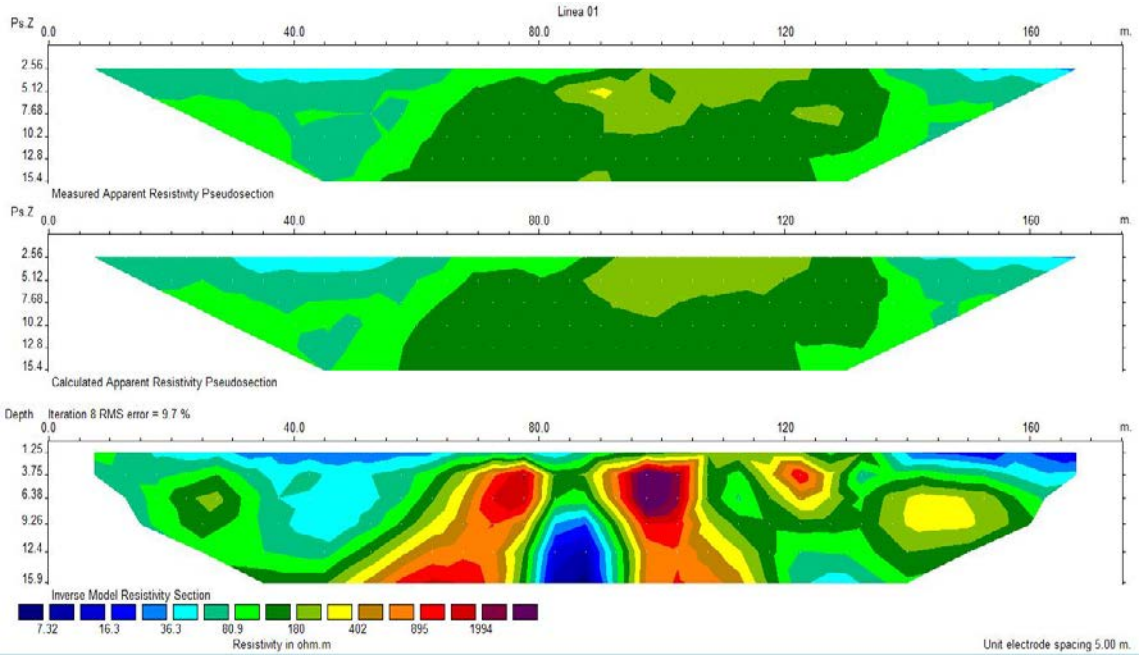


Gráfico 03: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 1 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

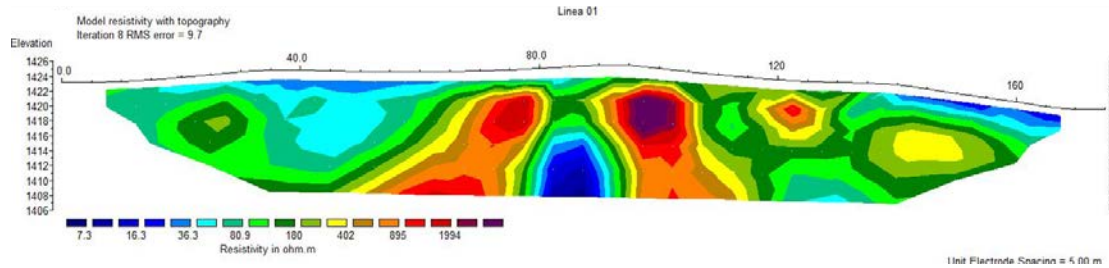


Gráfico 04: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 1 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

LINEA N° 1	
Espaciamiento entre electrodos	5 m
Arreglo	Wenner
Cantidad de datos	153
Minima locación	0 m
Maxima locación	160 m
Numero de Niveles	6
Numero de electrodos	36
Total Iteraciones	8

Tabla 6: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 1.

Interpretación:

En la Línea 1 de Tomografía Eléctrica realizada en el Software RES2INV, podemos darnos cuenta de las siguientes propiedades:

El espaciamiento entre electrodos es de 5 metros, el arreglo que se utilizo es wenner, la cantidad total de datos tomados es de 153, su máxima locación es de 160 metros, esta línea posee 6 niveles de profundidad, un total de 36 electrodos y se realizaron 8 iteraciones dándonos un margen de error de 9.7%.

En el grafico 3, podemos apreciar que nos muestra tres ventanas de resultados, la primera corresponde a los datos medidos en el campo, que vendría ser la resistividad aparente. La segunda ventana corresponde a los datos calculados de la resistividad aparente en el res2inv, Y finalmente la tercera ventana corresponde al modelo inverso de resistividad real.

Finalmente, en el grafico 4, tenemos la sección de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 1 de la zona de estudio, donde podemos apreciar claramente un valor mínimo de resistividad de 7.3 ohm-m y un valor máximo de resistividad de 1994 ohm-m. Se tiene en el medio de la sección una zona con bajas resistividades que corresponden claramente a la presencia de una falla inferida, esto se puede deducir por que se encuentra en medio de dos cuerpos de resistividades mucho mayores, las cuales según geología corresponden a un conglomerado ligeramente consolidado. Seguidamente podemos detectar claramente los horizontes geológicos teniendo en superficie a los depósitos recientes perteneciente a los terrenos de cultivo (material eólico), seguidamente los depósitos recientes (material aluvial) y finalmente los conglomerados aluvial pleistocénicos donde se puede deducir la presencia de una falla inferida. También se puede denotar que en margen superior izquierdo hay presencia de filtraciones de humedad, ya que la anomalía se muestra con resistividades bajas y está en dirección hacia abajo.

5.2.1.2 LÍNEA 2

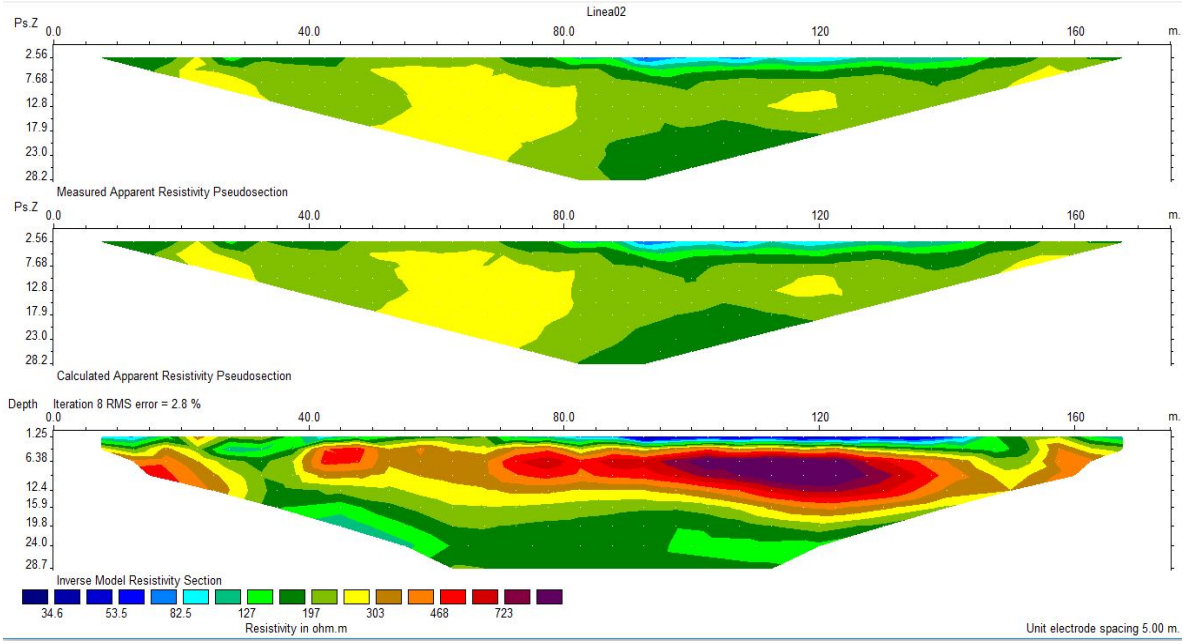


Gráfico 05: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 2 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

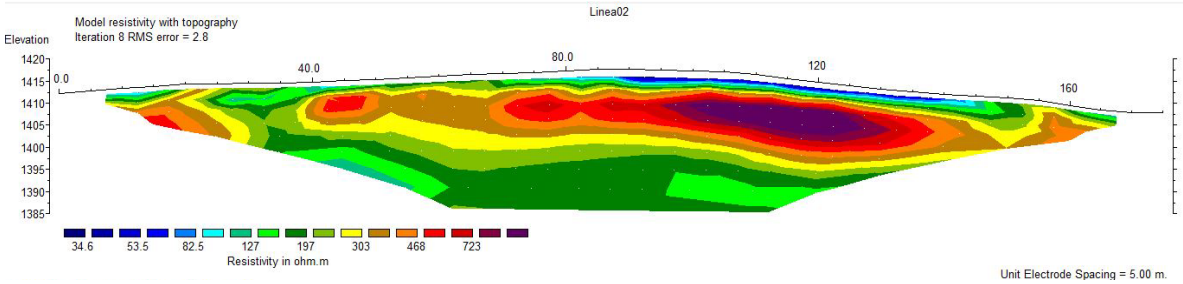


Gráfico 06: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 2 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

LINEA N° 2	
Espaciamiento entre electrodos	5 m
Arreglo	Wenner
Cantidad de datos	184
Mínima locación	0 m
Máxima locación	160 m
Numero de Niveles	6
Numero de electrodos	36
Total Iteraciones	8

Tabla 7: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 2.

Interpretación:

En la Línea 2 de Tomografía Eléctrica realizada en el Software RES2INV, podemos darnos cuenta de las siguientes propiedades:

El espaciamiento entre electrodos es de 5 metros, el arreglo que se utilizo es wenner, la cantidad total de datos tomados es de 184, su máxima locación es de 160 metros, esta línea posee 6 niveles de profundidad, un total de 36 electrodos y se realizaron 8 iteraciones dándonos un margen de error de 2.8%.

En el grafico 5, podemos apreciar que nos muestra tres ventanas de resultados, la primera corresponde a los datos medidos en el campo, que vendría ser la resistividad aparente. La segunda ventana corresponde a los datos calculados de la resistividad aparente en el res2inv, Y finalmente la tercera ventana corresponde al modelo inverso de resistividad real.

Finalmente, en el grafico 6, tenemos la sección de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 2 de la zona de estudio, donde podemos apreciar claramente un valor mínimo de resistividad de 34.6 ohm-m y un valor máximo de resistividad de 723 ohm-m. Se tiene en la parte superior derecha de la sección una zona con valores altos de resistividades que corresponden según geología a los depósitos recientes, Seguidamente podemos detectar claramente los horizontes geológicos teniendo en superficie a los depósitos recientes perteneciente a los terrenos de cultivo (material eólico), seguidamente los depósitos recientes (material aluvial) y finalmente los conglomerados aluvial pleistocénicos.

5.2.1.3 LÍNEA 3

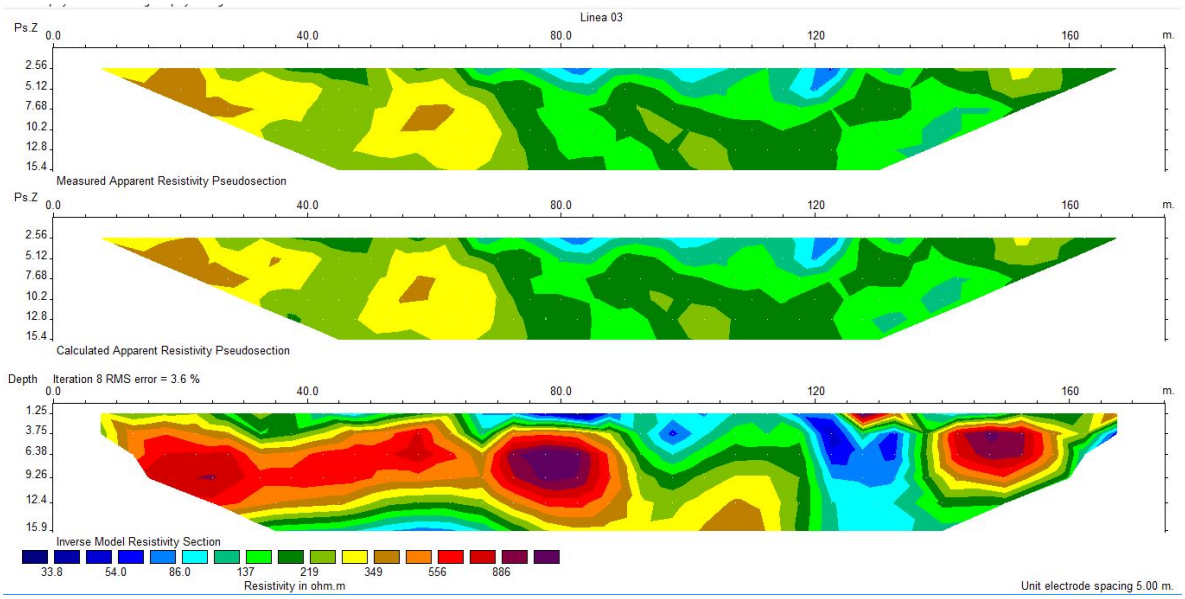


Gráfico 07: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 3 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

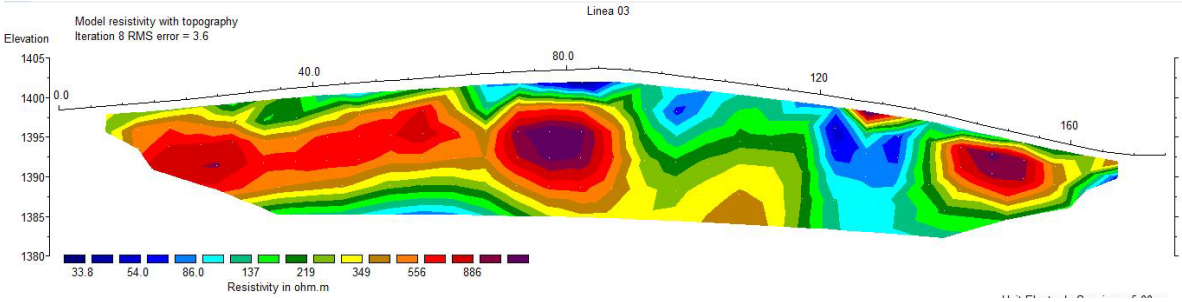


Gráfico 08: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 3 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

LINEA N° 3	
Espaciamiento entre electrodos	5 m
Arreglo	Wenner
Cantidad de datos	153
Mínima locación	0 m
Máxima locación	160 m
Numero de Niveles	6
Numero de electrodos	36
Total Iteraciones	8

Tabla 8: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 3.

Interpretación:

En la Línea 3 de Tomografía Eléctrica realizada en el Software RES2INV, podemos darnos cuenta de las siguientes propiedades:

El espaciamiento entre electrodos es de 5 metros, el arreglo que se utilizo es wenner, la cantidad total de datos tomados es de 153, su máxima locación es de 160 metros, esta línea posee 6 niveles de profundidad, un total de 36 electrodos y se realizaron 8 iteraciones dándonos un margen de error de 3.6%.

En el grafico 7, podemos apreciar que nos muestra tres ventanas de resultados, la primera corresponde a los datos medidos en el campo, que vendría ser la resistividad aparente. La segunda ventana corresponde a los datos calculados de la resistividad aparente en el res2inv, Y finalmente la tercera ventana corresponde al modelo inverso de resistividad real.

Finalmente, en el grafico 8, tenemos la sección de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 3 de la zona de estudio, donde podemos apreciar claramente un valor mínimo de resistividad de 33.8 ohm-m y un valor máximo de resistividad de 836 ohm-m. Se tiene en la parte media de la sección una zona con valores altos de resistividades que corresponden según geología a los tufos volcánicos, Seguidamente podemos detectar claramente los horizontes geológicos teniendo en superficie a los depósitos recientes perteneciente a los terrenos de cultivo (material eólico), seguidamente los depósitos recientes (material aluvial), siguiéndole el conglomerado aluvial pleistocénico y finalmente los conglomerados los tufos riolíticos.

5.2.1.4 LÍNEA 4

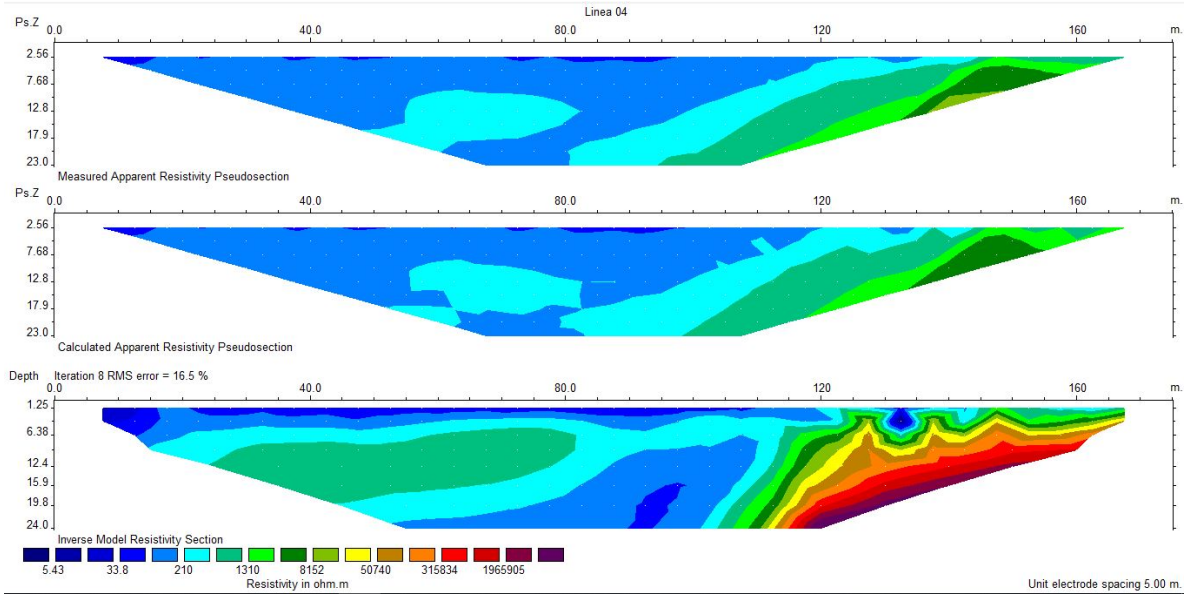


Gráfico 09: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 4 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

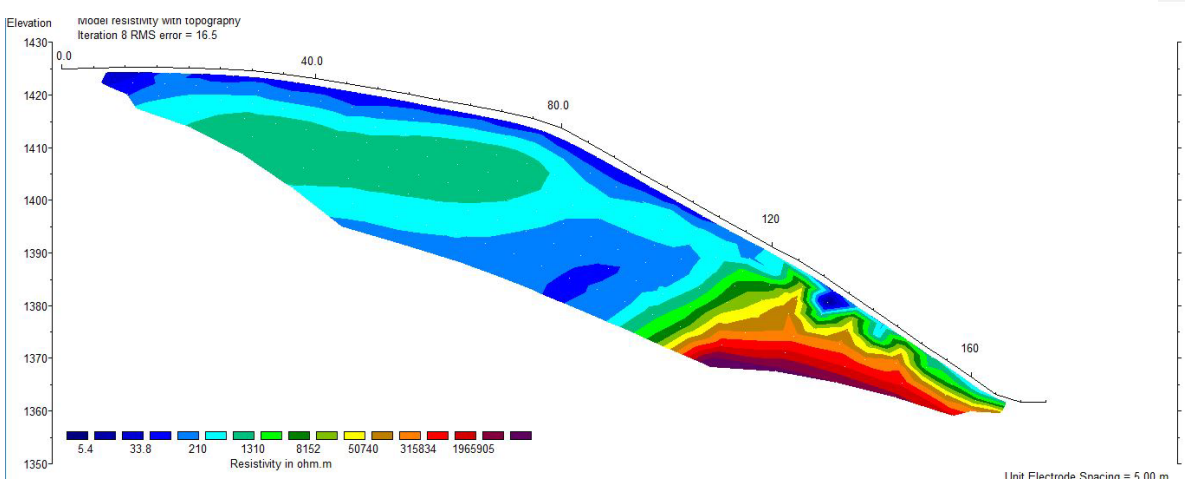


Gráfico 10: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 4 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

LINEA N° 4	
Espaciamiento entre electrodos	5 m
Arreglo	Wenner
Cantidad de datos	189
Mínima locación	0 m
Máxima locación	160 m
Numero de Niveles	9
Numero de electrodos	36
Total Iteraciones	8

Tabla 9: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 4.

Interpretación:

En la Línea 4 de Tomografía Eléctrica realizada en el Software RES2INV, podemos darnos cuenta de las siguientes propiedades:

El espaciamiento entre electrodos es de 5 metros, el arreglo que se utilizo es wenner, la cantidad total de datos tomados es de 189, su máxima locación es de 160 metros, esta línea posee 9 niveles de profundidad, un total de 36 electrodos y se realizaron 8 iteraciones dándonos un margen de error de 16.5%.

En el grafico 9, podemos apreciar que nos muestra tres ventanas de resultados, la primera corresponde a los datos medidos en el campo, que vendría ser la resistividad aparente. La segunda ventana corresponde a los datos calculados de la resistividad aparente en el res2inv, Y finalmente la tercera ventana corresponde al modelo inverso de resistividad real.

Finalmente, en el grafico 10, tenemos la sección de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 4 de la zona de estudio, donde podemos apreciar claramente un valor mínimo de resistividad de 5.4 ohm-m y un valor máximo de resistividad de 1965905 ohm-m. Se tiene en la parte inferior derecha de la sección una zona con valores muy altos de resistividades que corresponden según geología a los tufos volcánicos ya que estos son alta mente resistivos, Seguidamente podemos detectar claramente los horizontes geológicos teniendo en superficie a los depósitos recientes perteneciente a los terrenos de cultivo (material eólico), seguidamente los depósitos recientes (material aluvial), siguiéndole el conglomerado aluvial pleistocénico y finalmente los conglomerados los tufos riolíticos.

5.2.1.5 LÍNEA 5

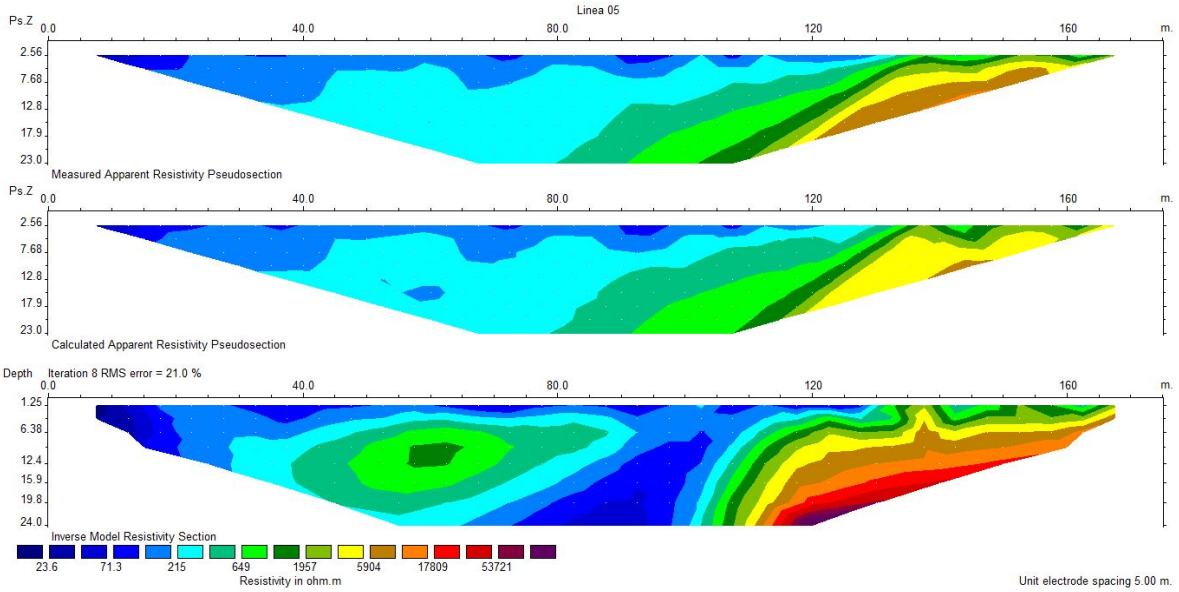


Gráfico 11: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 5 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

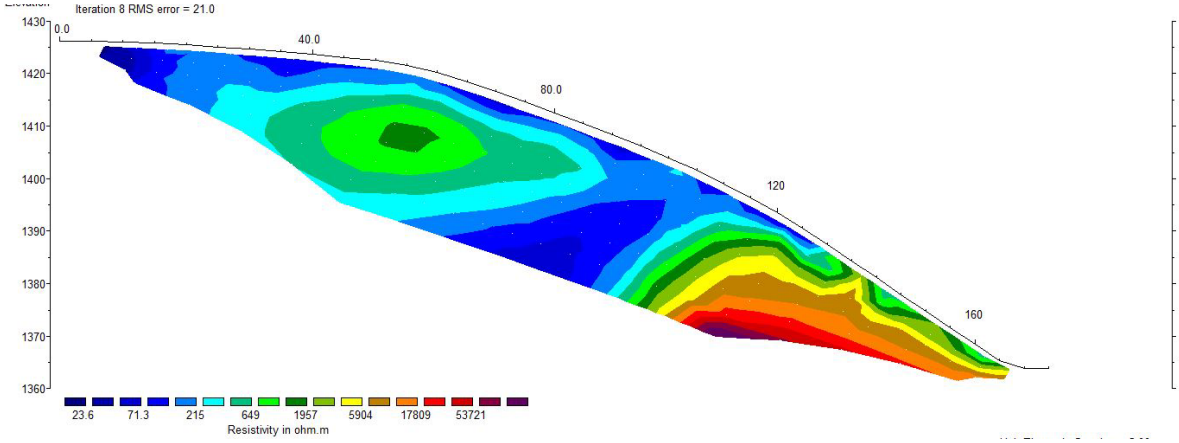


Gráfico12: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 5 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

LINEA N° 5	
Espaciamiento entre electrodos	5 m
Arreglo	Wenner
Cantidad de datos	189
Mínima locación	0 m
Máxima locación	160 m
Numero de Niveles	9
Numero de electrodos	36
Total Iteraciones	8

Tabla 10: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 5.

Interpretación:

En la Línea 5 de Tomografía Eléctrica realizada en el Software RES2INV, podemos darnos cuenta de las siguientes propiedades:

El espaciamiento entre electrodos es de 5 metros, el arreglo que se utilizo es wenner, la cantidad total de datos tomados es de 189, su máxima locación es de 160 metros, esta línea posee 9 niveles de profundidad, un total de 36 electrodos y se realizaron 8 iteraciones dándonos un margen de error de 21.0%.

En el grafico 11, podemos apreciar que nos muestra tres ventanas de resultados, la primera corresponde a los datos medidos en el campo, que vendría ser la resistividad aparente. La segunda ventana corresponde a los datos calculados de la resistividad aparente en el res2inv, Y finalmente la tercera ventana corresponde al modelo inverso de resistividad real.

Finalmente, en el grafico 12, tenemos la sección de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 5 de la zona de estudio, donde podemos apreciar claramente un valor mínimo de resistividad de 23.6 ohm-m y un valor máximo de resistividad de 53721 ohm-m. Se tiene en la parte inferior derecha al igual que la sección anterior una zona con valores muy altos de resistividades que corresponden según geología a los tufos volcánicos ya que estos son alta mente resistivos, Seguidamente podemos detectar claramente los horizontes geológicos teniendo en superficie a los depósitos recientes perteneciente a los terrenos de cultivo (material eólico), seguidamente los depósitos recientes (material aluvial), siguiéndole el conglomerado aluvial pleistocénico y finalmente los conglomerados los tufos riolíticos. Lo que se puede agregar es que es notable la presencia de valores de resistividad bajos en medio que podrían corresponder a una falla inferida.

5.2.1.6 LÍNEA 6

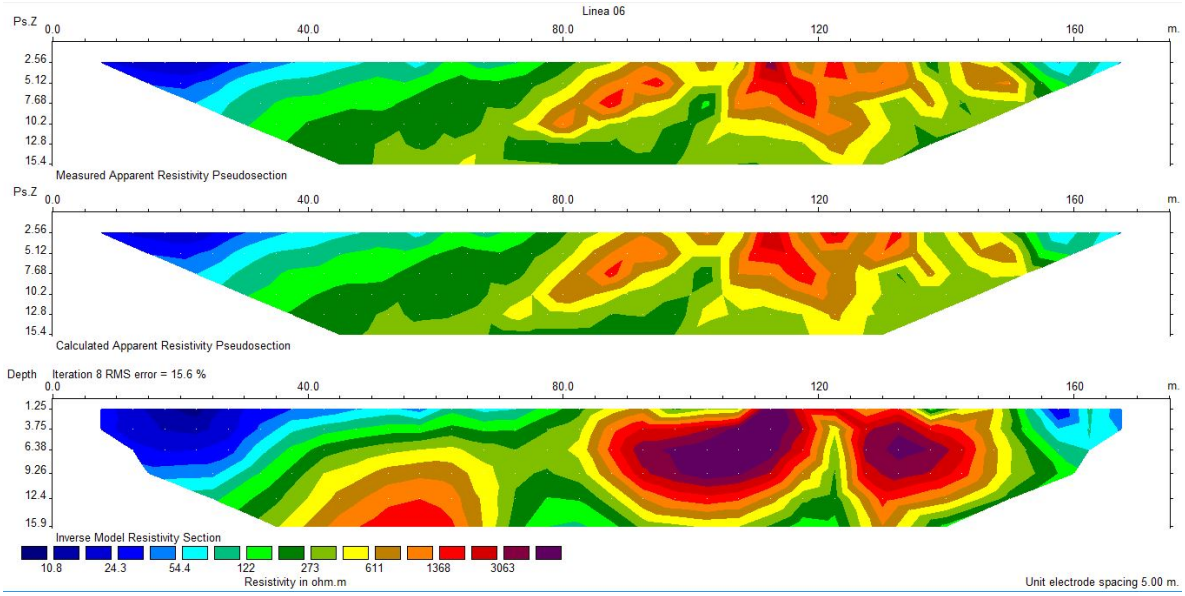


Gráfico 13: Secciones de resistividad eléctrica correspondientes a la línea 6 de estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

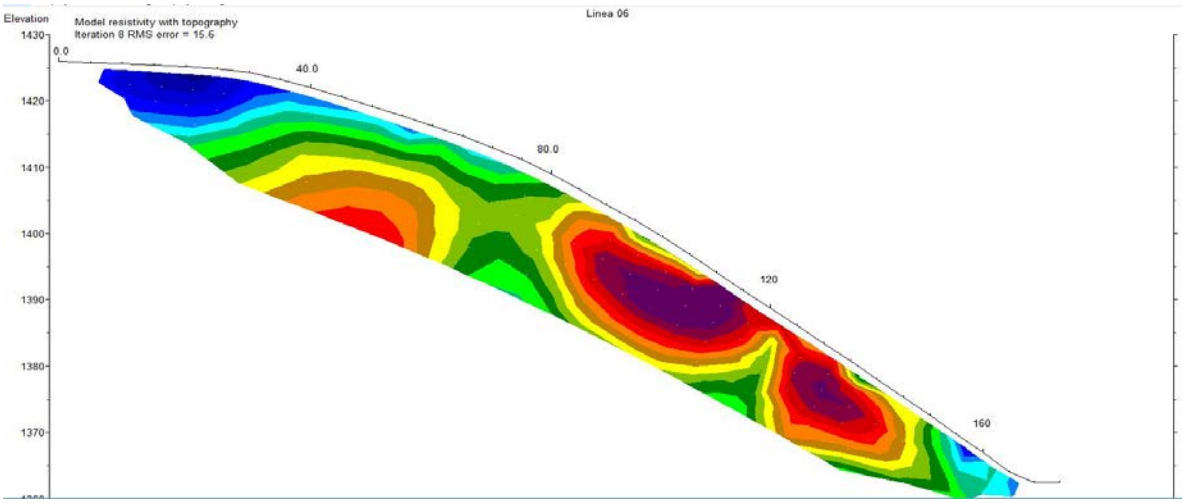


Gráfico 14: Sección de modelo inverso de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 6 del estudio en el sector El Alto. Fuente: (RES2INV)

LINEA N° 6	
Espaciamiento entre electrodos	5 m
Arreglo	Wenner
Cantidad de datos	189
Mínima locación	0 m
Máxima locación	160 m
Numero de Niveles	9
Numero de electrodos	36
Total Iteraciones	8

Tabla 11: Propiedades de la sección de resistividad perteneciente a la línea 6.

Interpretación:

En la Línea 6 de Tomografía Eléctrica realizada en el Software RES2INV, podemos darnos cuenta de las siguientes propiedades:

El espaciamiento entre electrodos es de 5 metros, el arreglo que se utilizo es wenner, la cantidad total de datos tomados es de 189, su máxima locación es de 160 metros, esta línea posee 9 niveles de profundidad, un total de 36 electrodos y se realizaron 8 iteraciones dándonos un margen de error de 15.6 %.

En el grafico 13, podemos apreciar que nos muestra tres ventanas de resultados, la primera corresponde a los datos medidos en el campo, que vendría ser la resistividad aparente. La segunda ventana corresponde a los datos calculados de la resistividad aparente en el res2inv, Y finalmente la tercera ventana corresponde al modelo inverso de resistividad real.

Finalmente, en el grafico 14, tenemos la sección de resistividad eléctrica con topografía correspondiente a la línea 6 de la zona de estudio, donde podemos apreciar claramente un valor mínimo de resistividad de 10.8 ohm-m y un valor máximo de resistividad de 3063 ohm-m. Se tiene en la parte superior derecha una zona con valores muy altos de resistividades que corresponden según geología a los tufos volcánicos ya que estos son alta mente resistivos, Seguidamente podemos detectar claramente los horizontes geológicos teniendo en superficie a los depósitos recientes perteneciente a los terrenos de cultivo (material eólico), seguidamente los depósitos recientes (material aluvial), siguiéndole el conglomerado aluvial pleistocénico y finalmente los conglomerados los tufos riolíticos. Lo que se puede agregar es que es notable la presencia de valores de resistividad bajos en superficie que podrían corresponder a la zona donde normalmente en actualidad siempre esta en constante riego.

INTERPOLACION EN OASIS MONTAJ- INVERSIÓN:

Lo mostrado anteriormente son modelos de resistividad creados en un software de inversión RES2INV, este programa nos facilita a crear modelos de inversión de resistividad real, pero con el paso de los años han salido mejores programas que nos facilitan a realizar las interpolaciones, este es el caso del software Oasis Montaj, el cual nos permite crear un modelo de resistividad con mejor interpolación de los datos y resolución de estos. En seguida resumiré lo que se realiza en el programa:

- Una vez teniendo la data de inversión facilitada por el programa res2inv, procedemos a importarla creando un data base en nuestro programa Oasis Montaj.
- Importamos todas nuestras líneas de resistividad en un solo data base para facilitar el proceso de interpolación, de igual modo creamos también un data base de la topografía mediante griddin usando el modelo de minimal curvatura.
- Teniendo todos los datos, procedemos a crear un 3D griddin (voxler), en donde usaremos el interpolador Kriggin, este interpolador en lo que nos ayuda es que realiza un análisis exploratorio de los datos, un análisis variográfico y una estimación espacial. Garantiza la mínima varianza de la estimación, reduce al mínimo la varianza del error de estimación, es el mejor estimador lineal insesgado.
- Una ves creado nuestro voxler, procedemos a extraer de el con ayuda del grid de topografía sección por sección de resistividad para proceder a crear nuestros mapas de resistividad y así poder interpretarlos de la mejor manera.
- Finalmente podemos unir todas nuestras secciones de resistividad para crear un modelo 3D y poder apreciar mejor nuestro modelo (ver gráfico 27).

Mostraremos ahora cada sección de resistividad correspondiente a las seis líneas de tomografía eléctrica en el programa Oasis Montaj (ver página 91 al 96), para comparar con los modelos hechos en res2inv, como se podrá apreciar el nivel de resolución para nuestra interpretación es mejor, en estas secciones se mostrará una pequeña interpretación de lo obtenido línea por línea y finalmente se crearán mapas para realizar una interpretación Geológica-Geofísica (Ver página 97 al 108), donde será explicado la caracterización litológica, las diferentes resistividades, las potencias de los horizontes y las discontinuidades encontradas que nos facilitaran entender los deslizamientos ocurridos en el sector EL ALTO.

5.2.2 LÍNEAS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA - INVERSIÓN

5.2.1.1 LÍNEA 1

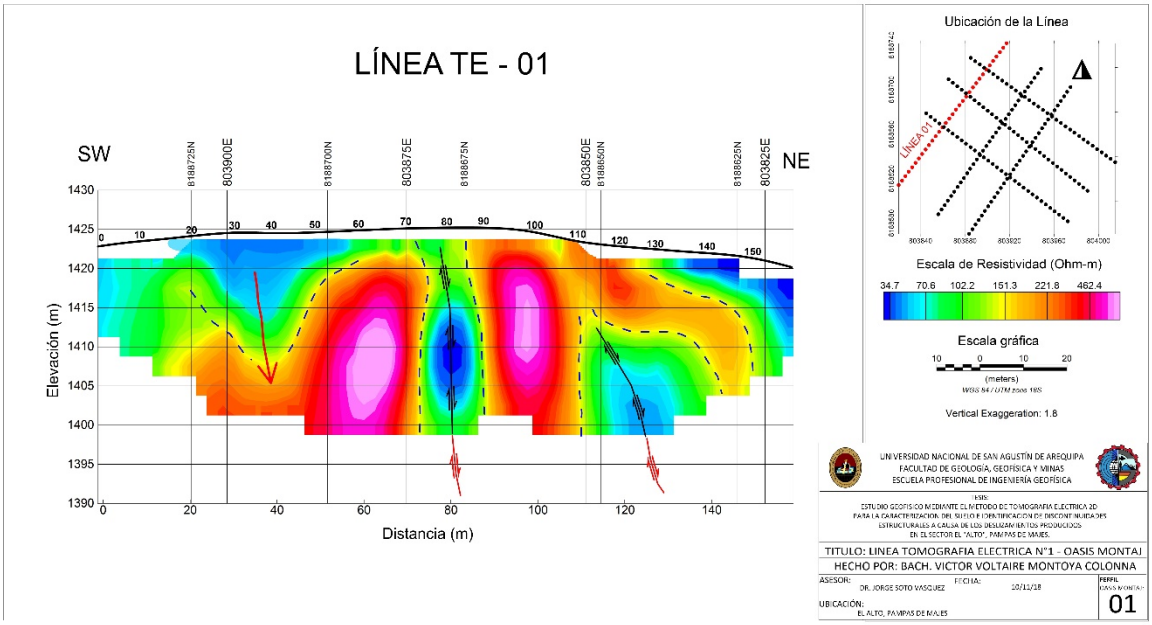


Gráfico 15: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 1 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj).

Interpretación:

Se presenta la sección de tomografía eléctrica incluida la topografía de la línea 1 de la zona de estudio. Tiene como mínima resistividad 34.7 ohm-m y como máxima resistividad 462.4 ohm-m a más. Presenta dos anomalías puntuales con la más alta resistividad y en medio de estas una anomalía puntual de baja resistividad. La línea tiene una extensión de 160 metros de largo y la sección tiene una profundidad promedio de investigación de 25 metros. Esta sección ha sido interpolada en el software de aplicación geofísica para procesamiento de datos conocido como Oasis Montaj.

5.2.1.2 LÍNEA 2

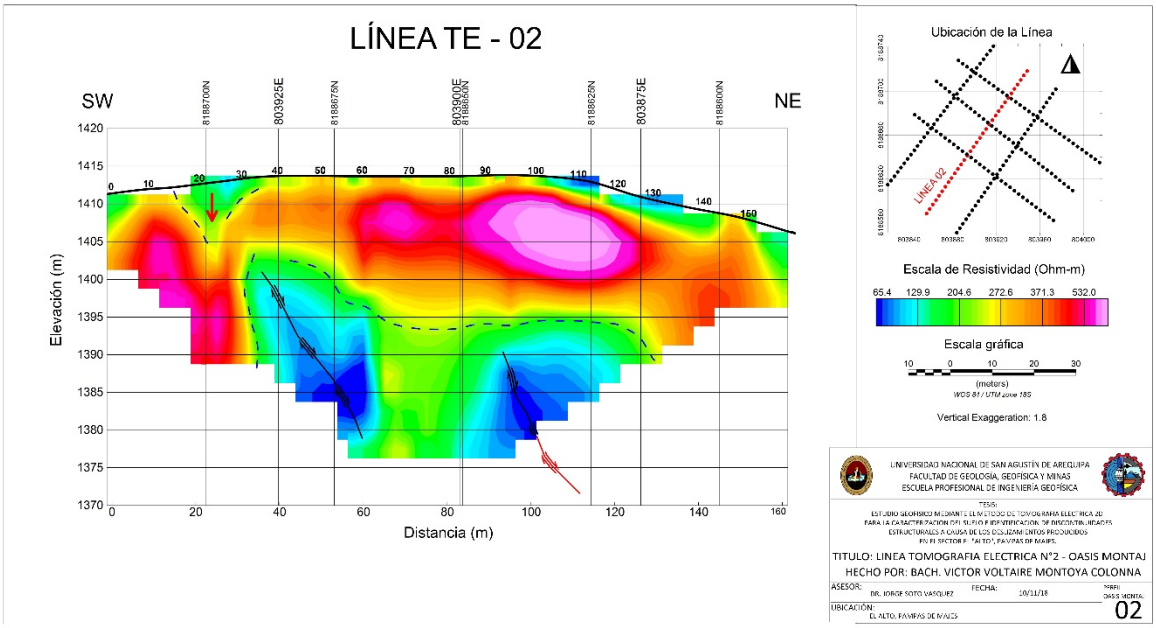


Gráfico 16: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 2 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj).

Interpretación:

Se presenta la sección de tomografía eléctrica incluida la topografía de la línea 2 de la zona de estudio. Tiene como mínima resistividad 65.4 ohm-m y como máxima resistividad 532.0 ohm-m a más. Presenta una anomalía puntual con los valores altos de resistividad al margen derecho superior de la sección y en la parte inferior presenta dos anomalías puntuales de baja resistividad. La línea tiene una extensión de 160 metros de largo y la sección tiene una profundidad promedio de investigación de 40 metros. Esta sección ha sido interpolada en el software de aplicación geofísica para procesamiento de datos conocido como Oasis Montaj.

5.2.1.3 LÍNEA 3

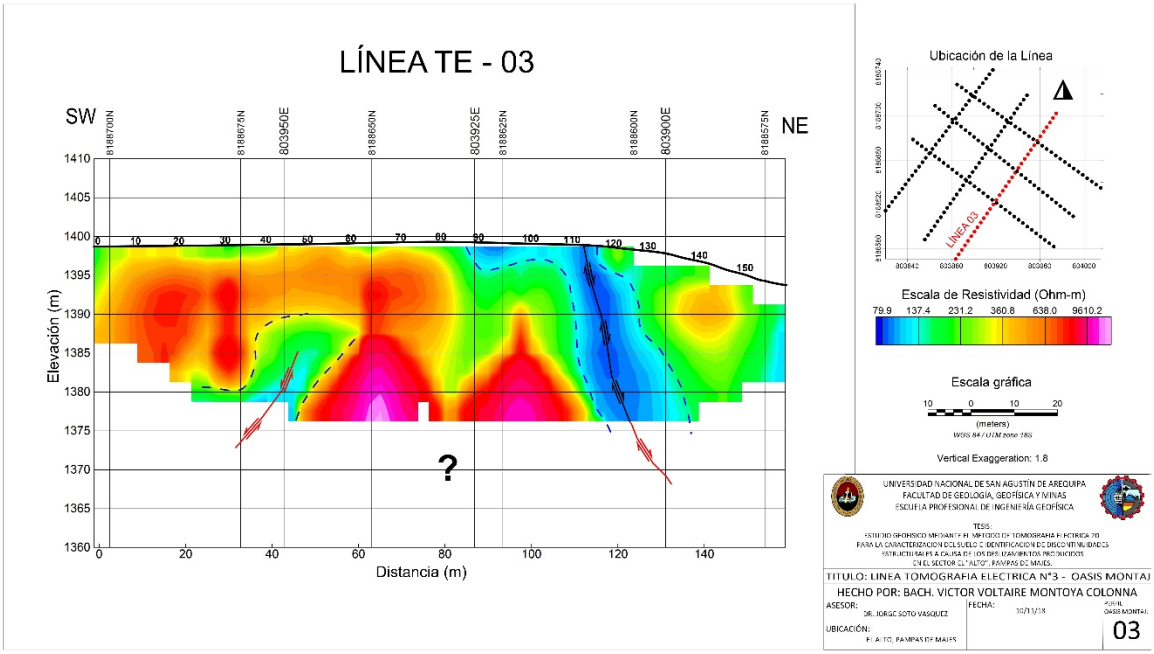


Gráfico 17: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 3 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj).

Interpretación:

Se presenta la sección de tomografía eléctrica incluida la topografía de la línea 3 de la zona de estudio. Tiene como mínima resistividad 79’9 ohm-m y como máxima resistividad 9610.2 ohm-m a más. Presenta dos anomalías puntuales con valores altos de resistividad en la parte inferior de la sección y en la parte derecha de la sección una anomalía puntual de aproximadamente 20 metros de profundidad presentando baja resistividad. La línea tiene una extensión de 160 metros de largo y la sección tiene una profundidad promedio de investigación de 25 metros. Esta sección ha sido interpolada en el software de aplicación geofísica para procesamiento de datos conocido como Oasis Montaj.

5.2.1.4 LÍNEA 4

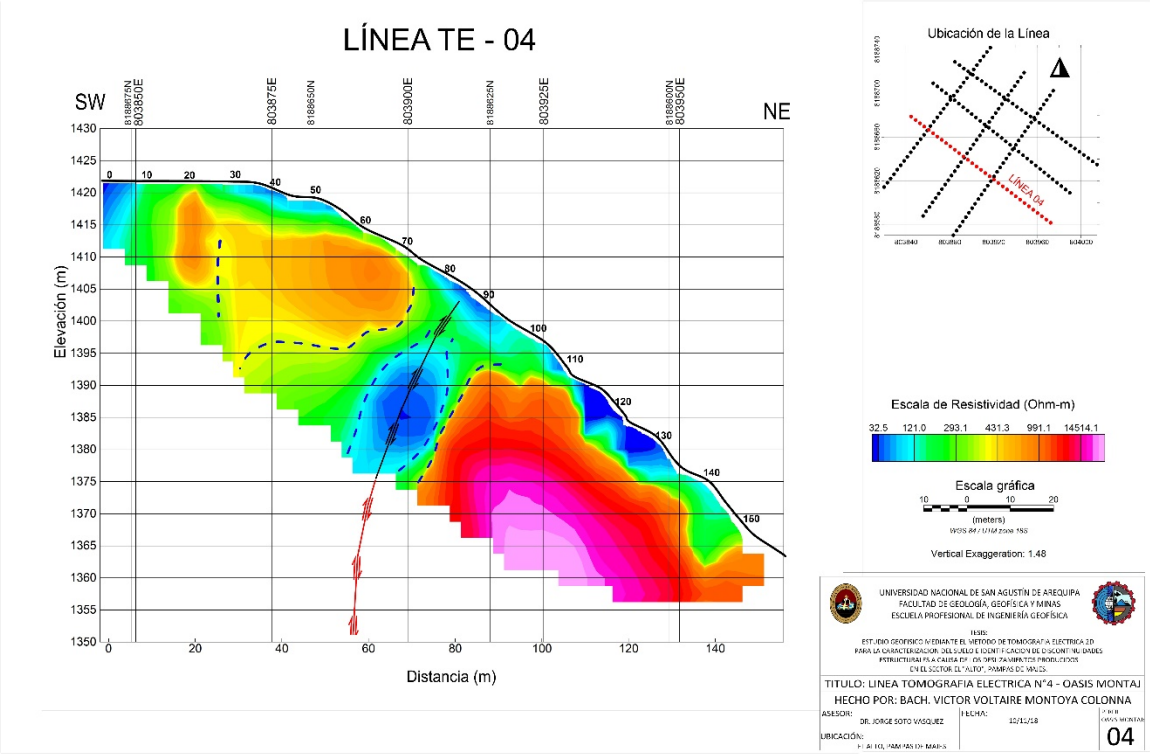


Gráfico 18: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 4 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj).

Interpretación:

Se presenta la sección de tomografía eléctrica incluida la topografía de la línea 3 de la zona de estudio. Tiene como mínima resistividad 32.5 ohm-m y como máxima resistividad 14514.1 ohm-m a más. Presenta una anomalía puntual de gran envergadura con valores altos de resistividad en la parte inferior derecha de la sección y en la parte izquierda de la sección una anomalía puntual pequeña que presenta baja resistividad. La línea tiene una extensión de 160 metros de largo y la sección tiene una profundidad promedio de investigación de 65 metros. Esta sección ha sido interpolada en el software de aplicación geofísica para procesamiento de datos conocido como Oasis Montaj.

5.2.1.5 LÍNEA 5

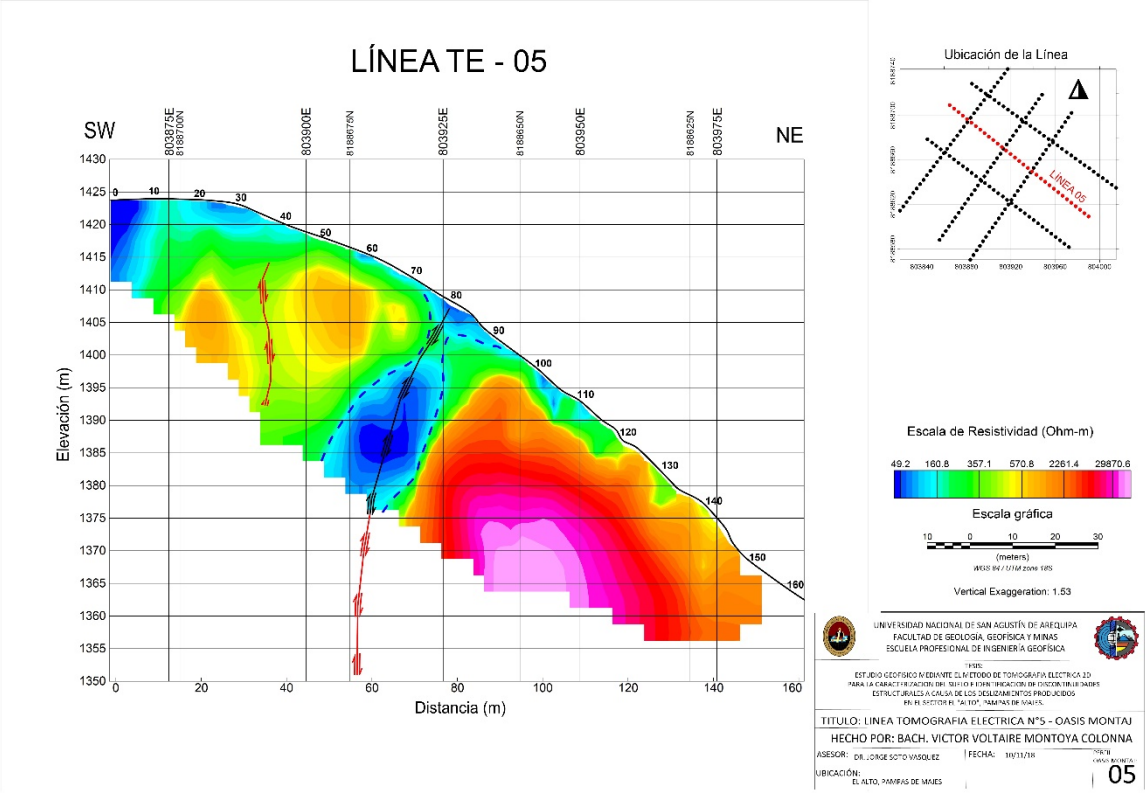


Gráfico 19: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 5 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj).

Interpretación:

Se presenta la sección de tomografía eléctrica incluida la topografía de la línea 3 de la zona de estudio. Tiene como mínima resistividad 49.2 ohm-m y como máxima resistividad 29870.6 ohm-m a más. Presenta una anomalía puntual de gran envergadura con valores altos de resistividad en la parte inferior derecha de la sección y en la parte izquierda de la sección una anomalía puntual pequeña que presenta baja resistividad. La línea tiene una extensión de 160 metros de largo y la sección tiene una profundidad promedio de investigación de 65 metros. Esta sección ha sido interpolada en el software de aplicación geofísica para procesamiento de datos conocido como Oasis Montaj.

5.2.1.6 LÍNEA 6

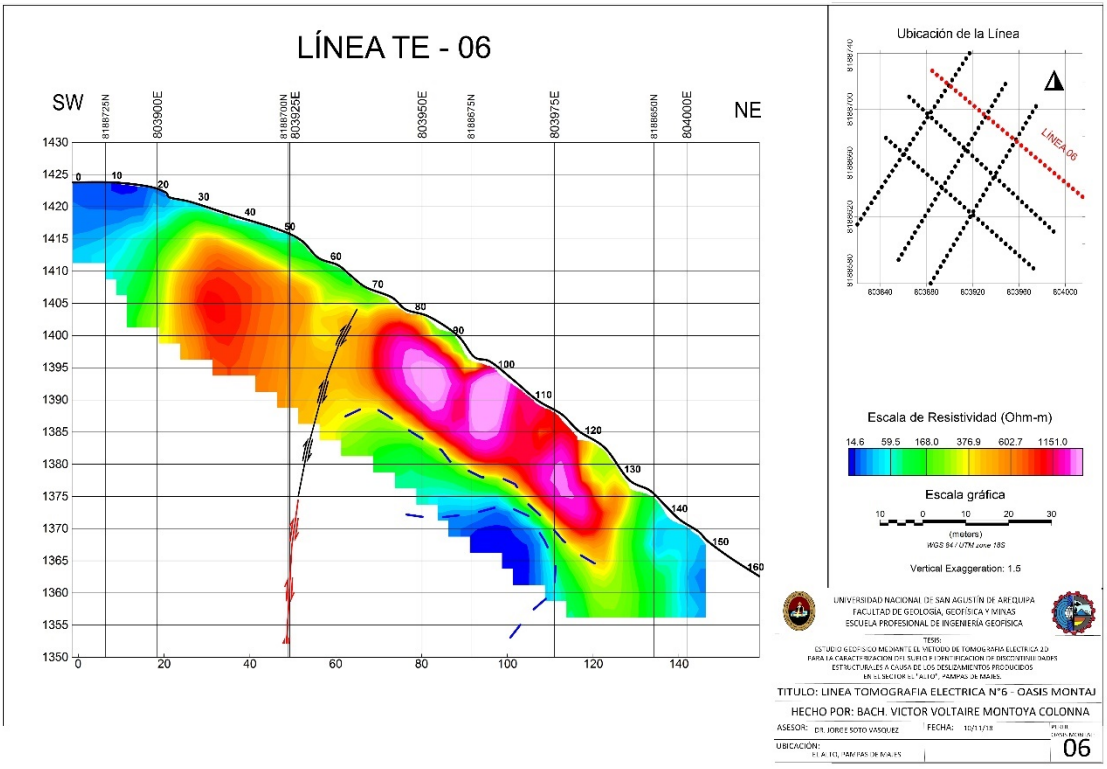


Gráfico 20: Sección de Tomografía eléctrica con topografía perteneciente a la linea 6 de la zona de estudio. Fuente (Oasis Montaj).

Interpretación:

Se presenta la sección de tomografía eléctrica incluida la topografía de la línea 3 de la zona de estudio. Tiene como mínima resistividad 14.6 ohm-m y como máxima resistividad 1151.0 ohm-m a más. Presenta una anomalía puntual de gran envergadura con valores altos de resistividad en la parte superior de la sección y en la parte inferior de la sección una anomalía pequeña que se pierde en profundidad que presenta baja resistividad. La línea tiene una extensión de 160 metros de largo y la sección tiene una profundidad promedio de investigación de 65 metros. Esta sección ha sido interpolada en el software de aplicación geofísica para procesamiento de datos conocido como Oasis Montaj.

5.3 INTERPRETACIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO – GEOFÍSICO

5.3.1 LINEA 1

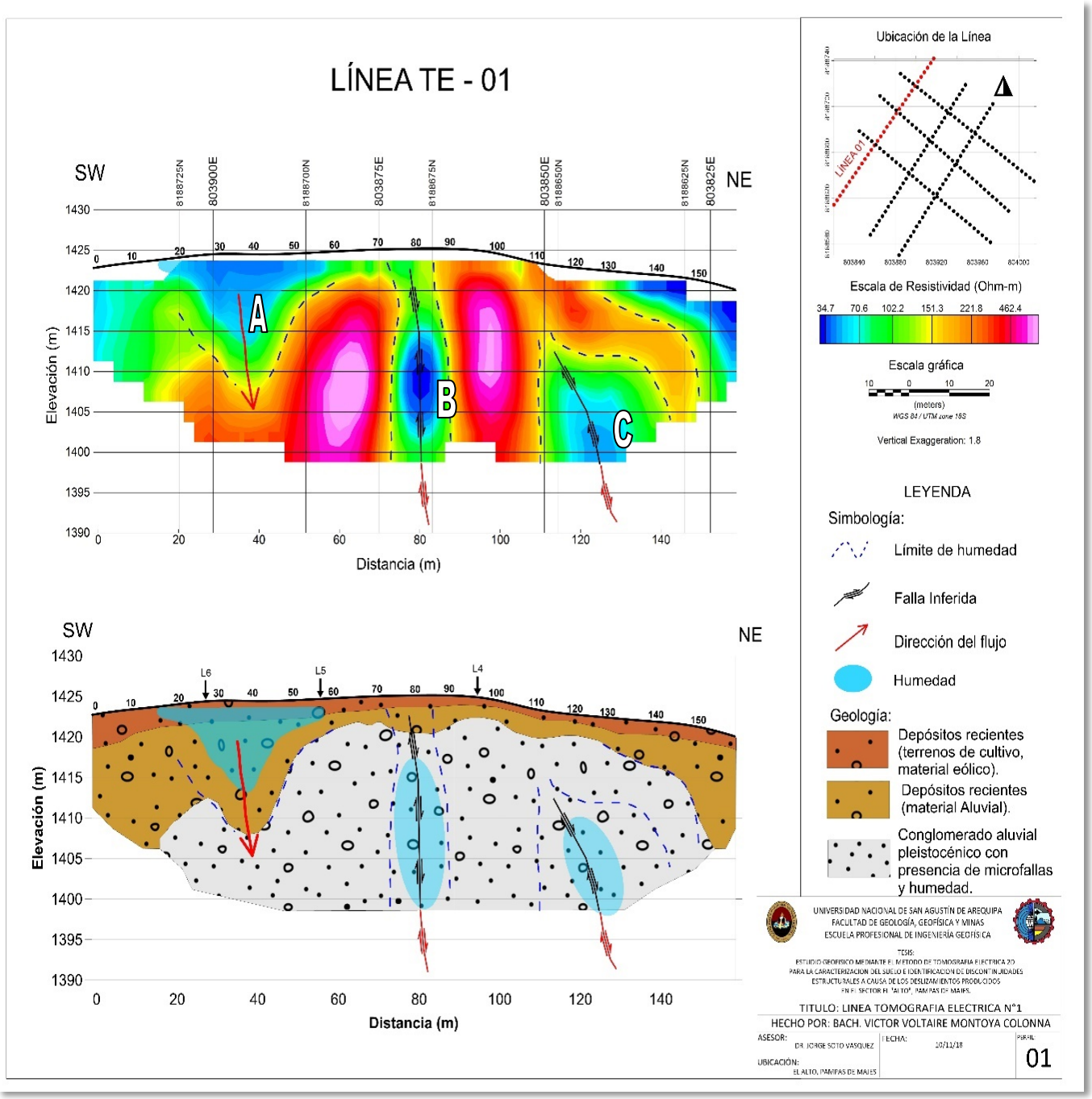


Gráfico 21: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 1, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15).

INTERPRETACIÓN:

Los resultados del mapa de resistividad para la Línea 1 de tomografía eléctrica corresponde la siguiente interpretación:

Horizontes:

- **1er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 34 a 70 ohm-m
  - Tiene una potencia de 2 a 2.5 metros aproximadamente.
  - Presenta contenido de humedad en dirección al flujo (A).
- **2do Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 72 a 151 ohm-m
  - Tiene una potencia de 3 a 9 metros aproximadamente.
- **3er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 184 – 470 ohm-m
  - Tiene una potencia de 10 a 20 metros aproximadamente.
  - Presenta contenido de humedad.

Geodinámica: Se encontraron 4 observaciones representativas identificadas

A) Dirección del flujo de agua que podría descender hasta 15 metros de profundidad.
B) Falla inferida en la parte media de la sección de gran envergadura con un aproximado de 25 metros a más, el cual presenta humedad por los bajos niveles de resistividad, se deduce que la falla inferida es de profundidad.
C) Falla inferida en la parte inferior derecha, con valores de resistividad entre 54 a 70 ohm-m, presenta indicio de humedad por los valores de resistividad. Nos muestra la dirección de una posible falla inferida hacia mayor profundidad.
D) Se muestra los límites de humedad por la diferencia de horizontes y resistividades de la sección. Estos límites de humedad separan a los horizontes notablemente.

Características del subsuelo (Geología):

1° Horizonte: Depósitos recientes (Terrenos de cultivo con material eólico)

2° Horizonte: Depósitos recientes (Material Aluvial)

3° Horizonte: Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla y posible humedad y/o saturación. (Presencia de gravas, arenas y arcillas).

5.3.2 LÍNEA 2

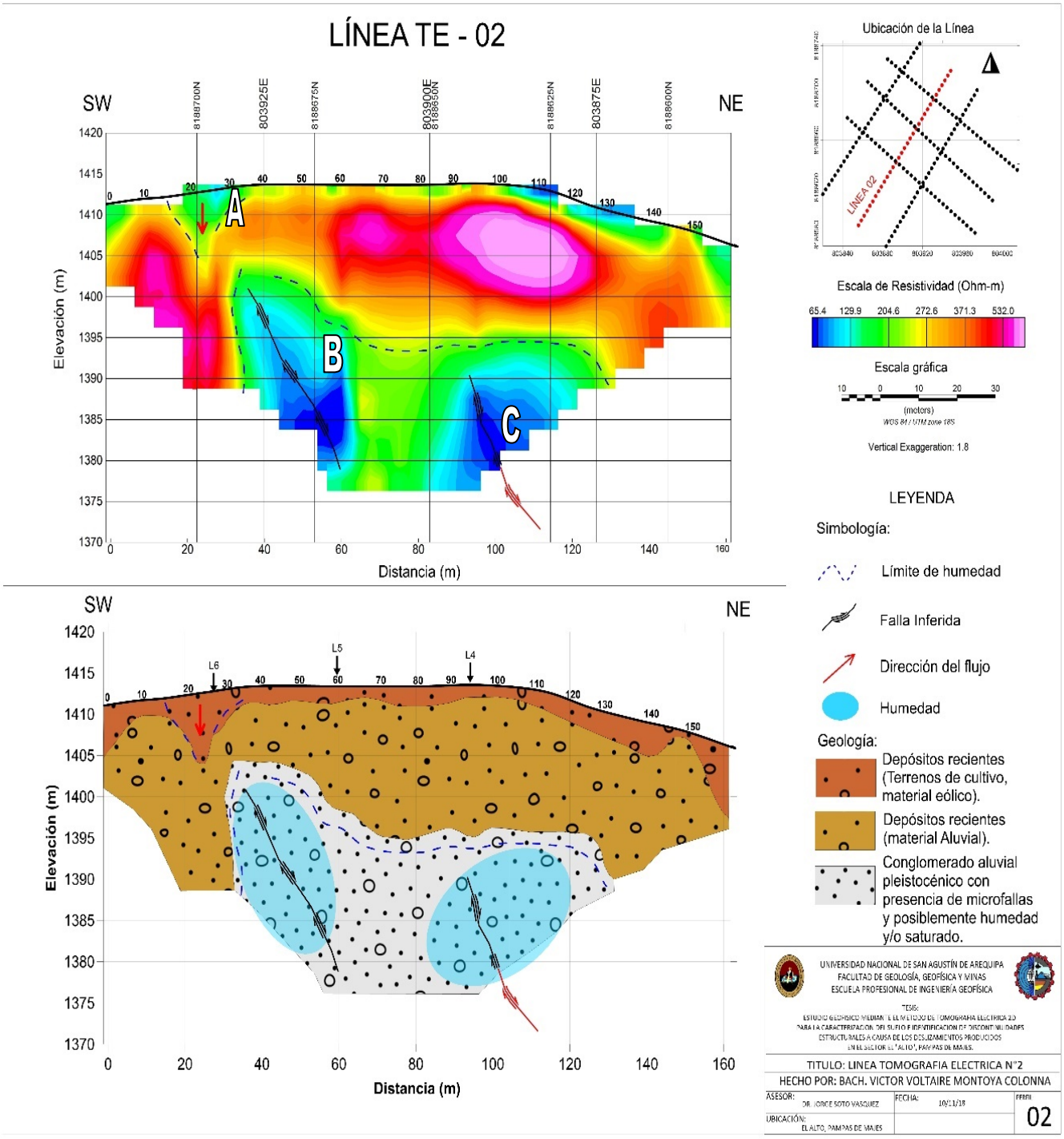


Gráfico 22: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la línea 1, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15).

INTERPRETACIÓN:

Los resultados del mapa de resistividad para la Línea 2 de tomografía eléctrica corresponde la siguiente interpretación:

Horizontes:

- **1er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 129 a 268 ohm-m
  - Tiene una potencia de 1 a 3 metros aproximadamente.
- **2do Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 272 a 500 ohm-m
  - Tiene una potencia de 12 a 22 metros aproximadamente.
- **3er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 65 – 200 ohm-m
  - Tiene una potencia de 13 a 30 metros aproximadamente.

Geodinámica: Se encontraron 4 observaciones representativas identificadas

A) Dirección del flujo de agua que probablemente desciende hasta 8 metros de profundidad.
B) Falla inferida en la parte inferior izquierda de un aproximado de 20 metros, el cual presenta un alto valor de humedad, debido a la dirección del flujo observado.
C) Falla inferida de la parte inferior derecha, notable indicio de humedad por los valores de resistividad. Nos muestra la dirección de que la posible falla inferida sea de mayor profundidad.
D) Se muestra los límites de humedad por la diferencia de horizontes y resistividades de la sección. Estos límites de humedad separan a los horizontes notablemente.

Características del subsuelo (Geología):

1° Horizonte: Depósitos recientes (Terrenos de cultivo con material eólico)

2° Horizonte: Depósitos recientes (Material Aluvial)

3° Horizonte: Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla y posible humedad y/o saturación. (Presencia de gravas, arenas y arcillas).

5.3.3 LÍNEA 3

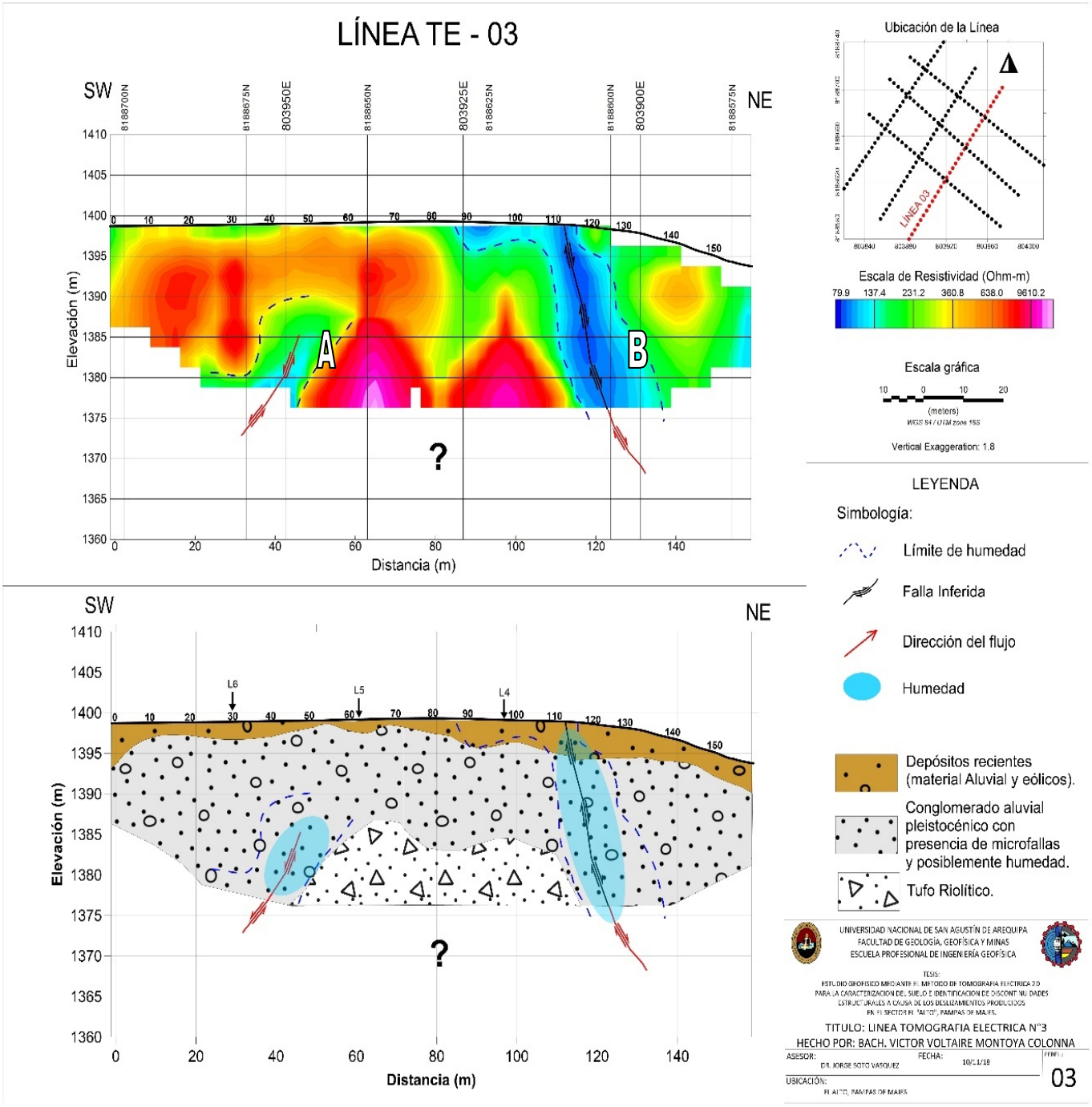


Gráfico 23: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 3, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15).

INTERPRETACIÓN:

Los resultados del mapa de resistividad para la Línea 3 de tomografía eléctrica corresponde la siguiente interpretación:

Horizontes:

- **1er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 142 a 231 ohm-m
  - Tiene una potencia de 1 a 2 metros aproximadamente.
- **2do Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 370 a 600 ohm-m
  - Tiene una potencia de 10 a 13 metros aproximadamente.
  - Presenta contenido de humedad
- **3er Horizonte:**
  - Resistividades variables mayores a 9610 ohm-m
  - Tiene una potencia de 8 a 10 metros aproximadamente.

Geodinámica: Se encontraron 3 observaciones representativas identificadas

A) Falla inferida por baja resistividad mostrada en la parte inferior izquierda de la sección.

B) Falla inferida de gran longitud con un aproximado de 25 metros a más, presentando un gran contenido de humedad desde la superficie, notable por el valor de la resistividad. Presenta también que la falla inferida es de mayor profundidad.

C) Los límites de humedad rodean notablemente las zonas donde la resistividad es más baja y se presenta contenido de humedad.

Características del subsuelo (Geología):

1° Horizonte: Depósitos recientes (Terrenos de cultivo con material eólico y material aluvial)

2° Horizonte: Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla y posible humedad y/o saturación. (Presencia de gravas, arenas y arcillas).

3° Horizonte: Tufo riolítico.

5.3.4 LÍNEA 4

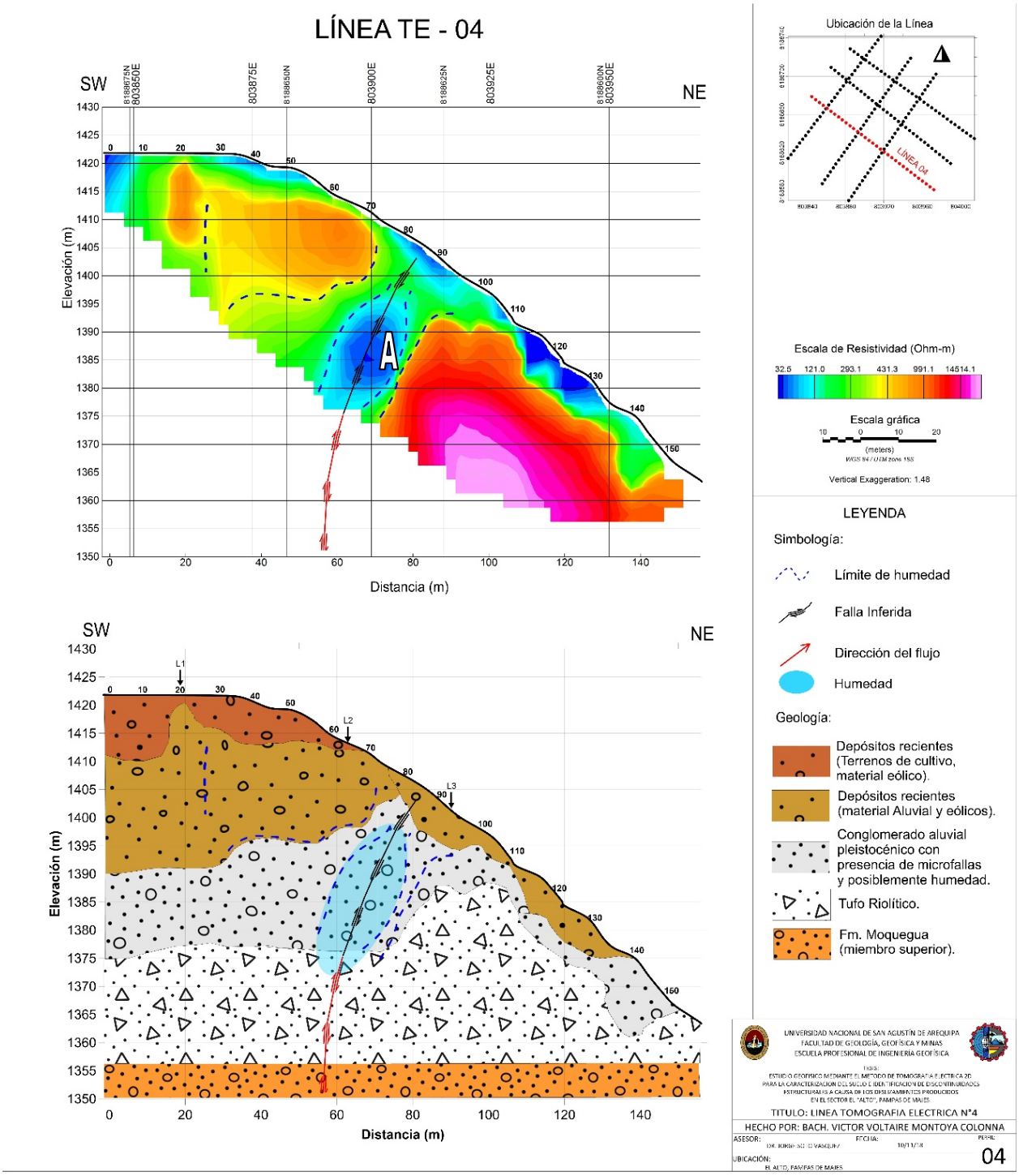


Gráfico 24: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 4, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15).

INTERPRETACIÓN:

Los resultados del mapa de resistividad para la Línea 4 de tomografía eléctrica corresponde la siguiente interpretación:

Horizontes:

- **1er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 32 a 115 ohm-m
  - Tiene una potencia de 2 a 7 metros aproximadamente.
- **2do Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 132 a 431 ohm-m
  - Tiene una potencia de 2 a 18 metros aproximadamente.
- **3er Horizonte:**
  - Resistividades variables mayores a 130 a 293 ohm-m
  - Tiene una potencia de 7 a 15 metros aproximadamente.
  - Presenta contenido de humedad.
- **4to Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 1000 a 14514 ohm-m
  - Tiene una potencia de 20 a 32 metros aproximadamente.
- **5to Horizonte:**
  - No se conocen datos. Se deduce Fm. Moquegua Inferior.

Geodinámica: Se encontraron 2 observaciones representativas identificadas

A) Falla inferida en la parte media de la sección, tiene una longitud aproximada mayor a 25 metros, presentando una zona de humedad notable por los datos de resistividad, también se denota que la falla inferida que por la litología se deduce que abarca una buena cobertura.

B) Los límites de humedad se muestran en la zona de falla inferida y en la zona de humedad, también limita los horizontes con respecto a la resistencia eléctricas.

Características del subsuelo (Geología):

1° Horizonte: Depósitos recientes (Terrenos de cultivo con material eólico)

2° Horizonte: Depósitos recientes (Material Aluvial)

3° Horizonte: Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla y posible humedad y/o saturación. (Presencia de gravas, arenas y arcillas).

4° Horizonte: Tufo riolítico

5° Horizonte: Formación Moquegua (Miembro Superior).

5.3.5 LÍNEA 5

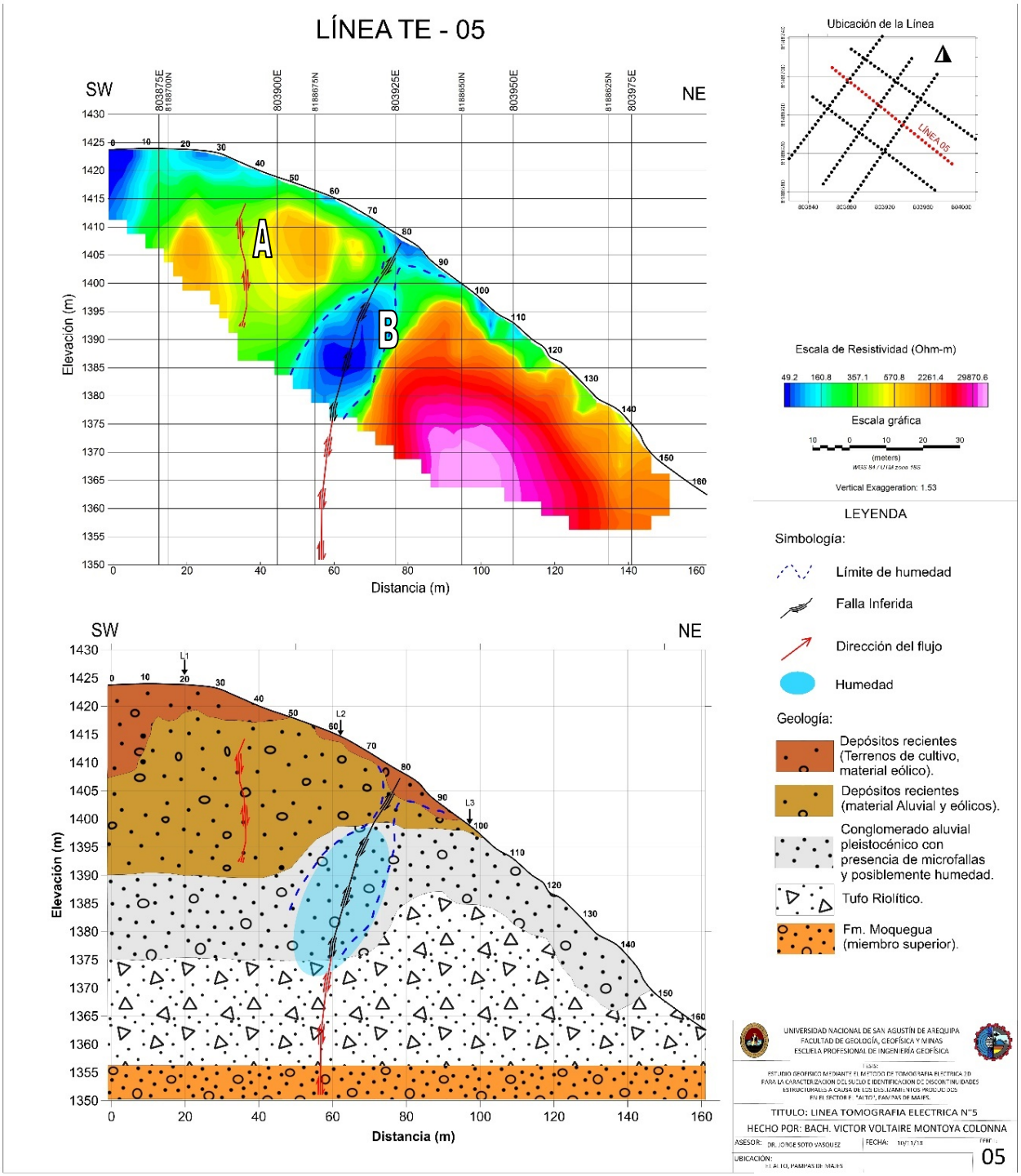


Gráfico 25: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 5, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15).

INTERPRETACIÓN:

Los resultados del mapa de resistividad para la Línea 5 de tomografía eléctrica corresponde la siguiente interpretación:

Horizontes:

- **1er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 49 a 160 ohm-m
  - Tiene una potencia de 4 a 9 metros aproximadamente.
- **2do Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 170 a 570 ohm-m
  - Tiene una potencia de 12 a 25 metros aproximadamente.
- **3er Horizonte:**
  - Resistividades variables mayores a 49 a 170 ohm-m
  - Tiene una potencia de 12 a 15 metros aproximadamente.
  - Presenta contenido de humedad.
- **4to Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 2261 a 29870 ohm-m
  - Tiene una potencia de 20 a 30 metros aproximadamente.
- **5to Horizonte:**
  - No se conocen datos. Se deduce Fm. Moquegua inferior.

Geodinámica: Se encontraron 3 observaciones representativas identificadas

A) Falla Inferida presentada en la parte superior izquierda de la sección de resistividad eléctrica.
B) Falla inferida en la parte media de la sección de resistividad eléctrica, presenta una longitud mayor a 25 metros, se muestra humedad desde la superficie. Se puede deducir que la falla inferida llega a profundidad.
C) El límite de humedad representa notoriamente toda la zona de humedad.

Características del subsuelo (Geología):

1° Horizonte: Depósitos recientes (Terrenos de cultivo con material eólico)

2° Horizonte: Depósitos recientes (Material Aluvial)

3° Horizonte: Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla y posible humedad y/o saturación. (Presencia de gravas, arenas y arcillas).

4° Horizonte: Tufo riolítico

5° Horizonte: Formación Moquegua (Miembro Superior).

5.3.6 LÍNEA 6

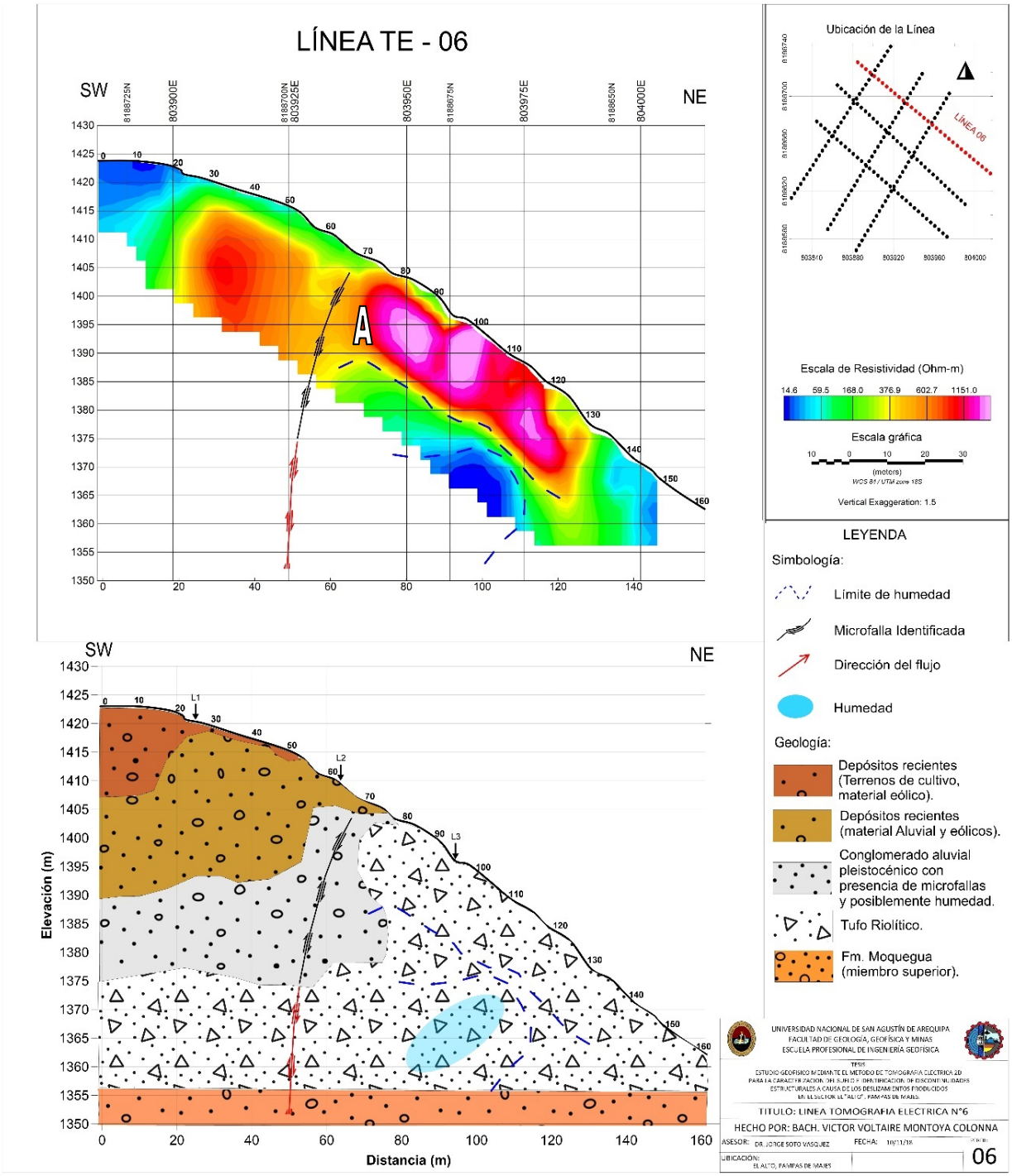


Gráfico 26: Sección de Tomografía eléctrica correspondiente a la linea 6, representa la interpretación Geológica – Geofísica. Fuente (SURFER15).

INTERPRETACIÓN:

Los resultados del mapa de resistividad para la Línea 6 de tomografía eléctrica corresponde la siguiente interpretación:

Horizontes:

- **1er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 14 a 59 ohm-m
  - Tiene una potencia de 1 a 18 metros aproximadamente.
- **2do Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 376 a 602 ohm-m
  - Tiene una potencia de 20 a 30 metros aproximadamente.
- **3er Horizonte:**
  - Resistividades variables entre 370 a 380 ohm-m
  - Tiene una potencia de 20 a 45 metros aproximadamente.
- **4to Horizonte:**
  - Resistividades variables mayores de 1151 ohm-m
  - Tiene una potencia de 20 a 30 metros aproximadamente.
  - Presenta rastros de humedad, poco notable.
- **5to Horizonte:**
  - No se conocen datos. Se deduce Fm. Moquegua inferior.

Geodinámica: Se encontraron 2 observaciones representativas identificadas

A) Falla inferida en la parte media de la sección de resistividad eléctrica, de una longitud aproximadamente de 20 metros a más, la falla inferida se puede deducir que llega a profundidad por que se encuentra en medio de los contactos.

B) El límite de humedad se denota en el horizonte 4, haciendo notar que hay una posible zona de humedad.

Características del subsuelo (Geología):

1° Horizonte: Depósitos recientes (Terrenos de cultivo con material eólico)

2° Horizonte: Depósitos recientes (Material Aluvial)

3° Horizonte: Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla y posible humedad y/o saturación. (Presencia de gravas, arenas y arcillas).

4° Horizonte: Tufo riolítico

5° Horizonte: Formación Moquegua (Miembro Superior).

RESULTADOS

A) Finalmente se presentan los resultados en resumen de las 3 primeras líneas de tomografía eléctrica, Líneas 01,02,03. Que tienen una longitud de 160 metros están separadas con un aproximado de 40 metros paralelamente entre línea y línea.

LINEA	RESISTIVIDADES MIN Y MAX	ESPESOR MIN Y MAX (m)	GEOLOGÍA	FALLAS
1	34.7 - 462 ohm-m	2 - 2.5 (Humedad)	Depósitos recientes (Mat. Eólico)	2 fallas inferidas (B Y C)
		3 - 15	Depósitos recientes (Mat. Aluvial)	
		10 - 20 (Humedad)	Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla inferida y posible humedad y/o saturación	
2	65.4 - 532 ohm-m	1 - 3	Depósitos recientes (Mat. Eólico)	2 fallas inferidas (B Y C)
		13 - 22	Depósitos recientes (Mat. Aluvial)	
		13 - 30	Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla inferida y posible humedad y/o saturación	
3	79.9 - 9610.2 ohm-m	1 - 2	Depósitos recientes (Mat. Eólico y aluvial)	1 falla inferida (A) 1 falla inferida (B)
		10 - 13	Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla inferida y posible humedad y/o saturación	
		8 - 10	Tufo Riolítico	

Tabla 12: Resumen de los datos tomados para las líneas de tomografía eléctrica, corresponde las líneas 01,02,03.

Resultado final:

- Las resistividades promedio que se vieron en estas 03 líneas de tomografía eléctrica están en un rango de 49 – 497 ohm-m de la línea 01 y 02. Seguidamente la línea 03 nos muestra una resistividad un poco más elevada que va del rango de entre 79 – 9610 ohm-m.
- Los espesores promedio que tenemos en estas 03 líneas de tomografía eléctrica guardan cierta correlación entre la línea 01 y 02. La línea 03 nos muestra una diferencia de espesores por razón que es notable la presencia de una unidad litológica (Tufo riolítico).
- La geología según las anomalías de resistividad mostradas, nos indican una correlación muy notable de la línea 01 y 02. Y la línea 03 presenta una adicionalmente una capa de tufo riolítico.

B) Finalmente se presentan los resultados en resumen de las 3 siguientes líneas de tomografía eléctrica, Líneas 04,05,06. Que tienen una longitud de 160 metros y están separadas con un aproximado de 35 metros paralelamente entre línea y línea.

LINEA	RESISTENCIA MIN Y MAX	ESPESOR MIN Y MAX (m)	GEOLOGÍA	FALLAS
4	32.5 - 14514 ohm-m	2 - 7	Depósitos recientes (Mat. Eólico)	1 falla inferida (A)
		2 - 18	Depósitos recientes (Mat. Aluvial)	
		7 - 15 (humedad)	Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla inferida y posible humedad y/o saturación	
		20 - 32	Tufo Riolítico	
		?	Fm. Moquegua (miembro Superior)	
5	49.2 - 29870 ohm-m	4 - 9	Depósitos recientes (Mat. Eólico)	1 falla inferida (A) 1 falla inferida (B)
		12 - 25	Depósitos recientes (Mat. Aluvial)	
		12 - 15 (Humedad)	Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla inferida y posible humedad y/o saturación	
		20 - 30	Tufo Riolítico	
		?	Fm. Moquegua (miembro Superior)	
6	14.6 - 1151 ohm-m	1 - 18	Depósitos recientes (Mat. Eólico)	1 falla inferida (A)
		20 - 30	Depósitos recientes (Mat. Aluvial)	
		20 - 45	Conglomerado aluvial pleistocénico con presencia de falla inferida y posible humedad y/o saturación	
		20 - 30 (Humedad)	Tufo Riolítico	
		?	Fm. Moquegua (miembro Superior)	

Tabla 13: Resumen de los datos tomados para las líneas de tomografía eléctrica, corresponde las líneas 04,05,06.

Resultado Final:

- Las resistividades promedio que se vieron en estas 03 líneas de tomografía eléctrica están en un rango de 40 – 22192 ohm-m de la línea 04 y 05. Seguidamente la línea 06 nos muestra una resistividad un poco más baja que va del rango de entre 14.6 – 1151 ohm-m.
- Los espesores promedio que tenemos en estas 03 líneas de tomografía eléctrica guardan gran correlación de espesores ya que las anomalías lo mostraron notablemente según los valores.
- La geología según las anomalías de resistividad mostradas, nos muestran una gran correlación, dándonos como resultados cinco horizontes geológicos.

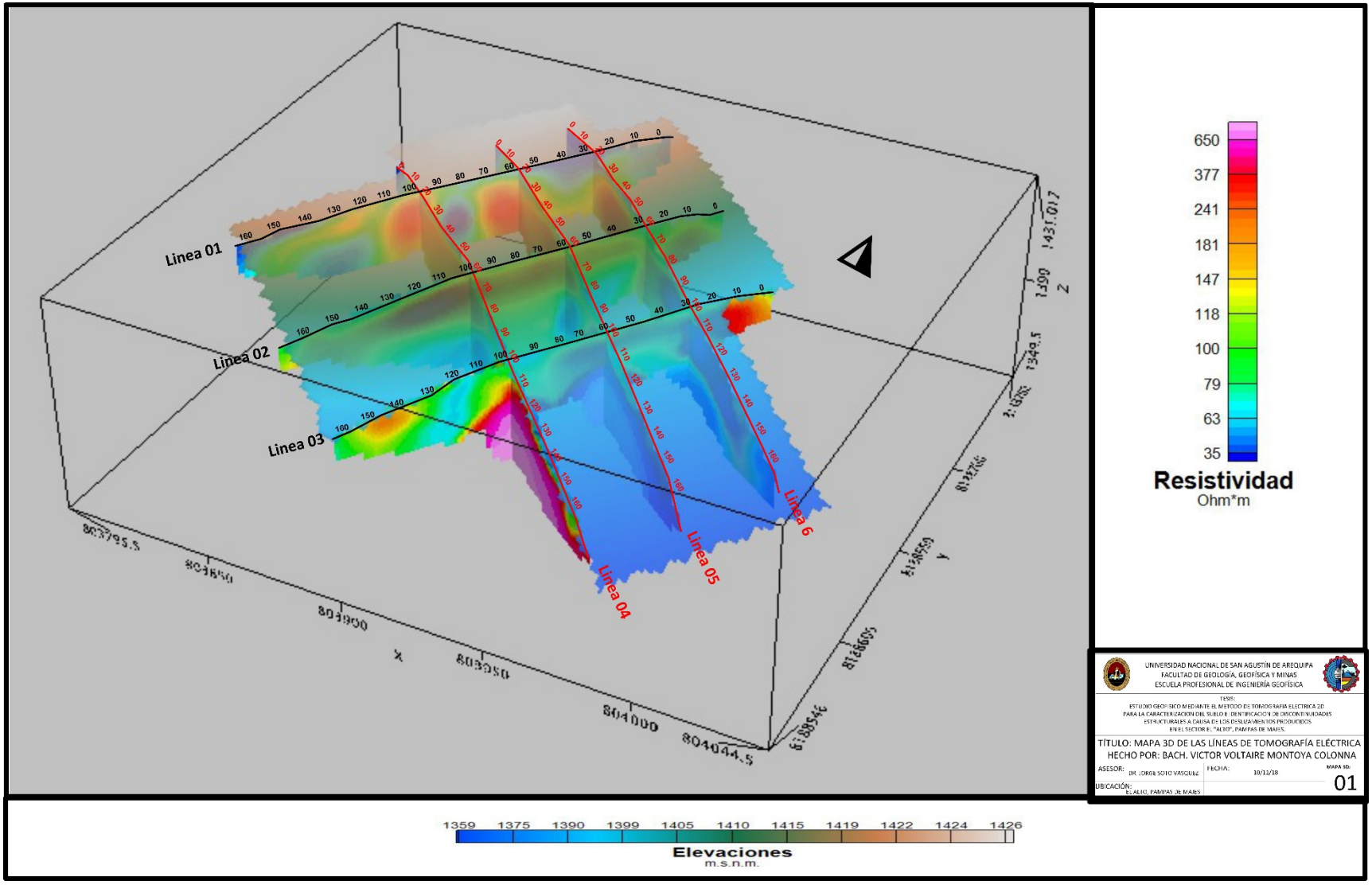


Gráfico 27: Mapa 3D de las líneas de tomografía eléctrica tomados en el sector EL ALTO – Pampas de Majes. Fuente (Oasis Montaj)

CONCLUSIONES

- Esta cicatriz llamada también, el deslizamiento “El ZARZAL”, va a continuar con su tendencia en dirección hacia las líneas geofísicas del estudio (Sector El Alto). La finalidad de este trabajo es llamar la atención de las autoridades, para que se elaboren planes de contingencias y evitar pérdidas humanas y materiales.

- El arreglo eléctrico Wenner proporciono una excelente resolución, así como una profundidad considerable para la visualización de las anomalías principales en las zonas de interés, al ser un dispositivo simétrico es más fiable a la hora de determinar estructuras horizontales que de resolver estructuras verticales.

- Se lograron caracterizar satisfactoriamente los diferentes horizontes geológicos, 1° horizonte: depósitos recientes (terrenos de cultivo con material eólico), 2° horizonte (Depósitos recientes, material aluvial), 3° conglomerado aluvial pleistocénico, 4° horizonte (Tufo riolítico) y 5° horizonte (formación Moquegua superior). Correspondiente para las diferentes líneas.

- El éxito de la tomografía eléctrica depende no solo del trabajo de campo durante la adquisición de datos, sino de toda una metodología que empieza con la preparación del área prospectada y se extiende hasta el procesamiento e interpretación de los datos geofísicos. Nuestro estudio es objetivo y se logró conseguir los resultados esperados.

- El deslizamiento “EL ZARZAL” es de tipo Rotacional Retrogresivo, teniendo una longitud de 1.4 km, un salto de 70 metros y tiene un volumen desplazado de 34 millones de m^3, cuyos factores principales son la saturación hídrica del conglomerado pleistocénico y aluvial. Infiltración hídrica de las hectáreas de cultivo, actividad sísmica y características geomorfológicas del valle.

- Este es el deslizamiento más activo del sur del país, teniendo un desplazamiento de 46 m/año (cuerpo) y de 76 m/año (Escarpa principal), es un movimiento lento, pero a la larga puede hacerse catastrófico para la carretera principal de la panamericana sur y para la población del sector EL ALTO, que es nuestra principal prioridad.

- Por fuente de estudios del INGEMMET, el deslizamiento el zarzal se clasifico en 4 sectores dentro de la escarpa principal de deslizamiento, siendo el “sector 1” el que se encuentra al lado del sector “EL ALTO”, es más propenso a deslizarse en años futuros, según el estudio y en comparación con nuestros resultados existe humedad

y fallamiento en las laderas cercanas al sector el alto. Según estudio habría un posible deslizamiento en condiciones extremas en septiembre del 2029 (12.8m/año), en condiciones normales en marzo del 2045 (5.6 m/año) y en condiciones lentas en enero de 2052 (4.7 m/año). El mundo esta propenso a recibir cantidad de fenómenos naturales y hoy en día es mejor prevenir que lamentar, a esperar que lleguen las estimaciones.

- Siempre hay que ser consciente de que pueden existir ambigüedades en la interpretación de los resultados. Por lo tanto, es importante considerar el máximo de información adicional de estudios anteriores, información respecto a vegetación, topografía, tipo de suelo, etc.

RECOMENDACIONES

- Para la detección de anomalías estructurales es recomendable el método Wenner, que es un dispositivo simétrico muy utilizado en el caso de capas plano-paralelas. Al ser un dispositivo simétrico es más fiable a la hora de determinar estructuras horizontales que de resolver estructuras verticales. Otra prioridad es que, dada la intensidad de su señal, esta configuración permite la investigación del subsuelo en terreno con fuerte ruido ambiental, puesto que la fuerza de la señal es inversamente proporcional al factor geométrico k.

- Se debe siempre recordar que la resistividad del terreno dependerá del contenido de humedad y contenido arcilloso. Por lo que se recomienda que al no recibir medición de la resistividad se humedezca siempre el terreno usando agua con sal. Lo que provocara que la resistividad eléctrica sea mas baja que la zona de interés. Permitiendo así mejorar la detección y mejorar las lecturas.

- En la inversión de los datos, para lograr una visualización indicada se recomienda localizar las primeras iteraciones (1 a 8) ya que nos muestran el menor error en la interpolación.

- Se recomienda a las autoridades y población del sector EL ALTO, estar alerta a los indicios de fenómenos naturales que puedan ocasionar algún perjuicio en la zona, pues está demostrado que es un terreno propenso a los deslizamientos.

- Se les exhorta a pedir al gobierno regional les realicen un plan de contingencia ya que es un fenómeno que al pasar de los días seguirá avanzando y generando destrucción a su paso

- Se recomienda a las autoridades que realicen los trámites pertinentes ante los funcionarios responsables de DEFENSA CIVIL, para que, sobre la base del diagnóstico realizado en el presente trabajo, y BAJO RESPONSABILIDAD, establezcan los protocolos de prevención y se determine las zonas de riesgo respectivas; de modo que no se otorguen licencias de construcción ni cualquier forma habilitación urbana en dichas zonas.

- Es pertinente la sugerencia de modificar el actual riego por gravedad o inundación, que se viene utilizando en la zona, para utilizar el riego por goteo; esto generará que el motivo principal que son las infiltraciones de agua en las capas subterránea disminuya y en consecuencia disminuirán los deslizamientos.

- Se sugiere que las instituciones como el INGEMMET (o el instituto geofísico del Perú, instituto geofísico de la Unsa etc.), realicen un monitoreo periódico del comportamiento geológico de la escapar principal del deslizamiento, para así tener oportunidad de establecer las alarmas ante la contingencia de eventos naturales con consecuencias catastróficas.

- Sería de gran ayuda para el gobierno regional de Arequipa poder hacer llegar la presente tesis, para poder exponer los resultados y aclarar que nos encontramos en un lugar propenso a deslizamientos que por culpa del factor humano no tiene marcha atrás.

BIBLIOGRAFÍA

- *AEMC INSTRUMENTS*. (s.f.). Obtenido de https://www.aemc.com/products/ground-testers/ground-tester-6471-np
- Ali Murillo, L. A. (2016). *Metodos de Prospeccion Geofísica aplicados a la investigación Geotécnica para estudio del recrecimiento de una presa de relaves en el distrito de Oyolo", UNSA.*
- Allue, O. (2014). *integracion de metodologia geofisicas de caracterizacion geologico-geotecnica del terreno.*
- ANAYA, E. P. (2010). *IMPLEMENTACIÓN DEL CÓDIGO ZONDRES2D PARA LA MODELACIÓN DIRECTA E INVERSA DE DATOS DE TOMOGRAFÍA DE DE DATOS DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD* .
- *Arreglo Wenner-Schlumberger*. (s.f.). Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-Wenner-Schlumberger-array-with-electrode-locations-and_fig3_260871233
- Autodema. (s.f.). *Autoridad Autonoma de Majes*. Obtenido de https://www.autodema.gob.pe/
- Barrera de la Cruz, M. A. (2003). *Estudio sobre el comportamiento de la ladera del Valle de Majes.* Arequipa.
- Bernand. (2003). *Short note on the deep of investigation of electrical method Iris instruments.*
- Betancourt, M. C. (2017). *CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA USANDO PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA EN LOS CERROS ORIENTALES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ.* Obtenido de http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6197/1/PolaniaBetancourtMariaCamila2017.pdf
- Butler. (2005). *Near-surface Geophysics.*
- Chavez. (2011). *Non-conventional 3D Electric Resistivity Tomography Arrays.*
- *Clasificacion Climatica segun Koppen-Geiger*. (s.f.). Obtenido de https://es.climate-data.org/america-del-sur/peru/arequipa/alto-de-majes-25919/
- Climate-data.org. (s.f.). *Clima alto de majes*. Obtenido de https://es.climate-data.org/america-del-sur/peru/arequipa/alto-de-majes-25919/

- Corominas. (2004). *Landslide Risk management.*
- Cruden, D. V. (1996). *Tipos y procesos de derrumbes.*
- Dahlin. (1993). *A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays.*
- Dahlin, T. (2001). *The development of electrical imaging techniques.*
- Edwards. (1997). *A modified pseudo section for resistivity and induced polarization.*
- Edwards, L. (1977). *A modified pseudoseccion for resitivity and induced-polarization geophysics.*
- Fernandez Sixto, E. A. (1998). *Investigacion del Conglomerado colapsable en VItor-Arequipa.* Arequipa.
- Fernandez, B. y. (1998). *ESTUDIO GEODINÁMICO Y EVALUACIÓN DE PELIGROS DEL VALLE DE MAJES.*
- *Geoperfo*. (s.f.). Obtenido de https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.geoperfo.com%2Fimages%2Fcontenidos%2F31.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.geoperfo.com%2Fes%2Fsistemas-de-propeccion%2Ftomografria-electrica.html&docid=b4XaR05w0e0rXM&tbnid=jePoLSgAemg2pM%3A&vet=10ahUKEwj
- *GEOTOMO SOFTWARE*. (s.f.). Obtenido de https://www.geotomosoft.com/
- Gonzales de Vallejo, L. (2002). *Ingenieria Geologica.*
- Griffiths. (1993). *Two-dimensional resistivity imagined and modeling in areas of complex geology.*
- Guizado Jol, J. (1968). *Geologia del Cuadrangulo de Aplao - 33r.* LIMA-PERU.
- Guizado, J. (1968). *Geologia del Cuadrangulo de Aplao 33r.*
- H.K., L. W. (2003). "*International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*".
- *IEC*. (s.f.). Obtenido de https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iec?c=21641
- Jacson, b. y. (1980). *Fallas y fracturas.*

- Llorens, R. C. (2009). *Movimientos de ladera (Landslide).*
- Loke. (2000). *Electrical imaging survey for enviromental and engineering studies.*
- Loke, M. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.* http://www.geomatrix.co.uk/tools/application-notes/Lokenote.pdf.
- Martinez. (2006). *Estudio Geotécnico del Deslizamiento Compuesto Gloria.* Arequipa.
- Martinez Vargas, A. (1980). *Investigación del conglomerado colapsable de la Cano-Vitor Arequipa.* Arequipa.
- Medina Gallegos, V. V. (2015). *Movimiento de Remoción de masas en Arequipa-Deslizamiento el Zarzal.* Arequipa.
- Mendivil. (1965). *Geologia de los cuadrangulos de Maure y Antavaje.* Lima.
- MENDOZA, J. A. (s.f.). *"Empleo del método geofísico Tomografía de Resistividad Eléctrica para la ubicación de unsitio de recarga de acuífero en Xochimilco"*. Obtenido de http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/8452/Tesis.pdf?sequence=1
- *MI blog de electronica*. (2015). Obtenido de https://hcasti.wordpress.com/2015/04/26/resistividad-o-resistencia-especifica/
- Molina. (2006). *Comparación de los Métodos 1-D Y 2-D de resistividad electrica por medio de sondeos tipo Wenner, Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD y RES2DINV.*
- Orellana. (1972). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua.*
- Orellana. (1982). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua.*
- Ortiz, G. (2007). *Caracterizacion geoambiental de balsas de lodos mineros mediante tomografia electrica.*
- Pagan, M. (2006). *plicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producidas por diferentes actividades antrópicas en la Región de Murcia.*
- Pellicer Jiménez, E. (2015). *Caracterización Mediante Tomografía Eléctrica del deslizamiento de Toledo (Oviedo),Master en Recursos Geológicos e Ingenieria Geológica, Universidad de Oviedo.*

- Pelton, W. R. (1978). *Inversion of two dimensional resistivity and induced polarisation data.*
- Perdomo, S. (2009). *Metodos electricos de prospeccion.*
- Perrone, A. (2014). *Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation.*
- Porras, B. Y. (2018). *CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA*. Obtenido de http://www.bib.usb.ve/tesis/000176106.pdf
- *Proyecto Majes*. (s.f.). Obtenido de https://www.picswe.com/pics/proyecto-majes-9c.html
- Reynolds. (1997). *Introduccion a la Geofisica aplicada y ambiental.*
- Rodriguez, J. a. (2005). *Exploracion Geofisica.*
- SENAMHI. (s.f.). *El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.* Obtenido de www.senamhi.com.pe
- Sharpe. (1938). *landslide and rhelated phenomena: a study of Mass-movements of soil and rocks.* https://www.researchgate.net/publication/250084135_The_First_Classification_of_Landslides.
- Smith, N. a. (1984). *Two-dimensional DC resistivity Two-dimensional DC resistivity.*
- Telford. (1990). *Geofisica Aplicada.*
- Telford, W. G. (1990). *"Applied Geophysics"*. Cambridge University Press, New York,pp. 1-422.
- Ticona Paucara, J. (2007). *PLAN DE MITIGACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS PRODUCIDOS POR EFECTO DE LA SATURACIÓN EN LOS TERRENOS DE LA IRRIGACIÓN MAJES.* Arequipa.
- Tripp, A. H. (1984). *Two-dimensional resistivity inversion.*
- Tsourlos. (1995). *Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data: D. Phil. Thesis University of York.*
- Udiaz, A. (1997). *Fundamentos de geofisica.* Madrid.

- Udiaz, A. (1997). *Fundamentos de Geofisica.*
- *Ultra Edit*. (s.f.). Obtenido de https://www.ultraedit.com/products/uestudio/