

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y  
PETRÓLEOS**

**MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO PRELIMINAR Y  
CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TERRAZA DE  
CHUNCHI, PROVINCIA DE CHIMBORAZO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA GEÓLOGA**

**GRACE ELIZABETH BARRERA SARABIA**

grace.barrera@epn.edu.ec

**DIRECTOR: Ing. SANDRA PROCEL PhD**

sandra.procel@epn.edu.ec

**Quito, octubre 2021**

## DECLARACIÓN

Yo, Grace Elizabeth Barrera Sarabia, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

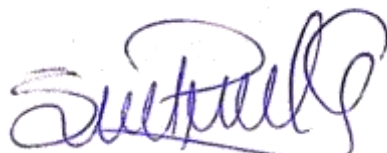
A handwritten signature in purple ink, reading "Grace Elizabeth Barrera Sarabia". The signature is written in a cursive style with a large initial "G" and "B".

---

Grace Elizabeth Barrera Sarabia

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Grace Elizabeth Barrera Sarabia, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Sandra Procel', is written above a horizontal dashed line.

PhD. Sandra Procel

DIRECTORA

## **AGRADECIMIENTOS**

Querida yo misma, te agradezco por haberte levantado cada vez que te caíste y porque continúas sacudiéndote la tierra para intentarlo una vez más. Te agradezco el haberte quedado todas aquellas veces en las que quisiste salir corriendo. Quiero que sepas lo orgullosa que estoy de ti por tu valentía y por lo que has conseguido hasta ahora.

A mi mami, Carmen, por sus esfuerzos por sacarnos adelante y su apoyo incondicional. A ti Mocosó por ser el técnico de la familia y ayudarme con los fallos técnicos. A Mylo por hacerme compañía en las noches de desvelos. A Fernando por ser un apoyo y una motivación.

A la PhD. Sandra Procel por aceptarme como una de sus tésistas, guiarme en la elaboración de este trabajo y haber compartido sus conocimientos dentro de las aulas.

A la Ing. Yesenia Enríquez por compartir sus conocimientos en el uso de software para este trabajo.

A la Ing. Alexandra Orozco por compartir sus conocimientos, además de la ayuda brindada en lo concerniente al análisis granulométrico.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
RESUMEN .....	X
ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. <i>Objetivo General</i> .....	14
2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	14
3. MARCO TEÓRICO .....	15
3.1. <i>Conceptos Básicos, Elementos y Estudios para el Desarrollo Cartográfico, Geológico e Hidrogeológico Local</i> .....	15
3.1.1. <i>Hidrología</i> .....	15
3.1.2. <i>El Ciclo Hidrológico</i> .....	15
3.1.3. <i>Precipitación</i> .....	17
3.1.4. <i>Infiltración</i> .....	17
3.1.5. <i>Evapotranspiración</i> .....	17
3.1.6. <i>Escorrentía Superficial</i> .....	20
3.1.7. <i>Escorrentía Subterránea</i> .....	20
3.1.8. <i>Hidrogeología</i> .....	21
3.1.9. <i>Hidrogeoquímica</i> .....	21
3.1.10. <i>Calidad del Agua Subterránea</i> .....	22
3.2. <i>Geofísica, Uso del Método Audio Magnetotelúrico en la Hidrogeología</i> .....	23
3.3. <i>Acuíferos y su Clasificación</i> .....	24

3.3.1. Tipos de Acuíferos .....	25
3.4. Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	29
4. ÁREA DE ESTUDIO .....	31
4.1. Caracterización del Área de Estudio .....	31
4.1.1. Localización del Área de Estudio.....	31
4.1.2. Geología Regional .....	32
4.1.3. Geología Local.....	36
4.1.4. Geomorfología.....	42
4.1.5. Uso y Ocupación del Suelo .....	45
4.1.6. Clima.....	46
5. METODOLOGÍA .....	48
5.1. Levantamiento Bibliográfico y de Datos Existentes .....	48
5.1.1. Levantamiento de Bases Cartográficas, Datos Meteorológicos, Geológicos e Hidrológicos.....	48
5.1.2. Levantamiento de las Informaciones de Pozos y Vertientes Existentes .....	49
5.2. Levantamiento de Información Geofísica .....	51
5.3. Granulometría de Suelos .....	58
6. RESULTADOS .....	63
6.1. Inventario de Puntos de Agua.....	63
6.1.1. Parámetros Físicos del Agua .....	63
6.1.2. Calidad de Agua .....	64
6.2. Contexto Hidrogeológico.....	65
6.2.1. Granulometría.....	65
6.2.2. Audio Magnetotelúrico.....	71
6.3. Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	75
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
7.1. Conclusiones.....	78
7.2. Recomendaciones.....	80
8. BIBLIOGRAFÍA .....	81

<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO I. FICHAS TÉCNICAS AUDIO MAGNETOTELÚRICO .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO II. PERFIL AUDIO MAGNETOTELÚRICO DE RESISTIVIDADES .....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO III. CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA S.U.C.S. ....</b>	<b>101</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> El ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global anual en unidades relativas a un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre. Fuente: Chow et. al. (1994).....	16
<b>Figura 3.2</b> Mineralización del agua subterránea. Modificado de Werner (1996)..	22
<b>Figura 3.3</b> Esquema de instalación del equipo para la toma de datos magnetotelúricos.....	24
<b>Figura 3.4 A)</b> Esquema de un acuífero. <b>B)</b> Ocurrencia del agua subterránea en las rocas. Modificado de Waller, (1982).....	25
<b>Figura 3.5</b> Acuíferos donde las flechas indican la dirección de flujo de agua <b>A)</b> Acuífero poroso (el agua circula por los intersticios). <b>B)</b> Acuífero fracturado (el agua transita por las grietas ya sean de origen tectónico o por intemperismo). <b>C)</b> Acuífero kárstico (el agua se mueve por las cavernas o canales creados por disolución). Modificado de Werner (1996).....	27
<b>Figura 3.6</b> Tipos de acuíferos según su presión hidrostática (libre, confinado y semiconfinado). Modificado de Brassington (2017). .....	29
<b>Figura 3.7</b> Esquema de un Modelo Hidrogeológico Conceptual. Modificado de IDEAM (2014). .....	30
<b>Figura 4.1</b> Ubicación de la zona de estudio.....	31
<b>Figura 4.2</b> Mapa de microcuencas que comprenden la zona de estudio.....	32
<b>Figura 4.3</b> Batimetría simplificada. Configuración geodinámica y regional del Ecuador. Modificado de Spikings et. al. (2001). .....	33
<b>Figura 4.4</b> Configuración geotectónica del Ecuador. Modificado de Aspden y Litherland (1992) y Reyes (2006).....	35
<b>Figura 4.5</b> Terrenos tectono-estratigráficos.....	37
<b>Figura 4.6</b> Geología local. Modificado de INIGEMM, (2015). .....	41
<b>Figura 4.7</b> Geomorfología del área de estudio en el Cantón Chunchi. Modificado de IEE y MAGAP (2013b). .....	44
<b>Figura 5.1</b> Medición de parámetros físicos en el Río Picay.....	50
<b>Figura 5.2</b> Distribución de puntos de Audio magnetotelúrico. ....	52



<b>Figura 5.3</b> Gráficas de Profundidad versus Resistividad del Audio Magnetotelúrico en DOSBox-0.74. ....	53
<b>Figura 5.4</b> Datos de Profundidad versus Resistividad del punto CHUN-1 con escala de 0 – 50 m en profundidad. ....	54
<b>Figura 5.5</b> Ubicación de datos correspondientes al punto CHUN-1 en WebPlotDigitizer.....	55
<b>Figura 5.6</b> Visualización de datos a exportar del punto CHUN-1.....	55
<b>Figura 5.7</b> Formato para unificación de datos. Calibración del software Stratagem (rojo), latitud (verde), profundidad (azul), resistividad (morado) e indicador de inicio de cada punto (amarillo). ....	56
<b>Figura 5.8</b> Gráfica bidimensional en StratagemResistivityPlotter. ....	57
<b>Figura 5.9</b> Gráfica bidimensional en StratagemResistivityPlotter con interpolación de puntos. ....	57
<b>Figura 5.10</b> Ruta de sondeo Audio Magnetotelúrico.....	58
<b>Figura 5.11</b> Procesamiento de muestras para análisis granulométrico. <b>A)</b> Homogeneización y Cuarteamiento. <b>B)</b> Lavado. <b>C)</b> Secado. <b>D)</b> Tamizado. <b>E)</b> Registro de material retenido en el tamiz.....	61
<b>Figura 6.1</b> Mapa de ubicación de puntos de agua subterránea y superficial. ....	63
<b>Figura 6.2</b> Mapa de ubicación de puntos con muestras recolectadas para análisis granulométrico, junto con puntos del estudio Audio Magnetotelúrico. ....	65
<b>Figura 6.3</b> Curva granulométrica para las muestras de suelo recolectadas en zonas de drenajes superficiales.....	69
<b>Figura 6.4</b> Curva granulométrica de las muestras de suelo recolectadas en la ruta del perfil AMT. ....	69
<b>Figura 6.5</b> Curva granulométrica de las muestras de suelo recolectadas en el cuerpo del deslizamiento.....	70
<b>Figura 6.6</b> Curva granulométrica de las muestras de suelo recolectadas en zonas cercanas a las áreas de interés. ....	70
<b>Figura 6.7</b> Perfil Audio Magnetotelúrico de resistividades. ....	72
<b>Figura 6.8</b> Variación de tonalidades en vegetación en sector de La Armenia. ....	73

<b>Figura 6.9</b> Vertientes en el sector de La Armenia. <b>A)</b> Vertiente con salida de burbujas, <b>B)</b> Vertiente con captación de agua con manguera de 2 pulgadas. ....	74
<b>Figura 6.10</b> Zonas con humedad. <b>A)</b> Humedad en el cuerpo del deslizamiento de La Armenia. <b>B)</b> Humedad en zona cercana a la piscina de oxidación. ....	75
<b>Figura 6.11</b> Mapa de elevaciones en el área de estudio. ....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Media de horas de luz para diferentes latitudes. Modificado de Thornthwaite, (1948). .....	19
<b>Tabla 3.2</b> Acuíferos basados en el tipo de porosidad y tipo de roca. Modificado de Todd y Mays, (2005). .....	26
<b>Tabla 5.1</b> Ubicación de muestras recolectada para análisis de isótopos, UTM WGS84 17S. ....	49
<b>Tabla 5.2</b> Ubicación de puntos del levantamiento de datos de Audio Magnetotelérfico, UTM WGS 84 zona 17S. ....	51
<b>Tabla 5.3</b> Ubicación de muestras recolectadas para análisis granulométrico, UTM WGS84 zona 17S. ....	58
<b>Tabla 5.4</b> Análisis granulométrico para la muestra CH-GR-01. ....	62
<b>Tabla 6.1</b> Parámetros físicos del agua tomados en campo. ....	64
<b>Tabla 6.2</b> Resumen de análisis requeridos para las muestras de agua recolectadas. ....	64
<b>Tabla 6.3</b> Resultados de la granulometría realizada a las 25 muestras recolectadas. ....	66

## RESUMEN

El presente trabajo localiza su área de estudio en las terrazas del cantón Chunchi, ubicado en la Provincia de Chimborazo. Este estudio muestra una descripción de la elaboración de un perfil de resistividades del subsuelo mediante el método geofísico Audio Magnetotelúrico con el objetivo de confirmar la presencia acuíferos existentes en la zona, determinar su ubicación y tamaño aproximado. El perfil de resistividades que atraviesa la ciudad de Chunchi y el Río Picay en sentido S-N permitió identificar dos niveles de acuíferos, siendo L1 el nivel más superficial caracterizado por la presencia de un acuífero semiconfinado con un acuñamiento hacia el norte y L2 el segundo nivel que comprende un conjunto de acuíferos colgados. De acuerdo a su geología la zona de interés se encuentra en los dominios de la Formación Cisarán. A través de resultados de los análisis granulométricos realizados a las 25 muestras de suelo tomadas en los alrededores permitió identificar un dominio de material de grano grueso (gravas, arenas gruesas con poca arena fina y limos) hacia el sur del perfil y una tendencia a disminuir el tamaño de grano (limos y arcillas, arena fina y poca grava) hacia el norte del perfil. El trabajo de campo realizado en conjunto con el perfil de resistividades permitió la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual preliminar donde se identificaron las zonas de recarga, descarga y dirección del flujo de agua.

**PALABRAS CLAVE:** Audio Magnetotelúrico, modelo hidrogeológico conceptual, recarga, descarga, dirección del flujo de agua.

## **ABSTRACT**

The present work locates its study area in the terraces of the Chunchi canton, located in the Province of Chimborazo. This study shows a description of the elaboration of a subsoil resistivity profile using the Audio Magnetotelluric geophysical method in order to confirm the presence of aquifers in the area, determine their location and approximate size. The resistivity profile that crosses the city of Chunchi and the Picay River in S-N direction allowed identifying two levels of aquifers, being L1 the most superficial level characterized by the presence of a semi-confined aquifer which is thinner to the north, and L2 the second level that comprises a group of aquitards. According to its geology, the area of interest is located in the domains of the Cisan Formation. Through the results of the granulometric analysis carried out on the 25 soil samples taken in the surrounding area, it was possible to identify a domain of coarse-grained material (gravels, coarse sands with little fine sand and silts) towards the south of the profile and a tendency to decrease the grain size (silts and clays, fine sand and little gravel) towards the north of the profile. The field work carried out together with the resistivity profile allowed the elaboration of a preliminary conceptual hydrogeological model where recharge, discharge and water flow direction zones were identified.

**KEY WORDS:** Magnetotelluric Audio, conceptual hydrogeological model, recharge, discharge, water flow direction.

# 1. INTRODUCCIÓN

El área de estudio para este trabajo corresponde a los depósitos bajo la terraza de la población de Chunchi. La zona de estudio se encuentra ubicada en el Valle Interandino, en el cantón Chunchi, provincia de Chimborazo. La configuración geológica de esta zona está constituida de rocas volcánicas, volcano-sedimentarias y depósitos piroclásticos, correspondientes a Formaciones geológicas cuyas edades van desde el Mioceno al Cuaternario (Andagoya et. al. 2021). La terraza de Chunchi es un área de varios afloramientos de vertientes y de interés de estudios hidrogeológicos por las amenazas a las cuales se expone la población, y estaría asentada sobre rocas pertenecientes a la Formación Cisarán. La Formación Cisarán está conformada por sedimentos volcánicos gruesos y lavas intermedias estratificadas subhorizontalmente con un espesor de hasta 2200 m (Duque, 2000). La parte inferior la constituyen lavas andesíticas y dacíticas (anteriormente incluidas en la Formación Alausí), y hacia el techo pasan a ser una secuencia gruesa de brechas andesíticas mal sorteadas con intercalaciones de areniscas volcánicas, tobas y lavas (Duque, 2000). El cerro Puñay, también zona de interés hidrológico, está conformado por la unidad Puñay, constituido principalmente por lavas andesíticas con anfíbol, brechas, areniscas, limolitas y capas rojas, cuyo espesor es de 3000 m (Duque, 2000). Geomorfológicamente, en un rango de alturas desde los 1400 a 2200 msnm, el área presenta variaciones de pendientes desde el 25% al 100%, cimas agudas o redondeadas (mayormente con vertientes rectilíneas de agua subterránea) (Coordinación Zonal de Gestión de Riesgos 003, 2021).

En relación al clima, el cantón Chunchi se caracteriza por una estación de abundantes lluvias entre el periodo de enero-abril cuyo aporte forma parte de la recarga de la zona y una estación de precipitaciones menos frecuentes entre el periodo de junio-noviembre (Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos, 2021a). Con respecto a la temperatura, tema de relevancia para la productividad de cultivos agrícolas, la zona posee una media anual de 14.5 °C, la humedad relativa existente anual es de 88% y la evapotranspiración presenta una variación de 550 mm a 950 mm (GAD Municipal Chunchi, 2020). El suelo presenta un alto contenido de humedad y materia orgánica, varios niveles de alteración que van de medio a alto, y presencia de arcillas debido a la interacción del suelo con el

agua, en consecuencia, existe un drenaje interno y la eliminación del agua es lenta (MAGAP-IEE, 2013).

Estudios geofísicos (Tomografías de Resistividad Eléctrica – ERTs) realizados por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE) en conjunto con el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) en el sector de La Armenia y Kullpa han mostrado la existencia de posibles zonas con saturación de agua. De acuerdo con lo observado en las ERTs, la zona de La Armenia presentaría niveles de saturación bajos a medios en zonas rocosas y niveles de saturación altos a muy altos en materiales con poca cohesión, donde estos materiales serían asociados con depósitos coluvio-aluviales con escarpes rocosos los cuales presentarían meteorización y fracturación (Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos, 2021b). Los valores bajos en resistividad, las altas saturaciones de agua junto con el tipo de material observado en la zona contribuyen a determinar la existencia de acuíferos (colgados y confinados).

Las condiciones climáticas, temperatura, suelo y geomorfología del área de estudio mencionadas habrían sido los factores condicionantes y desencadenantes del deslizamiento (flujo de lodo) producido el 12 de febrero del 2021 en el sector de La Armenia en el cantón Chunchi. Este evento de gran magnitud habría provocado el represamiento del Río Picay (afluente del Río Chanchán), causando daños a la infraestructura cercana (Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos, 2021a). Las amenazas, exposición y afectación evidenciadas son el motivo por el que dicho cantón fue declarado en emergencia y, daría paso a la elaboración de este proyecto de investigación en el área hidrogeológica de la zona.

El perfil Audio Magnetotelérfico es la herramienta fundamental de este proyecto para confirmar la presencia de acuíferos en la zona, además de determinar su geometría y espesor. Así también, la combinación de este con el análisis granulométrico realizado contribuye en la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Elaborar un modelo conceptual hidrogeológico preliminar en la terraza de Chunchi, Provincia de Chimborazo a través de la caracterización morfológica e hidrogeológica de la terraza y deslizamiento de Chunchi.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Recopilar la información Cartográfica, Geofísica e Hidrogeológica preexistente de la Terraza de Chunchi;
- Realizar un inventario georreferenciado de puntos de agua de la terraza de Chunchi diferenciando cuerpos de agua superficiales (drenajes principales y secundarios), subterráneos (vertientes y pozos de monitoreo, bombeo);
- Interpretar el contexto Hidrogeológico de la terraza de Chunchi definiendo zonas de recarga, descarga, dirección de flujo y principales unidades hidrogeológicas;
- Determinar la calidad de agua, mediante al análisis de los parámetros físicos, fisicoquímicos del agua subterránea de los puntos de muestreo (vertientes) distribuidos en la Terraza de Chunchi (se considerarán puntos que tengan facilidad de acceso).



### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. Conceptos Básicos, Elementos y Estudios para el**

#### **Desarrollo Cartográfico, Geológico e Hidrogeológico Local**

##### **3.1.1. Hidrología**

El agua es el constituyente principal de los seres vivos, y la hidrología es la ciencia encargada de su estudio. Dicha ciencia se centra en su ocurrencia, circulación y distribución tanto superficial como subterránea. La hidrología analiza la relación del agua con el medio ambiente y los seres vivos tomando en cuenta las propiedades físicas y químicas del agua (Chow et. al. 1994). Actividades antrópicas como el incremento de la frontera agrícola, pastoreo descontrolado del ganado y las diferentes actividades económicas pueden modificar la hidrología de los páramos hasta las zonas de descarga donde la calidad de agua puede estar influenciada como consecuencia de un buen o mal manejo de las aguas residuales por la población del área circundante (Buytaert et. al. 2022).

La hidrología abarca todas las fases en las que se puede encontrar el agua en la Tierra. En la práctica la hidrología se puede aplicar para el tratamiento y disposición de aguas residuales, abastecimiento de agua, control de la salinidad, inundaciones, erosión y control de sedimentos, entre otras (Chow et. al. 1994).

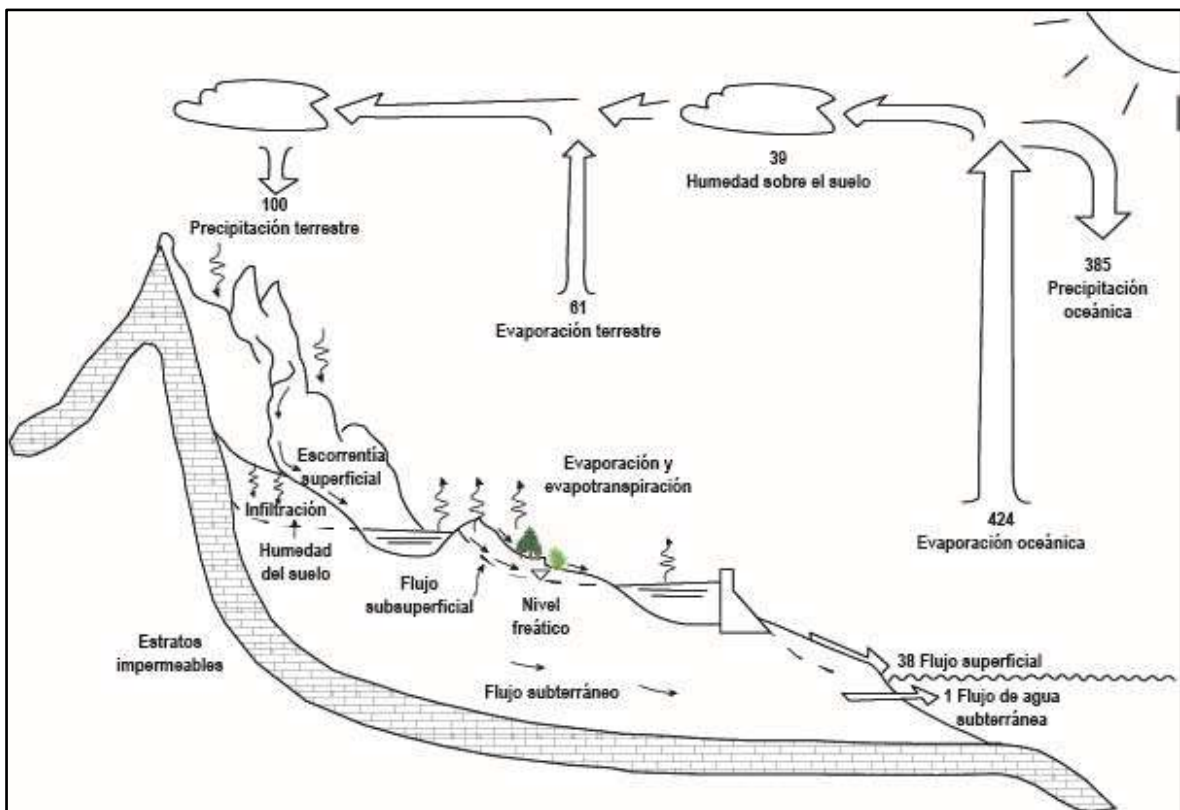
##### **3.1.2. El Ciclo Hidrológico**

El agua es uno de los recursos naturales más relevantes para la vida, cubriendo más del 70% del planeta Tierra. Su distribución en superficie es de 97% la cual consiste en agua salada y se encuentra en mares y océanos, por lo que apenas el 3% restante es agua dulce (capas de hielo y glaciares, agua superficial, agua subterránea, entre otros).

El ciclo hidrológico hace referencia a la circulación de partículas de agua en cualquiera de sus estados físicos (sólido, líquido y gaseoso) durante el cual puede sufrir transformaciones físicas; es un ciclo cerrado por lo que no tiene un inicio ni un fin (Gámez, 2009). La energía emitida por el sol calienta el suelo, aguas superficiales (ríos, lagos y océanos) y el aire, de manera que provoca la

evaporación del agua y también el movimiento de las masas de aire. El vapor que se transporta por el aire puede condensarse dando lugar a la Formación de nubes, además, dicho vapor puede regresar a la superficie terrestre por precipitaciones. Cuando las precipitaciones llegan al suelo pueden infiltrarse o fluir en superficie hasta llegar a algún cuerpo de agua. El agua infiltrada humedece el suelo convirtiéndose en una fuente de agua para la vegetación, alimenta acuíferos y contribuye en la creación de flujos subterráneos (Collischonn y Tassi, 2008) (Figura 3.1).

Durante las fases del ciclo hidrológico el agua puede pasar por cambios en su calidad, como el agua de mar que se llega a transformar en agua dulce mediante evaporación. En el caso del agua dulce, aquella que se ha infiltrado, disuelve las sales que se encuentran en el suelo además de otros elementos llevándolas a través de los ríos hacia el océano (Collischonn y Tassi, 2008).



**Figura 3.1** El ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global anual en unidades relativas a un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre. Fuente: Chow et. al. (1994).

### **3.1.3. Precipitación**

La precipitación es el origen tanto de corrientes superficiales como corrientes profundas y ocurre producto de la condensación del vapor de agua (Gámez, 2009). Este fenómeno denominado precipitación engloba a todas las aguas meteóricas que caen en la superficie terrestre ya sea en forma líquida (llovizna, lluvia o chubascos) o sólida (granizo, nieve) (Segeber y Villodas, 2006). La precipitación es un fenómeno intermitente que varía en el espacio y en el tiempo. Se mide en milímetros (mm) mediante la altura que alcanzaría en un caso ideal como en una superficie horizontal sin pérdidas por infiltración o evaporación.

### **3.1.4. Infiltración**

Se refiere a la cantidad de agua que atraviesa desde la superficie terrestre hacia el subsuelo por medio de poros; esta puede formar parte de la recarga de un acuífero o quedar atrapada en la zona vadosa del subsuelo siendo fundamental para el crecimiento de la vegetación. Ayuda a mantener el caudal de los ríos en temporadas de sequía y, es de relevancia para disminuir la escorrentía superficial que por consiguiente reduce las inundaciones y la erosión (Collischonn y Tassi, 2008).

La infiltración es un proceso que se produce gracias a la acción de la gravedad (percolación) y capilaridad. La cantidad de agua que se infiltra dependerá de la relación entre la intensidad de las lluvias y la capacidad de infiltración del suelo (Custodio y Llamas, 1983). Dicho proceso tiene la influencia de factores como el tiempo, la intensidad de lluvias, la composición química del agua y suelo, la conductividad hidráulica del subsuelo, la temperatura, la topografía, e incluso actividades biológicas (Assouline, 2013).

### **3.1.5. Evapotranspiración**

Se define a la evapotranspiración como el proceso por el cual cierta cantidad de agua precipitada o procedente de glaciares regresa al ambiente mediante la evaporación del agua (paso de agua líquida a vapor de agua) en el suelo o de cuerpos de agua (ríos, lagos, charcos) y la transpiración de la vegetación. Este proceso requiere de un suministro de energía que es proporcionada por el sol a través de la radiación (Collischonn y Tassi, 2008). Factores como la disposición de

agua para riego, textura y estructura del suelo, la salinidad, la materia orgánica, el tipo de vegetación, la temperatura, y la radiación pueden afectar a la evapotranspiración (Gámez, 2009).

Thornthwaite (1948), introdujo el término “Evapotranspiración Potencial”, la cual se obtendría si no existiera restricción en la evapotranspiración, es decir, es la cantidad de agua que se eliminaría si no hubiera una deficiencia de agua en el suelo para el uso de las plantas (Fetter, 2000). La evapotranspiración potencial mensual “sin corregir” se obtiene con la ecuación ( 1 ).

$$ETP_m = 16 \left( 10 \frac{T}{I} \right)^a \quad (1)$$

Donde:

$ETP_m$  = Evapotranspiración potencial mensual, considerando que un mes tiene 30 días y la exposición de sol es de 12 horas (teóricas). Se mide en mm/mes.

$T$  = Temperatura media mensual (°C).

$I$  = Índice de calor anual. Es la sumatoria de los índices de calor mensual ( $i$ ), que se calcula mediante la ecuación ( 4 ) a partir de la temperatura media mensual ( $T$ ).

$a$  = Ecuación en función del índice de calor anual ( $I$ ). Se obtiene mediante la ecuación ( 2 ).

$$a = (675 \times 10^{-9})I^3 - (771 \times 10^{-7})I^2 + (1972 \times 10^{-5})I + 0.49239 \quad (2)$$

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad (3)$$

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (4)$$

Posteriormente, se aplica la corrección para el número de días reales de cada mes y el número máximo de horas de sol según la latitud del lugar donde se realiza el análisis considerando que los valores iniciales son ideales. La corrección se realiza mediante la ecuación ( 5 ).

$$ETP = ETP_{m. \text{ sin corr.}} \frac{N}{12} \frac{d}{30} \quad (5)$$

Donde:

$N$  = Número máximo de horas de sol, dependiendo el mes y latitud. Su valor se obtiene de la Tabla 3.1.

$d$  = Número de días de cada mes.

**Tabla 3.1** Media de horas de luz para diferentes latitudes. Modificado de Thornthwaite, (1948).

N. Lat.	En.	Fe.	Mar.	Ab.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Se.	Oc.	No.	Di.
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
10	1	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
20	0.95	0.9	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1	0.93	0.94
25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
26	0.92	0.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
27	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	0.99	0.9	0.9
28	0.91	0.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	0.98	0.9	0.9
29	0.91	0.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.9	0.89
30	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.2	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
31	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.2	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
32	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	0.98	0.88	0.87
33	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86
34	0.88	0.85	1.03	1.09	1.2	1.2	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
36	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37	0.86	0.84	1.03	1.1	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83
38	0.85	0.84	1.03	1.1	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
41	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.8
42	0.82	0.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	0.95	0.82	0.79
43	0.81	0.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.2	1.04	0.95	0.81	0.77
44	0.81	0.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.3	1.2	1.04	0.95	0.8	0.76
45	0.8	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
46	0.79	0.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	0.94	0.79	0.74
47	0.77	0.8	1.02	1.14	1.3	1.32	1.33	1.22	1.04	0.93	0.78	0.73
48	0.76	0.8	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	0.93	0.77	0.72
49	0.75	0.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	0.93	0.76	0.71
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.7
S. Lat.	En.	Fe.	Mar.	Ab.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Se.	Oc.	No.	Di.
5	1.06	0.95	1.04	1	1.02	0.99	1.02	1.03	1	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1	1.01	1	1.06	1.05	1.1

15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1	1	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1	1.1	1.11	1.18
30	1.2	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.9	0.96	1	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1	1.15	1.2	1.29
42	1.28	1.07	1.07	0.92	0.85	0.76	0.82	0.92	1	1.16	1.22	1.31
44	1.3	1.08	1.07	0.92	0.83	0.74	0.81	0.91	0.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.1	1.07	0.91	0.82	0.72	0.79	0.9	0.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	0.9	0.8	0.7	0.76	0.89	0.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

### 3.1.6. Escorrentía Superficial

Se denomina escorrentía superficial al flujo de agua proveniente de precipitaciones, derretimiento de nieve y glaciares que no se infiltra. El agua fluye por la superficie del terreno por acción de la gravedad hasta llegar a corrientes superficiales, intermitentes o continuas de una cuenca (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2018). Se caracteriza por ser el agua que no queda atrapada en depresiones producidas por la geomorfología de la zona y que escapa de la evapotranspiración. Ocurre especialmente cuando la capacidad de infiltración es menor que la intensidad de las lluvias. Depende de factores como el clima, la pendiente del terreno, la vegetación y la Geología de la zona (Ordoñez, 2011).

### 3.1.7. Escorrentía Subterránea

Es el agua que se infiltra y posteriormente, llega a niveles más profundos en el suelo por percolación. La recarga del manto subterráneo proviene de la precipitación y el deshielo de glaciares que se infiltran alcanzando el nivel freático. Dicho escurrimiento puede descargar en corrientes fluviales (ríos efluentes) cuando los ríos se intersecan con el nivel freático, mediante manantiales o sumideros contribuyendo a lagos o arroyos (Linsley, 1977).

Depende de factores como la intensidad de la precipitación, la humedad en el suelo y, características geológicas (Freeze y Cherry, 1979). El agua se acumula en poros, grietas y fisuras de la roca; generalmente, esta se almacena dando paso a la Formación de acuíferos.

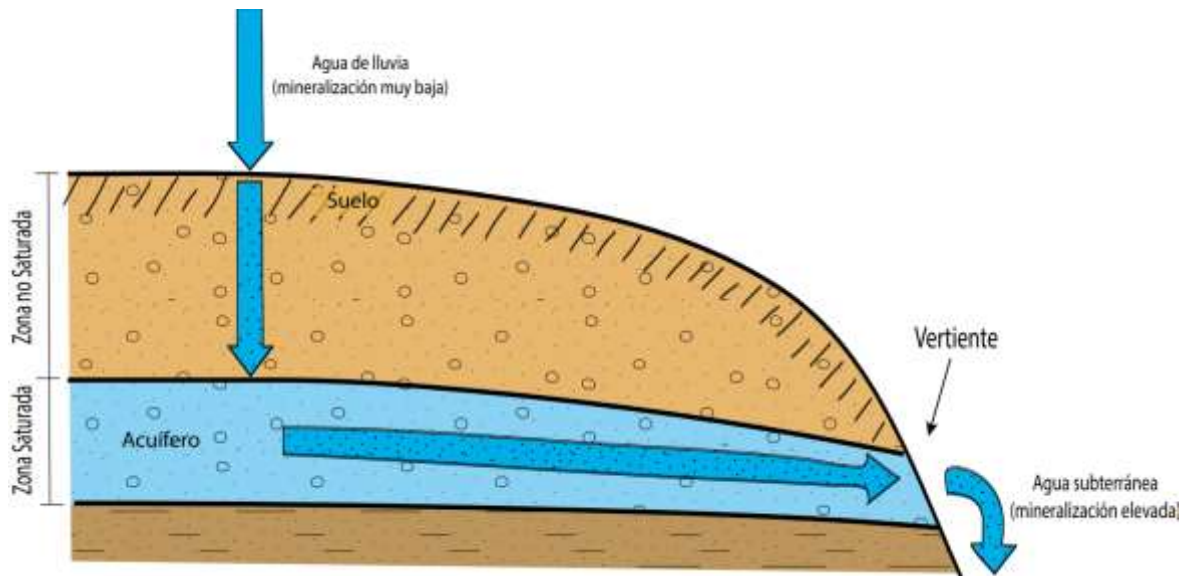
### **3.1.8. Hidrogeología**

Las aguas subterráneas son consideradas como una fuente principal de agua para el ser humano y la ciencia que se centra en su estudio se denomina Hidrogeología. Comprende las interrelaciones entre la Geología del terreno y sus procesos con el agua subterránea (Fetter, 2000). Este término define al conjunto de fenómenos por los cuales atraviesa el agua subterránea con especial énfasis en su composición, transporte, erosión y, su relación con la Geología de la zona (Davis y De Wiest, 1966).

Se enfoca en el almacenamiento, circulación y difusión del agua en la zona saturada, incluyendo propiedades fisicoquímicas, su relación con el medio tanto físico como biológico (Custodio y Llamas, 1983). El estudio del agua subterránea incluye el análisis para su aprovechamiento, regulación y evacuación.

### **3.1.9. Hidrogeoquímica**

Se centra en el estudio químico de las aguas subterráneas, cuyo objetivo es proporcionar mayor conocimiento sobre su origen. El análisis sobre el movimiento del agua en el subsuelo proporciona información referente a la mineralización del agua donde las concentraciones de los minerales disueltos se obtienen mediante un análisis químico (Werner, 1996) (Figura 3.2). El agua es considerada como un fuerte disolvente de la naturaleza y, la cantidad de sólidos disueltos depende de factores como la temperatura, solubilidad de los minerales, tiempo de contacto agua-roca, concentración de las sustancias disueltas, pH y potencial redox (Werner, 1996).



**Figura 3.2** Mineralización del agua subterránea. Modificado de Werner (1996).

### 3.1.10. Calidad del Agua Subterránea

#### 3.1.10.1. Unidades

Los resultados obtenidos de análisis de aguas en laboratorios (p.e. elementos mayores, elementos menores y trazas) se presentan en miligramos por litro (mg/L). Estas concentraciones también se expresan en partes por millón (ppm=1 mg/kg) y las partes por billón (ppb=1 µg/kg). La ecuación (6) es usada para transformar miligramos por litro (mg/L) a una concentración molar (mmol/L). Los miliequivalentes por litro (meq/L) son la concentración molar multiplicada por la carga de iones (7) y se usan para comprobar el equilibrio de carga en análisis químicos, por ejemplo: 1 mmol Ca<sup>2+</sup>/L = 2 meq Ca<sup>2+</sup>/L (Appelo y Postma, 2005).

$$\frac{mmol}{L} = molalidad \times densidad \times \left( \frac{peso_{solución} - peso_{soluto}}{peso_{solución}} \right) \times 1000 \quad (6)$$

$$\frac{meq}{L} = \frac{mmol}{L} \times carga \text{ del ión} \quad (7)$$

#### 3.1.10.2. Composición

Una molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno, siendo su fórmula química H<sub>2</sub>O, unidos por un enlace covalente (Davis y De Wiest, 1966).

La composición del agua subterránea está influenciada por los continuos procesos de interacción entre el agua de precipitación que se infiltra y la litología del subsuelo

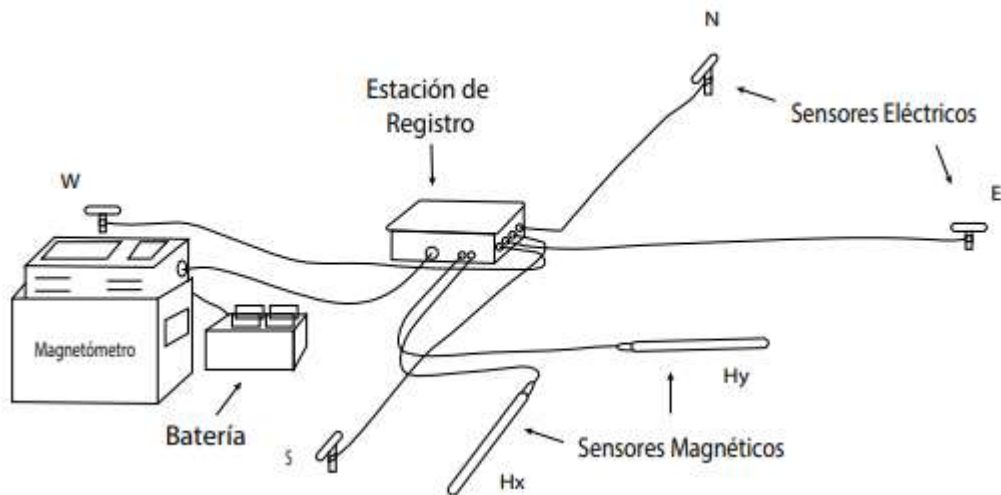


(Vélez et. al. 2011). El ser humano también condiciona la composición del agua subterránea tanto a través de aguas residuales domésticas como de actividades agropecuarias dado que los pesticidas y fertilizantes usados en cultivos penetran en el suelo hasta alcanzar el nivel de agua subterránea.

### **3.2. Geofísica, Uso del Método Audio Magnetotelúrico en la Hidrogeología**

El método geofísico magnetotelúrico es una técnica que hace posible la caracterización de estructuras en el subsuelo a profundidades de varios kilómetros con base en la distribución de la resistividad eléctrica (Piña, 2014). El propósito del sondeo magnetotelúrico (MT) es la interpretación de medidas tomadas en superficie de campos eléctricos y campos magnéticos los cuales se generan por corrientes terrestres naturales y que circulan en el subsuelo (Arzate et. al. 2011). El funcionamiento de este método se basa en la variación de las propiedades eléctricas que presentan las rocas con respecto a la resistividad o su inverso que es la conductividad. Medir dichos campos permite la estimación de la resistividad eléctrica en función de la frecuencia y más adelante en función de la profundidad mediante algoritmos de inversión de datos (Arzate et al. 2011).

El equipo utilizado en este método consta de la estación de registro, sensores eléctricos y magnéticos, un ordenador que controla la adquisición de datos y, una batería que alimenta todo el sistema (Figura 3.3). Los sensores magnéticos son bobinas de inducción cilíndricas. Los sensores eléctricos son electrodos impolarizables que se disponen en forma de cruz (se orientan en dos direcciones perpendiculares N-S y E-O) para registrar en superficie las dos componentes horizontales del campo eléctrico. Por último, los sensores eléctricos se conectan a una estación de registro (Figura 3.3).

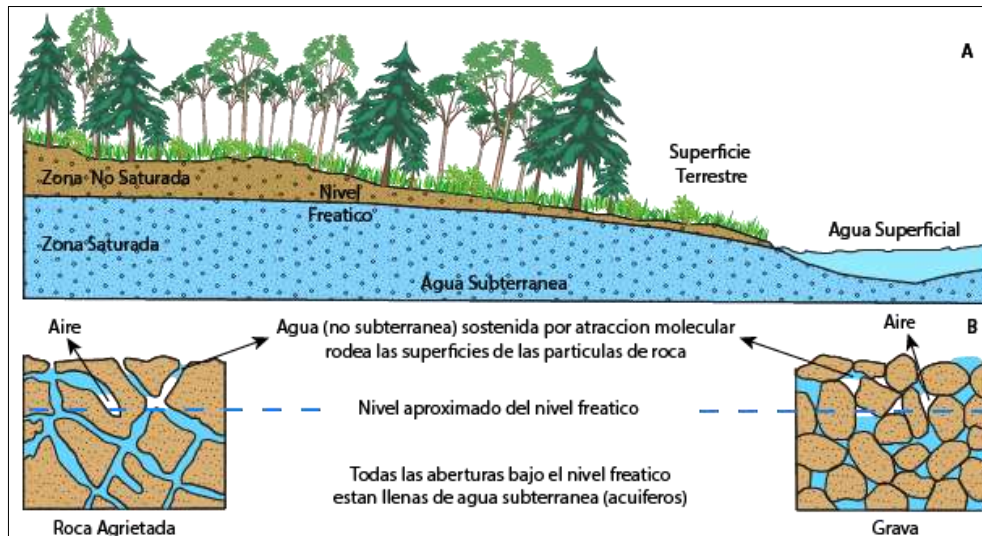


**Figura 3.3** Esquema de instalación del equipo para la toma de datos magnetotelúricos.

En la hidrogeología, la aplicación de sondeos Magnetotelúricos (MT) facilitan la determinación de unidades litológicas y zonas de contacto entre diferentes materiales (Li et. al. 2021). Entre los beneficios que proporciona este método geofísico está la detección del nivel freático y la profundidad a la que este se encuentra. Contribuye en la identificación de zonas con fracturas, fallas y discontinuidades (Chouteau et. al. 1994); por otro lado permite definir la geometría de acuíferos determinando espesor y profundidad (Xu et. al. 2020). También facilita delimitar zonas idóneas para la explotación de acuíferos, controlar la calidad del agua, identificar zonas contaminadas y el mapeo de intrusiones salinas (Pedrera et. al. 2016).

### 3.3. Acuíferos y su Clasificación

Se denomina acuífero a la unidad o Formación geológica dentro la cual es posible almacenar y transmitir cantidades considerables de agua para su captación. Los acuíferos pueden estar constituidos de una o varias capas (arcilla, limo, arena, grava, roca fracturada) y se ubican en la zona saturada del suelo bajo el nivel freático (Figura 3.4 A). Los acuíferos se caracterizan por almacenar agua entre los poros que forman los granos y entre las fracturas o grietas de una roca (Figura 3.4 B). Los altos valores de conductividad hidráulica no solo permiten su recarga continua sino que ayudan a conducir el agua hacia puntos de extracción (pozos) o vertientes y, también son fuentes de intercambio geoquímico (Werner, 1996).



**Figura 3.4 A)** Esquema de un acuífero. **B)** Ocurrencia del agua subterránea en las rocas. Modificado de Waller, (1982).

Los acuíferos tienen la capacidad de transmitir cantidades sustanciales de agua, pero para aquellas Formaciones en las que se transmiten cantidades muy pequeñas debido a su baja conductividad hidráulica se las denomina acuitardos. De modo que este tipo de acuíferos no pueden ser usados como puntos de abastecimiento. Un acuícludo hace referencia a las Formaciones que, a pesar de almacenar agua no la transmiten, mientras que, aquellas Formaciones geológicas que no almacenan ni transmiten agua reciben el nombre de acuífugos.

### 3.3.1. Tipos de Acuíferos

#### 3.3.1.1. Según su Porosidad

Estos acuíferos se caracterizan porque el agua satura los poros. Dicha porosidad puede ser consecuencia del espacio entre los granos o intergranular (porosidad primaria) o debido a fracturas (porosidad secundaria). En función de la litología y la porosidad se tiene una amplia clasificación de acuíferos (

Tabla 3.2).

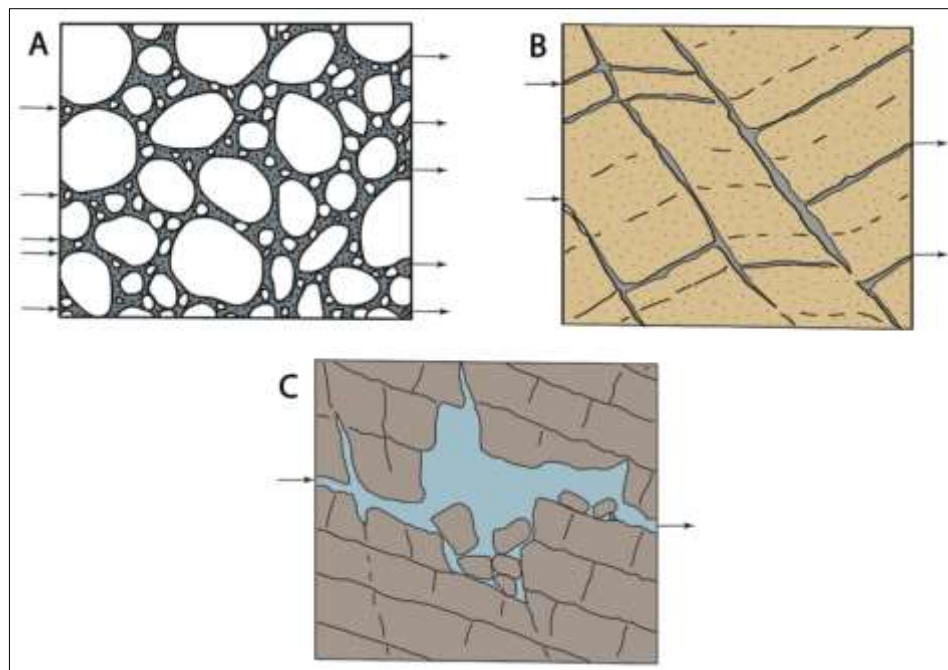
**Tabla 3.2** Acuíferos basados en el tipo de porosidad y tipo de roca. Modificado de Todd y Mays, (2005).

Tipo de Porosidad	Tipo de Roca					
	Sedimentaria	Sedimentos	Carbonatos	Ígnea y Metamórfica	Volcánica	Volcano-Sedimentaria
Intergranular		Arena con grava Arena arcillosa Arcilla arenosa		Granito-Gneis meteorizado	Basalto meteorizado o	Bombas Bloques Lapilli Ceniza
Intergranular y Fractura	Brecha Conglomerado Arenisca Lutita		Caliza biogénica Caliza oolítica Arena calcárea		Toba Brecha Pómez	
Fractura			Caliza Dolomita Caliza dolomítica	Granito Gneis Gabro Cuarcita Diorita Esquisto Esquisto micáceo	Basalto Andesita Riolita	

Aquellos acuíferos formados por poros se componen principalmente de arenas, gravas y conglomerados (Figura 3.5 A), en los acuíferos conformados por grietas/fracturas predominan las rocas consolidadas como las calizas no carstificadas, areniscas, basaltos, granitos, entre otras rocas intrusivas, extrusivas y metamórficas (Figura 3.5 B). Finalmente, entre las rocas carstificadas que forman parte de los acuíferos kársticos están las dolomitas, calizas, yeso (Figura 3.5 C).

Cuando los poros o fracturas (fisuras, fallas, diaclasas) están interconectados, facilitan la capacidad de transmitir el agua; esta capacidad varía según el material rocoso por el cual transita el agua.

Los principales acuíferos que se componen de sedimentos o rocas sedimentarias, comprenden el 95% de los acuíferos debido a que presentan excelentes condiciones de recarga en relación a su porcentaje de porosidad, permeabilidad y que su nivel freático/piezométrico está cerca de la superficie terrestre (Custodio y Llamas, 1983). Factores como el grado de alteración, edad, propiedades físicas y químicas de las rocas volcánicas determinan si un acuífero se considera apto para su explotación o no. Por último, aquellos acuíferos formados por rocas ígneas o metamórficas dependen de la presencia de fracturas, fallas, diaclasas y alteración de la roca para permitir el almacenamiento de agua (Custodio y Llamas, 1983).



**Figura 3.5** Acuíferos donde las flechas indican la dirección de flujo de agua **A)** Acuífero poroso (el agua circula por los intersticios). **B)** Acuífero fracturado (el agua transita por las grietas ya sean de origen tectónico o por intemperismo). **C)** Acuífero kárstico (el agua se mueve por las cavernas o canales creados por disolución). Modificado de Werner (1996).

### 3.3.1.2. Según la Presión Hidrostática

#### 3.3.1.2.1. Acuífero Libre

Un acuífero libre se caracteriza por su relativa cercanía a la superficie, razón por la cual se encuentra bajo la influencia de la presión atmosférica, siendo un ejemplo

de estos, las terrazas y las llanuras aluviales. Su estructura se basa en una capa impermeable que actúa de base, una capa permeable (saturada de agua) bajo el nivel freático o piezométrico y, una capa superior que forma parte de la zona vadosa (poros llenos de agua y aire) (Figura 3.6). El nivel freático varía tanto en forma como en pendiente en función de las áreas de recarga y descarga, la permeabilidad y el bombeo de pozos (Todd y Mays, 2005).

Dentro de esta categoría se encuentran los acuíferos colgados, los cuales se caracterizan por ser cuerpos de agua más pequeños separados del cuerpo de agua principal y con una base impermeable, siendo un ejemplo de estos los lentes de arcilla. La descarga de un acuífero colgado se puede producir a una altura considerable al nivel de base de los ríos, a este tipo de descargas se denomina manantiales.

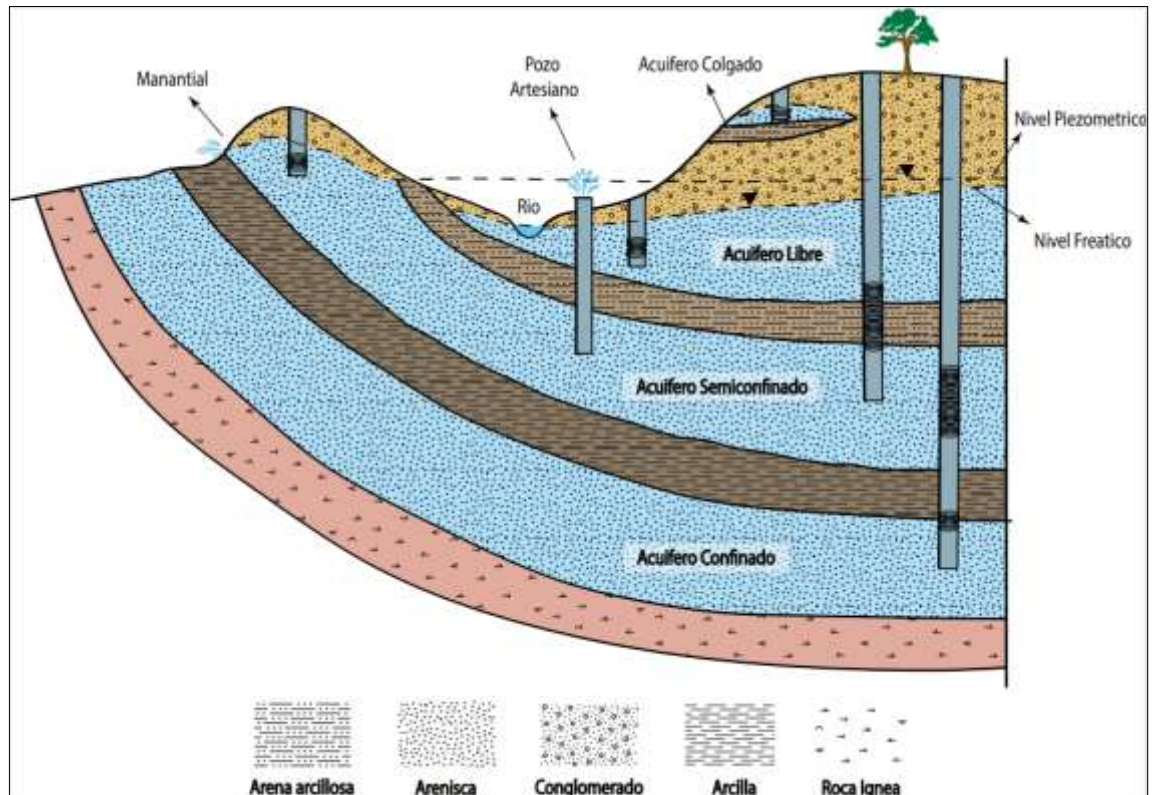
#### **3.3.1.2.2. Acuífero Confinado**

Los cuerpos de agua en el estrato permeable para este tipo de acuíferos están encerrados por estratos impermeables o de muy baja permeabilidad (tanto en el techo como en la base). El nivel superior del agua en los pozos se denomina nivel piezométrico (Figura 3.6). Este nivel hace referencia a una superficie imaginaria la cual coincide con el nivel hidrostático en el acuífero (Vélez et. al. 2011). Están sometidos a una presión mayor que la atmosférica debido a la carga que ejercen los materiales sobre el agua entre los poros (tensión intersticial) y sobre el esqueleto del acuífero (tensión intergranular).

En ciertos casos, cuando se perforan este tipo de acuíferos, el agua puede fluir de manera natural hacia la superficie a causa de la excesiva presión a la que está sometido el cuerpo de agua creando así los llamados pozos artesianos. El nivel piezométrico en estos pozos coincide con la superficie terrestre.

#### **3.3.1.2.3. Acuífero Semiconfinado**

Se consideran un caso especial de los acuíferos confinados, cuya diferencia radica en que se encuentran encerrados por estratos semipermeables, limitando de esa forma la filtración hacia a un acuífero principal (Custodio y Llamas, 1983) (Figura 3.6). Estos acuíferos son característicos de valles aluviales, planicies o cuencas de lagos antiguos (Todd y Mays, 2005).



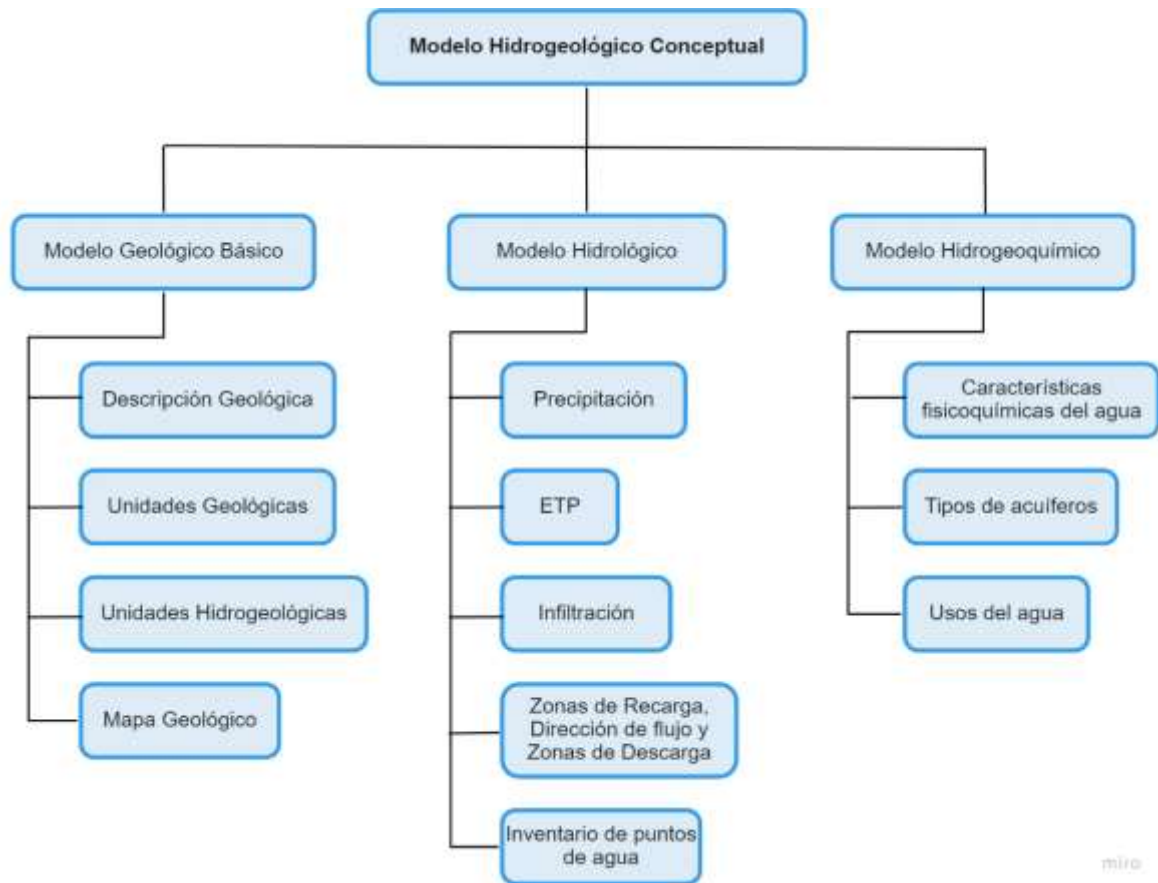
**Figura 3.6** Tipos de acuíferos según su presión hidrostática (libre, confinado y semiconfinado). Modificado de Brassington (2017).

### 3.4. Modelo Hidrogeológico Conceptual

Un modelo conceptual consiste en la representación estática y dinámica de un sistema hidrogeológico, en dos o tres dimensiones. Su elaboración permite reconocer características litológicas y geométricas en los acuíferos, secuencias estratigráficas, zonas de recarga y descarga, la dirección del flujo de agua, el gradiente hidráulico, la transmisividad, características hidroquímicas del agua y el balance hídrico (Vélez et. al. 2011). En términos generales, la construcción de un modelo hidrogeológico brinda una mayor comprensión del comportamiento del flujo de agua y su transporte en los sistemas hidrogeológicos.

La elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual se realiza con base en el análisis e interpretación de la información geológica (recopilada y observada en campo), hidroquímica, hidráulica e hidrológica (IDEAM, 2014) (Figura 3.7). El modelo se convierte en una herramienta que contribuye en la creación, validación, manejo y adaptación de medias con el fin de prevenir, anticipar y explicar posibles desastres naturales como los deslizamientos. El modelo hidrogeológico conceptual

es un sustento técnico que sirve como apoyo en la elaboración de un balance hídrico preliminar del sistema. Es así como el objetivo final de este modelo conceptual es el análisis de recargas y descargas durante un periodo de tiempo para concebir una apreciación cuantitativa del recurso hídrico y posibles modificaciones por intervenciones antrópicas.



**Figura 3.7** Esquema de un Modelo Hidrogeológico Conceptual. Modificado de IDEAM (2014).

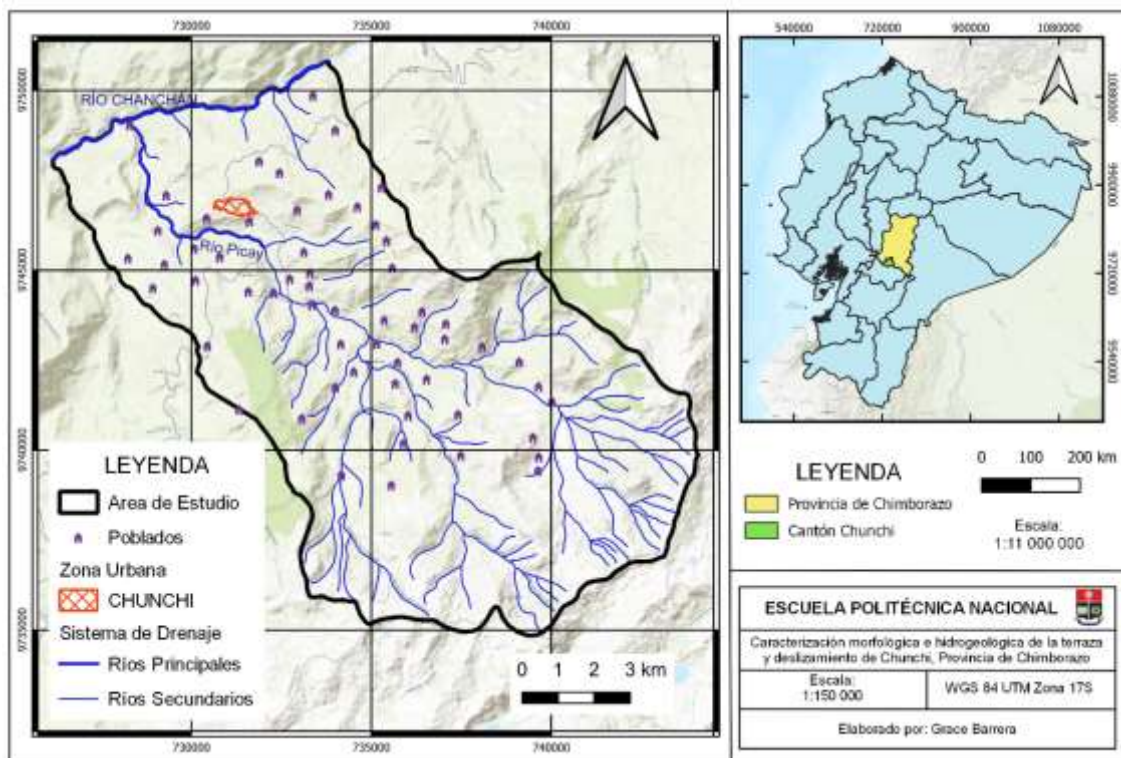


## 4. ÁREA DE ESTUDIO

### 4.1. Caracterización del Área de Estudio

#### 4.1.1. Localización del Área de Estudio

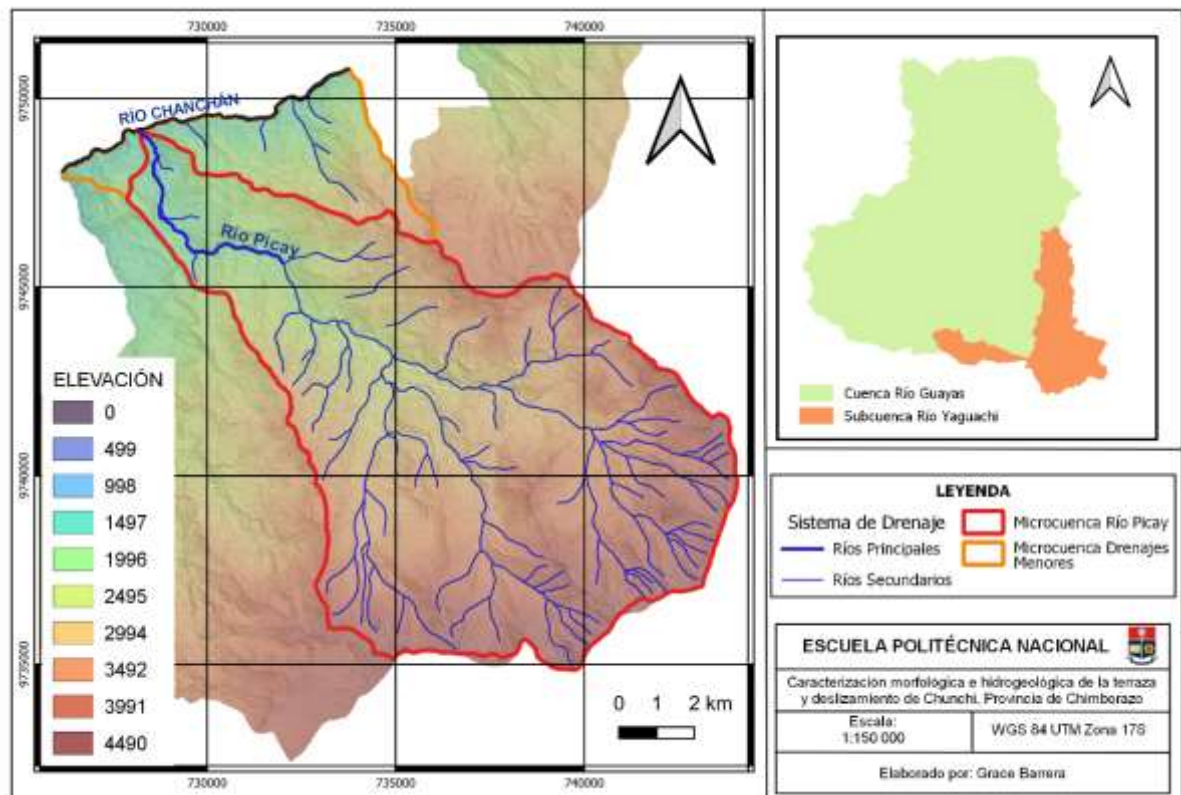
La zona de estudio está localizada sobre el Valle Interandino, al sur de la Provincia de Chimborazo en el Cantón Chunchi. Dicho cantón también es conocido como el Sillón Andino del Ecuador; está limitado al norte, este y oeste con el Cantón Alausí y, al sur con la Provincia de Cañar. Específicamente se encuentra en el UTM 729477E y 9746840N. Su extensión es de 274.9 km<sup>2</sup>, presenta un rango altitudinal el cual oscila entre 1 600 y 4 300 m.s.n.m. Según el censo de población y vivienda del 2010 por el INEC, el cantón alberga 12 686 habitantes. En la Figura 4.1 se observa el área de estudio, la cual abarca las Parroquias de Chunchi y Capzol.



*Figura 4.1 Ubicación de la zona de estudio.*

La terraza de Chunchi se encuentra dentro de la cuenca del Río Guayas en la subcuenca del Río Yaguachi, comprende dos microcuencas que son la del Río Picay y de Drenajes Menores siendo estos los afluentes que alimentan al Río

Chanchán (marca el límite entre los Cantones Alausí y Chunchi) como se muestra en la Figura 4.2.

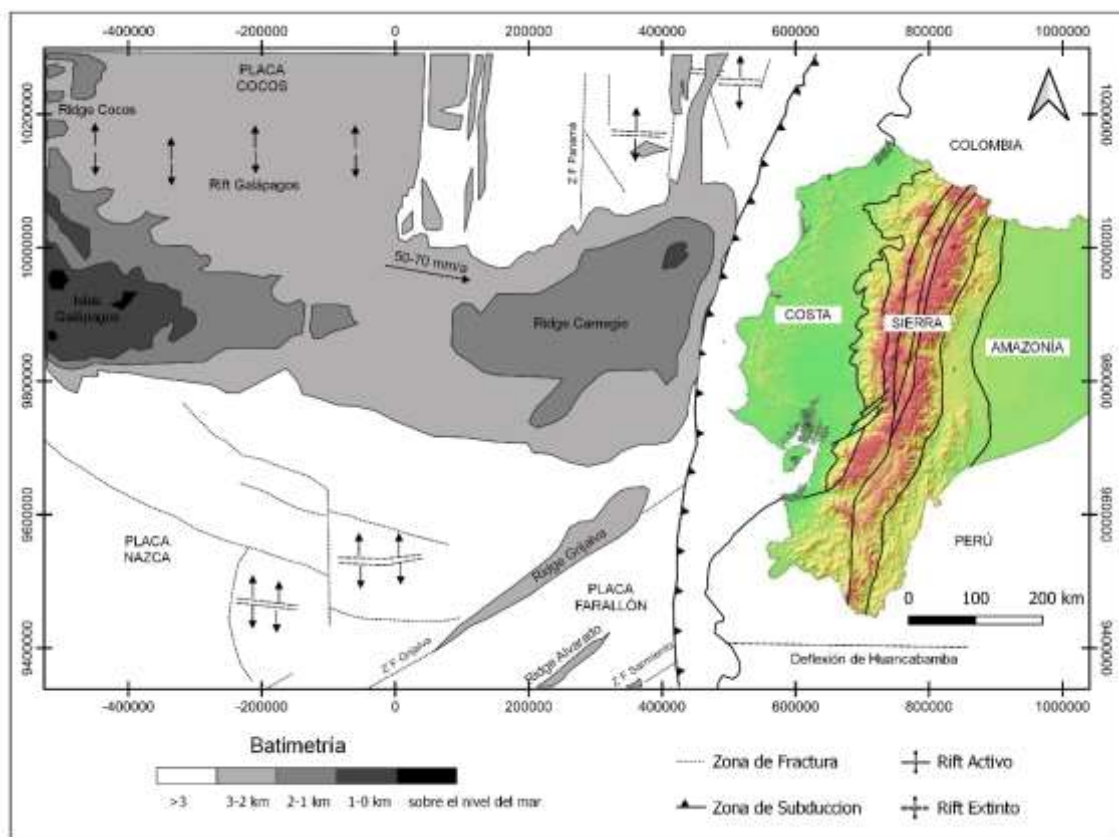


**Figura 4.2** Mapa de microcuencas que comprenden la zona de estudio.

#### 4.1.2. Geología Regional

El Ecuador continental se sitúa al noroeste de la placa Sudamericana, la parte occidental está constituida por la unión de varios terrenos oceánicos los cuales forman dos mesetas de edad temprana y tardía (90 Ma y 120 Ma, respectivamente) (Jaillard et. al. 2009); se divide en tres provincias fisiográficas (Costa, Sierra y Amazonía) (Figura 4.3). Como resultado de la subducción de la Placa Nazca (oceánica) bajo la Placa Sudamericana (continental), a una velocidad aproximada de 5.8 cm/año (Gailler et. al. 2007), se tiene el cinturón montañoso de los Andes. Como consecuencia a la convergencia de placas se generó un arco volcánico activo durante el Cenozoico (Kennerley, 1980). La subducción de la placa oceánica Nazca también incluye el Ridge de Carnegie, que subduce bajo el centro y norte de Ecuador, este tiene 200 km de ancho y una altura de 1 000 m desde el suelo oceánico (Lavenu et. al. 1995).

Existen fallas de carácter regional, la Mega cizalla Dolores-Guayaquil con tendencia NE-SW es considerada como la sutura entre los terrenos oceánicos y el margen continental, atraviesa el Ecuador hasta el Océano Pacífico (Lavenu et. al. 1995). Las cordilleras Occidental y Costera son conformadas por unidades oceánicas, se separan del margen continental por el Valle Interandino que por lo general está relleno de depósitos cuya edad va desde el Cenozoico a la actualidad (Jaillard et. al. 2009). Su basamento consiste en un *slab* alóctono de edad Cretácica el cual se acrecionó al continente por la falla Calacalí-Pallatanga-Palenque (Aspden y Litherland, 1992). Además, la planicie costera presenta un anomalía de Bouguer positiva (Feininger y Seguin, 1983).



**Figura 4.3** Batimetría simplificada. Configuración geodinámica y regional del Ecuador. Modificado de Spikings et. al. (2001).

## Amazonía

Formando parte de la cuenca del Amazonas (cuenca antepaís del Cretácico tardío-Holoceno), al este de la cordillera Real, se encuentra la región Oriente la cual se caracteriza por un escaso relieve cuya altitud varía entre 500 – 200 m (Feininger y Seguin, 1983; Vallejo et. al. 2009). La zona subandina está ubicada en el margen

este de la cordillera Real, donde se encuentra el levantamiento Napo al norte y la cordillera del Cutucú hacia el sur (Kennerley, 1980) (Figura 4.4). En esta zona se puede encontrar Formaciones volcánicas y sedimentarias (Tibaldi y Ferrari, 1992).

La cuenca Oriente está conformada por Formaciones del Cretácico las cuales funcionan como reservorios de hidrocarburos, sobre estos se encuentran depósitos Neógenos hasta la actualidad que son derivados de los Andes (Pratt et. al. 2005).

### **Sierra**

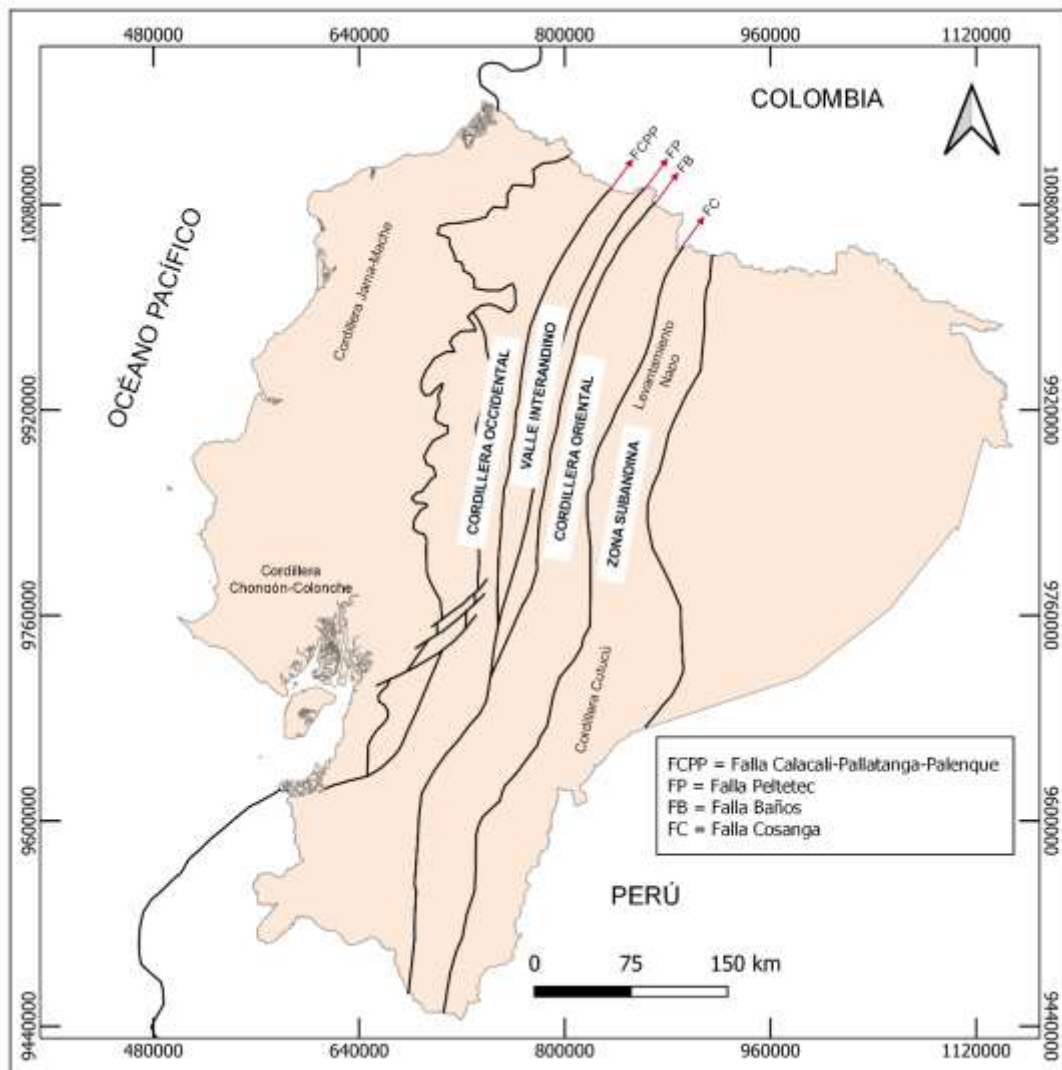
La región Sierra se compone de dos cordilleras (Occidental y Oriental o Real) paralelas. Divididas por el Valle Interandino tanto en la parte norte como en la parte central, tienen un ancho entre 5 - 40 km y altura entre 2 500 - 3 000 m; hacia el norte las elevaciones de las cordilleras superan los 4 500 m, mientras que hacia el sur las elevaciones casi no superan los 4 000 m (Feininger y Seguin, 1983; Kennerley, 1980). En dirección hacia el Perú, los Andes cambian de dirección (NNW) en la deflexión de Huancabamba (Kennerley, 1980) (Figura 4.4).

Rocas volcánicas oceánicas intensamente falladas y plegadas e intrusivos máficos e intermedios conforman la cordillera Occidental, dichas rocas tienen una edad del Cretácico y Cenozoico, este tipo de rocas también se encuentran hacia sur además de rocas sedimentarias y rocas volcánicas continentales (Feininger y Seguin, 1983; Vallejo et. al. 2009). También se compone de volcanes de arco de islas, plutones y depósitos discontinuos tipo *flysch* con una edad entre el Cretácico y Eoceno (Tibaldi y Ferrari, 1992).

La cordillera Real se compone principalmente de rocas metamórficas, sedimentarias y magmáticas con edades entre el Paleozoico y el Cretácico, además, en algunas zonas dichas rocas son intruidas por batolitos del Jurásico (Kennerley, 1980; Lavenu et. al. 1995; Tibaldi y Ferrari, 1992). La cordillera Real es exhumada hacia el norte como consecuencia a la convergencia oblicua de las placas Nazca y Sudamericana en relación con la cordillera Occidental y el arco antepaís (Tibaldi y Ferrari, 1992).

El Valle Interandino está delimitado al oeste por la cordillera Occidental a través de la falla Calacalí-Pujilí y al este por la cordillera Real mediante la falla Peltetec (Vallejo et. al. 2009). Corresponde a una cuenca formada durante una etapa de

tectónica transpresiva delimitada por fallas con tendencia N-S (Lavenu et. al. 1995; Winkler et. al. 2005), y su relleno lo conforman depósitos piroclásticos y flujos de lava con edad del Cuaternario (Feininger y Seguin, 1983). Dicha depresión se compone por tres subcuencas sedimentarias principales con edades entre el Mioceno tardío y el Pleistoceno, la subcuenca del Chota al norte, la subcuenca de Quito-San Antonio-Guayllabamba y, con tendencia hacia el sur están las cuencas de Ambato-Latacunga y Riobamba-Alausí; están rellenas con depósitos contemporáneos de un abanico aluvial, lacustres, fluvial y volcánicos (Tibaldi y Ferrari, 1992; Winkler et. al. 2005). La de Formación en esta zona es contemporánea con la subducción de la placa Nazca a principios del Plioceno (Lavenu et. al. 1995).



**Figura 4.4** Configuración geotectónica del Ecuador. Modificado de Aspden y Litherland (1992) y Reyes (2006).

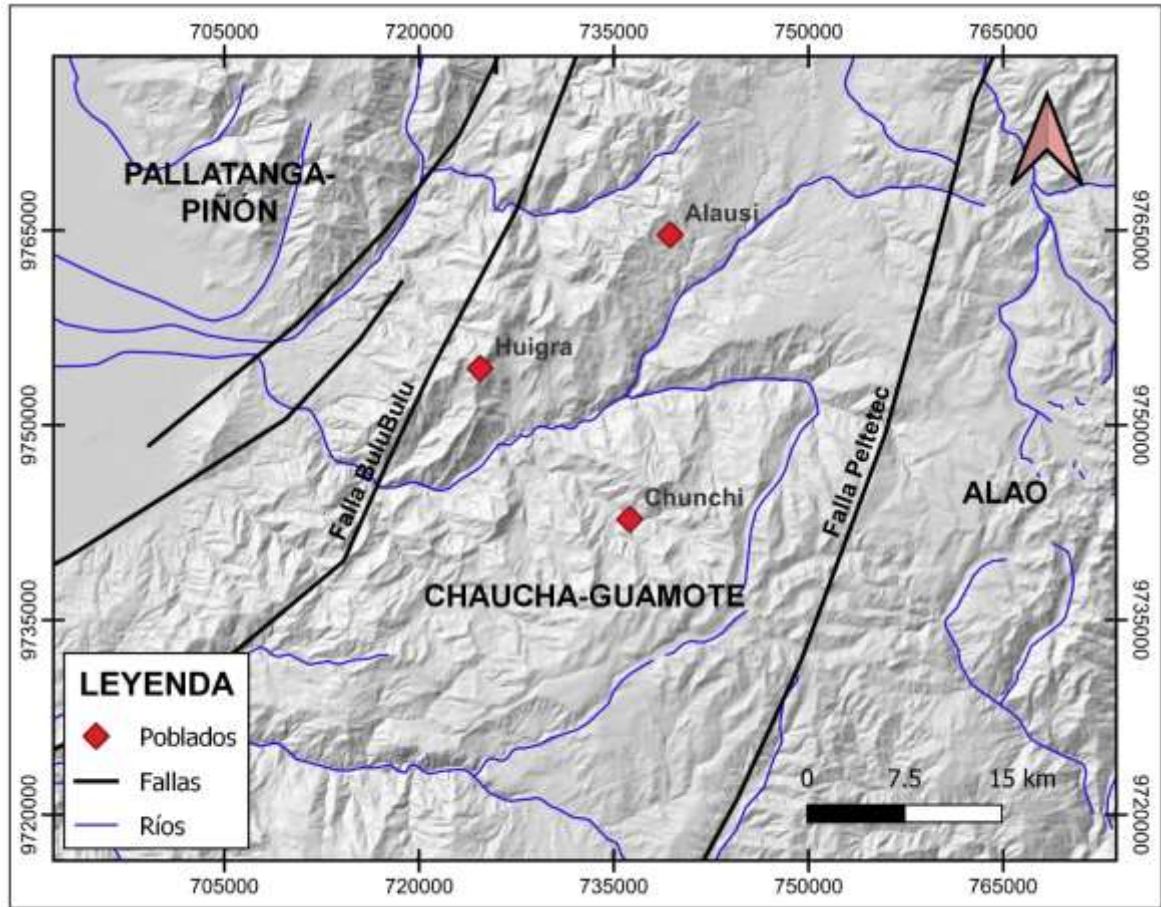
## **Costa**

Al oeste de la región Sierra se encuentra la Costa, se caracteriza por tener muy poco relieve y un ancho entre 25 – 200 km, consiste de una llanura al sur de Guayaquil y al norte se encuentra la cuenca del Guayas así como las cordilleras Chongón-Colonche y Jama-Mache con una elevación de hasta 600 m (Feininger y Seguin, 1983; Kennerley, 1980) (Figura 4.4). El basamento comprende basaltos fallados y diabasas pertenecientes a la Formación Piñón (edad Cretácica), el cual es cubierto por rocas marinas volcanoclásticas y sedimentarias del Cretácico (Feininger y Seguin, 1983).

### **4.1.3. Geología Local**

El área de interés comprende parte del Valle Interandino, que hacia el norte presenta una evidente demarcación por las cordilleras Real al este y Occidental al oeste mientras que hacia el sur se encuentran las cuencas intramontañosas. Dicha área se conforma al este por el borde metamórfico occidental de la cordillera Real (Complejo Insular Alao), la parte central por basamento metamórfico exhumado (Complejo Continental Chaucha-Guamote) y, al oeste por la cordillera Occidental (Complejo Oceánico Pallatanga-Piñón); la división entre los complejos se marca por la falla de Peltetec al este y al oeste por la falla Bulubulu (INIGEMM, 2015) (Figura 4.5).

La zona de estudio presenta fases volcánicas (volcanismo de arco continental), donde se puede encontrar la Formación Huigra y la Formación Alausí que pertenecen al grupo Saraguro (Egüez et. al. 1992).



*Figura 4.5 Terrenos tectono-estratigráficos.*

#### **4.1.3.1. Complejo Insular Alao**

Conformado por las unidades de El Pan, Maguazo y Alao-Paute.

##### **Unidad El Pan**

De edad Jurásica, Litherland et. al. (1994) indica que esta unidad podría representar una secuencia marina de tras arco que comprende volcanosedimentos metamorfizados, es decir esquistos verdes, esquistos gráfíticos y filitas; presenta una foliación NE-SW y buzamiento hacia el NW (INIGEMM, 2015).

##### **Unidad Maguazo**

También de edad Jurásica, Litherland et. al. (1994) cataloga a la Unidad Maguazo como un cinturón entre 5-10 km de ancho de rocas turbidíticas y volcánicas metamorfizadas (basaltos turbidíticos y andesíticos), y la interpretan como una secuencia marina de antepaís del arco de islas Alao-Paute. La de Formación (dúctil

y frágil) presente en las rocas, específicamente la brechificación y cizallamiento N-S y NE-SW son causadas por fallas geológicas (INIGEMM, 2015).

### **Unidad Alao-Paute**

Litherland et. al. (1994) describe a la Unidad Alao-Paute (arco de islas oceánico) como un cinturón de rocas verdes, esquistos verdes y esquistos gráfícos con vetas de cuarzo; las rocas presentan clivaje o esquistosidad con fuerte buzamiento. Presenta una foliación variable de NNE-SSW a NNW-SSE además de un fuerte buzamiento hacia el oeste (INIGEMM, 2015).

#### **4.1.3.2. Complejo Continental Chaucha-Guamote**

Forma parte de la zona sur del Valle Interandino, y comprende a las Unidades litotectónicas Cebadas, Punín y Guasuntos.

### **Unidad Cebadas**

Litherland et. al. (1994) denota que esta unidad se conforma por pizarra con cuarcitas de edad Jurásica. Presenta una esquistosidad con tendencia NE-SW y un buzamiento hacia el NW (INIGEMM, 2015).

### **Unidad Punín**

Litherland et. al. (1994) describe que la unidad Punín de edad Jurásica comprende cuarcitas y pizarras. Las cuarcitas forman pliegues anticlinales con rumbo NE-SW y las pizarras se encuentran formando pliegues tipo Chevrón (INIGEMM, 2015).

### **Unidad Guasuntos**

La unidad Guasuntos con edad Jurásica se compone de pizarras con cuarcita (Litherland et. al. 1994). Las rocas presentan un alto grado de de Formación formando pliegues y fallas inversas (INIGEMM, 2015).

#### **4.1.3.3. Depósitos Continentales**

Este grupo corresponde a las rocas que cubren los complejos geotectónicos descritos.



### **Grupo Saraguro**

Se compone principalmente de rocas volcanoclásticas que han sido retrabajadas y por tobas volcánicas soldadas; comprende las Formaciones Ocaña y Puñay, la primera constituida por tobas dacíticas ricas en lapilli y la segunda conformada por brechas, lavas andesíticas, areniscas volcánicas y arcillas de color morado (Dunkley y Gaibor, 1997).

Según Egüez et. al. (1992), la Unidad Huigra de edad Oligocénica es el basamento del Valle Interandino, se compone de brechas andesíticas, andesitas e intercalaciones de volcanosedimentos con buzamiento hacia el oeste; aflora en el valle del Río Chanchán. Dicha unidad presenta un Miembro Superior y un Miembro Inferior, donde, el superior comprende brechas volcánicas estratificadas y localmente se tiene volcanosedimentos compuestos por grauwacas, micro conglomerados y limolitas (verde, rojo violáceo y negro); el Miembro Inferior lo conforman lavas andesíticas, porfiríticas y en ocasiones tobáceas (Egüez et. al. 1992).

La Unidad Alausí de edad Miocénica se compone de lavas andesíticas-riolíticas, tobas soldadas, brechas volcánicas e intercalaciones sedimentarias de carácter tobáceo (Egüez et. al. 1992). Presenta un Miembro Superior con tobas, lahares y flujos dacíticos, además de un Miembro Inferior el cual se conforma de brechas volcánicas andesíticas, secuencias sedimentarias estratificadas (limolitas, areniscas y, lutitas tobáceas) (Egüez et. al. 1992).

### **Formación Cisarán**

Las rocas de la Formación Cisarán se dividen en 3 miembros, donde el Miembro Superior e Inferior de origen volcánico se componen de brechas de composición andesítica a dacítica, lavas y, el Miembro Intermedio a diferencia de los anteriores es de composición volcanoclástica y se compone de areniscas tobáceos, rocas que ha sido retrabajadas, lutitas, rocas piroclásticas y brechas de gran espesor (Dunkley y Gaibor, 1997).

### **Depósitos Cuaternarios**

Este grupo abarca depósitos de terrazas, aluviales, coluviales, lahares, glaciales (morrenas) y material de movimientos en masa.

Los depósitos coluviales están establecidos por material que se ha depositado por acción de la gravedad al pie de relieves tectónicos erosivos y volcánicos, constituidos por clastos angulosos de composición polimíctica con matriz arenosa y un tamaño métrico a milimétrico a diferencia de los depósitos aluviales que están constituidos por gravas de tamaño medio a grueso y se encuentran intercaladas con material lahárico y tobáceo. Como consecuencia de la combinación de los depósitos coluviales y aluviales se presentan los depósitos coluvio-aluviales, constituidos por clastos redondeados a subredondeados que rellenan los valles de los ríos, así como algunas cuencas hidrográficas, su composición es polimíctica con matriz arenosa. Los depósitos glaciales constituyen el material que ha sido arrastrado a zonas bajas y están conformados por grava, arenas y tilitas. Finalmente, las terrazas son plataformas sedimentarias cuyos depósitos se formaron gracias a la acumulación de material arrastrado por ríos, están constituidos por clastos de grava y arena.

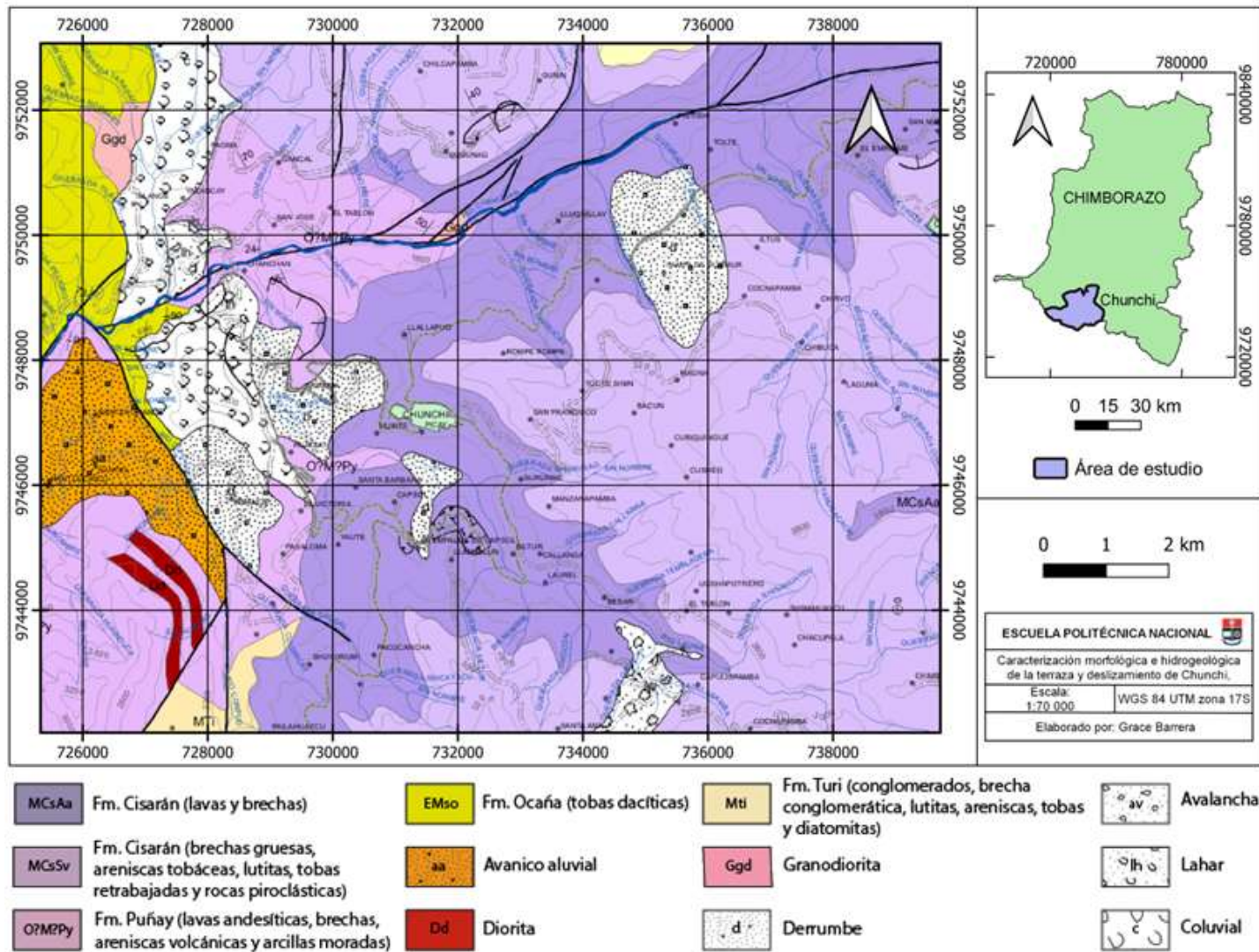


Figura 4.6 Geología local. Modificado de INIGEMM, (2015).

#### **4.1.4. Geomorfología**

La zona de estudio se encuentra en el valle de Alausí-Chunchi (depresión continua con ausencia de edificios volcánicos), donde las glaciaciones en el Cuaternario han sido determinantes en la geomorfología de la zona además de la acumulación de depósitos coluviales. Entre las superficies geomorfológicas que se encontraron en la zona de interés están las superficies onduladas, vertientes abruptas, relieve volcánico medio, terraza baja y cauce actual, valle intramontano y coluviones antiguos (Figura 4.7).

Las superficies onduladas abarcan un área de 290,45 ha siendo el 1,06% de la superficie total del cantón Chunchi con litologías pertenecientes a las Formaciones Tarqui y Alausí, se presentan en zonas como Capzol y Chunchi; son geoformas con pendientes de hasta el 25% y desniveles que no sobrepasan los 5 m, además se encuentran cubiertas por vegetación y cultivos de maíz (IEE y MAGAP, 2013b).

Las vertientes abruptas comprenden un área de 2 217,86 ha representando el 2,06% de la superficie total del cantón y litologías correspondientes a la Formación Alausí; presentan fuertes pendientes a escarpadas entre el 40 y 100% además de desniveles que no superan los 100 m (IEE y MAGAP, 2013b).

El relieve volcánico medio comprende 7 225,48 ha y litologías como las Formaciones Tarqui, Cangahua y Alausí; son relieves moderados cuya altura no sobrepasa los 100 m (comprendidos entre la cima y base de la ladera) con pendientes de hasta 100% y se encuentran en lugares como La Armenia (IEE y MAGAP, 2013b).

Las terrazas bajas y cauce actual ocupan un área de 107,01 ha representando el 0,38% de la extensión total del cantón con pendientes que varían entre 0 al 5% y desniveles que son inferiores a los 5 m; se trata de plataformas pequeñas compuestas por los sedimentos que arrastra el río, están presentes en zonas como el Chanchán (IEE y MAGAP, 2013b).

El valle intramontano abarca una extensión de 144,98 ha por lo que representa el 0,53% de la extensión total del cantón con litologías de coluviales y coluvio-aluviales provenientes de las paredes montañosas, así mismo un aporte torrencial y fluvial de cauces; hace referencia a unidades de matriz arenosa y composición

polimíctica cuya geomorfología es llana formando fajas de terreno alargadas, estrechas y encajonados por lo que el agua de lluvia se puede concentrar fácilmente en estas zonas (La Armenia), además presentan pendientes entre el 2 y 5% (IEE y MAGAP, 2013b).

Los coluviones antiguos comprenden 4 299,51 ha siendo así el 15,21% de la extensión total del cantón, están presentes en zonas como Picay y La Armenia; es un material detrítico de matriz arenosa y composición polimíctica depositado o transportado por acción de la gravedad (clastos angulosos de tamaño métrico a milimétrico) que en la parte sureste se identifican como coluviones de composición glacial (bloques sedimentarios, grava, arena y tilitas) con pendientes fuertes hasta el 100% y desniveles menores a 100 m (IEE y MAGAP, 2013b).

En general, el cantón Chunchi presenta relieves colinados y volcánicos con pendientes entre el 25 y 100%, además el 0,23% del cantón está comprendido por terrazas inundables de valles intramontanos correspondientes a nuestra zona de interés.

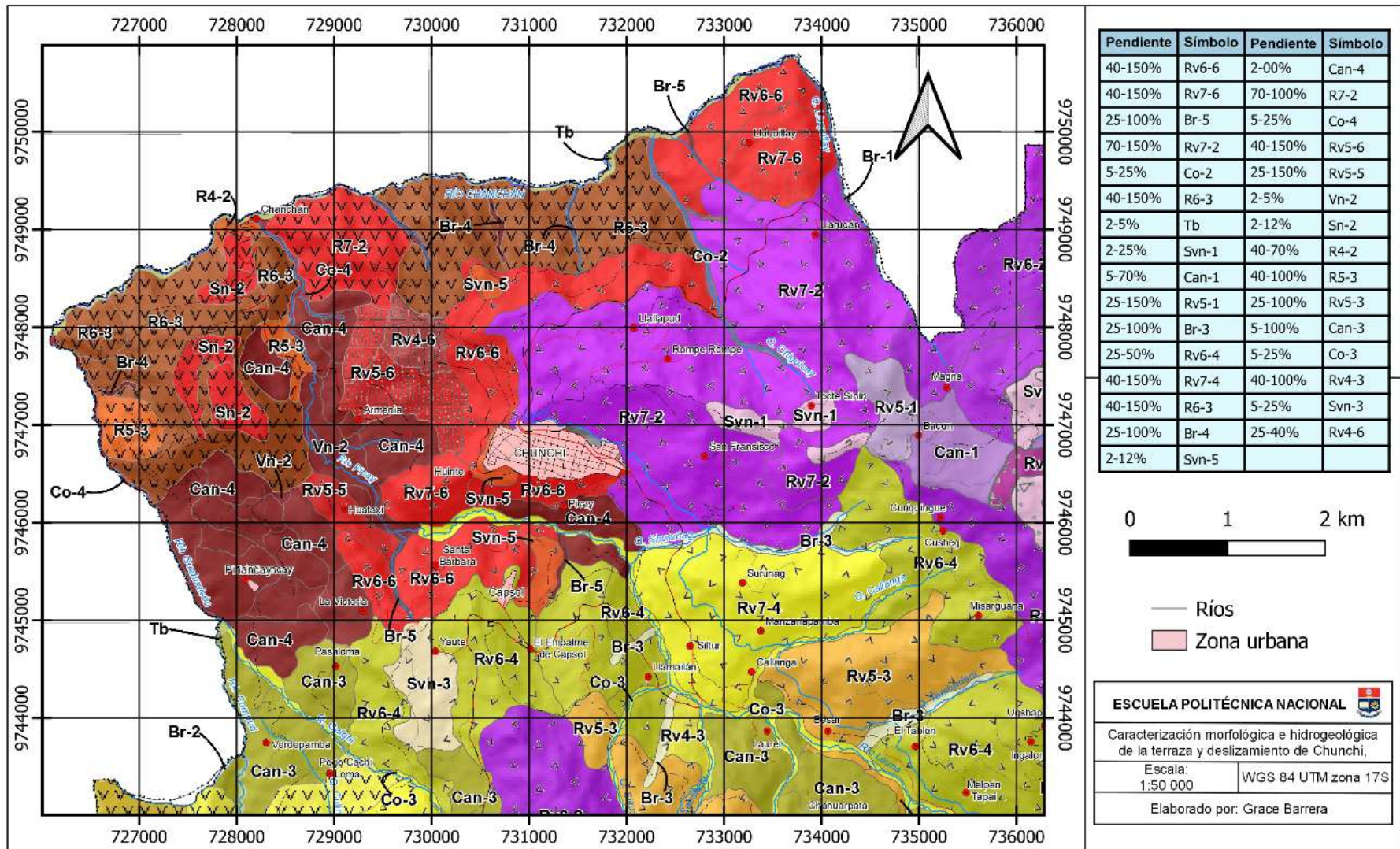


Figura 4.7 Geomorfología del área de estudio en el Cantón Chunchi. Modificado de IEE y MAGAP (2013b).

#### **4.1.5. Uso y Ocupación del Suelo**

La capacidad de uso del suelo se divide en clases y subclases. Dentro de las clases se encuentran los terrenos adecuados para la agricultura y son arables, aquellos que no son aptos para cultivos y los que no son adecuados para la agricultura o arables. Las subclases clasifican a los terrenos en función de factores como la erosión, humedad, clima y suelo.

##### **4.1.5.1. Clases de Capacidad de Uso del Suelo**

Aquellos que son adecuados para la agricultura y el arado se compone de un grupo de 4 clases. La clase I se trata de tierras regables donde se puede realizar actividades agrícolas, pecuarias o forestales; no son tóxicos ni salinos, con fertilidad alta y buen drenaje. La clase II se refiere a tierras regables donde se puede realizar actividades agrícolas, pecuarias o forestales; presentan toxicidad y salinidad ligera-nula con fertilidad moderada-alta y drenaje moderado-bueno. La clase III se presenta en valles intramontanos, coluviones antiguos, superficies volcánicas onduladas y superficies onduladas, las cuales son usadas para la agricultura y actividades pecuarias o forestales; ocupa un área de 257,51 ha del cantón. La clase IV se refiere a tierras regables donde se puede realizar actividades agrícolas, pecuarias o forestales, pero con menor posibilidad de elegir los cultivos anuales a desarrollarse; presentan tres grados de fertilidad, toxicidad y salinidad. La clase V se presenta en coluviones antiguos, superficies volcánicas onduladas y superficies onduladas ocupando un área de 1 213,53 ha del cantón. La clase VI presenta una restricción de los cultivos intensivos (requiere de manejo y conservación); presentan toxicidad y salinidad alta-nula (IEE y MAGAP, 2013a). Los que no son adecuados para cultivar (clase VII) requieren de un tratamiento especial en cuanto al uso de maquinaria; presentan fertilidad, toxicidad y salinidad alta a nula con drenaje variable (IEE y MAGAP, 2013a).

Por último, aquellos con fines de conservación se divide en 3 clases (VIII, IX y X). Este tipo de tierras no permiten el uso de maquinaria para el arado, por lo que son aprovechadas para el pastoreo, uso forestal o conservación; presentan salinidad y toxicidad alta-nula con fertilidad y drenaje variable (IEE y MAGAP, 2013a). La clase VIII se presenta en unidades morfológicas como coluviones antiguos y coluvión-

aluvial antiguos ocupando un área de 7 970,28 ha del cantón. La clase VIII se presenta en unidades morfológicas como valles en U, relieves volcánicos montañosos, coluvión-aluvial antiguos, morrenas de fondo, circos glaciares y vertientes abruptas ocupando un área de 14 604,63 ha del cantón (IEE y MAGAP, 2013a). En general en el Cantón Chunchi se presentan principalmente las clases VII y VIII (fines forestales o conservación) y, las clases II y III. Aquellas clases con posibilidad de uso agrícola son derivados de ceniza volcánica por lo que el uso de maquinaria puede causar su compactación (IEE y MAGAP, 2013a).

Las actividades agrícolas que ocupan el 38,7% del total de la extensión del cantón corresponden a cobertura vegetal natural donde las partes altas están cubiertas por cultivos de papa, maíz, haba, trigo, arveja y cebada, mientras que la cobertura vegetal de las partes bajas (zonas como Capzol) se compone de árboles frutales, tomate, pepino y fréjol; convirtiendo así al resto del territorio en zonas con población o no productivas (IEE y MAGAP, 2013c). El área de interés abarca las parroquias de Capzol con predominio de actividades agrarias presenta un bosque húmedo (altitudes entre 2 600 – 3 000 m.s.n.m.) y, Chunchi que presenta un páramo herbáceo (altitudes entre 2 800 – 3 800 m.s.n.m.) el cual es una fuente natural de agua (IEE y MAGAP, 2013c).

En parroquias como Chunchi, las actividades pecuarias (manejo de bovinos) para obtener leche tienen mayor concentración; esta es una de las zonas donde los pastizales cultivados tienen mayor distribución y pueden estar asociados a terrenos con cultivos (Capzol y Chunchi). Además, hay crianza de ganado de lidia (IEE y MAGAP, 2013c).

El 0,5% del cantón comprende actividades antrópicas como poblados, zona urbana, centros educativos y canteras (IEE y MAGAP, 2013c). En su mayoría, el suelo del cantón se emplea para la conservación y protección. Los Ríos Chanchán y Picay son los encargados de cubrir las necesidades de riego para actividades agropecuarias.

#### **4.1.6. Clima**

El clima del cantón puede variar entre tres pisos climáticos: Ecuatorial de alta montaña, Ecuatorial meso térmico semihúmedo y Ecuatorial meso térmico seco



(GAD Municipal Chunchi, 2020). En el cantón Chunchi se puede tener temporadas muy lluviosas entre los meses de enero y abril, mientras que las temporadas entre los meses de junio y noviembre se caracterizan por presentar una precipitación menor. Con base en los datos de la estación meteorológica M0136 – Chunchi del 2013, la precipitación mensual puede variar entre 49 mm y 0,5 mm, así mismo la evaporación mensual varía entre 108,5 mm y 39 mm. La capacidad media de retención de agua del suelo es de 150 mm, la temperatura media es de 14,5°C (IEE y MAGAP, 2013d).

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Levantamiento Bibliográfico y de Datos Existentes

Este estudio se fundamenta en la aplicación del método geofísico Audio Magnetotelúrico en la determinación de la presencia de aguas subterráneas y su ubicación en las diferentes unidades litológicas del área de estudio, así como la ubicación de niveles piezométrico y freáticos. A continuación, se listan las fuentes bibliográficas compiladas para este proyecto de investigación que se basa en el uso de este método geofísico:

- Šumanovac y Orešković (2018): Exploración de acuíferos carbonatados mediante la modelización inversa y directa de datos Audio-Magnetotelúricos de fuente controlada.
- Xu et. al. (2020): Prospección hidrogeológica en el área de Da Qaidam de la cuenca de Qaidam mediante el método magnetotelúrico de audiofrecuencia.
- Li et. al. (2021): Modelización de la estructura hidrogeológica basada en un enfoque integrado que utiliza datos de múltiples fuentes.
- Chouteau et. al. (1994): Estudio del Sistema acuífero de Santa Catarina (Cuenca de México) mediante sondeos magnetotelúricos.
- Pedrera et. al. (2016): Desvelando la interacción acuífero-humedal mediante los métodos CSAMT y de gravedad: el acuífero Mollina-Camorra y la playa-lago de Fuente de Piedra, sur de España.
- Giroux et. al. (1997): Uso del método magnetotelúrico en el estudio del acuífero profundo del Maestrichtiano en Senegal.

#### 5.1.1. Levantamiento de Bases Cartográficas, Datos Meteorológicos, Geológicos e Hidrológicos

El levantamiento de la información cartográfica temática del cantón Chunchi a escala 1:60.000, memorias técnicas y *shapefiles* de donde se extrajo información como el uso y ocupación del suelo, clima, hidrología y geomorfología, se obtuvo del GeoPortal del Instituto Geográfico Militar (IGM-Ecuador).

Adicionalmente, se empleó la siguiente bibliografía para la descripción geológica:

- Egüez et. al. (2017): Mapa Geológico de la República del Ecuador a escala 1:1.000.000.
- IGM (2013): Carta Topográfica de Alausí a escala 1:50.000.
- INIGEMM (2015): Hoja Geológica de Alausí a escala 1:100.000.
- Egüez et. al. (1992): Las unidades Huigra y Alausí en la evolución geodinámica del valle interandino del Ecuador.
- Lavenu et. al. (1995): Una Cuenca compresiva del Plioceno-Cuaternario en la Depresión Interandina, Ecuador central.

### 5.1.2. Levantamiento de las Informaciones de Pozos y Vertientes

#### Existentes

El análisis de isótopos estables oxígeno y deuterio ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) se basó en la recolección de 10 muestras de agua tomadas en 3 vertientes y 7 puntos a lo largo de los Ríos Picay, Chanchán y la Quebrada Shuruñag como se resume en la Tabla 5.1. El muestreo se realizó considerando criterios de accesibilidad, representatividad, y seguridad de la zona de interés.

**Tabla 5.1** Ubicación de muestras recolectada para análisis de isótopos, UTM WGS84 17S.

Muestra	Tipo	Latitud	Longitud	Altura	Ubicación
MCH-2	Sub	9746956	729496	1858	Cuerpo deslizamiento La Armenia
MCH-3	Sub	9746930	729563	1871	
MCH-4	Sub	9747756	729448	2008	La Pirámide
CHUN-S1	Sup	9747123	728854	1782	Río Picay
CHUN-S3	Sup	9747126	728823	1773	
CHUN-S2	Sup	9749163	728174	1498	Río Chanchán
CHUN-S4	Sup	9749183	728209	1578	
CHUN-S5	Sup	9745749	732219	2142	Quebrada Shuruñag
CHUN-S6	Sup	9746954	729517	1865	Cuerpo deslizamiento La Armenia
CHUN-S7	Sup	9746933	729678	1889	

*Nota: Sub = subterránea y Sup = superficial.*

El procedimiento aplicado en la recolección de las muestras se indica a continuación:

## **Preparación**

Con respecto a las aguas subterráneas (vertientes) se organizó un plan de muestreo que incluyó el lugar, el tipo y el número de muestra. Así también, se preparó todo el material necesario para su recolección (frascos, cinta, marcadores y GPS) con el fin de identificar debidamente la muestra.

## **Toma de muestras**

Se rellenó el recipiente de muestreo totalmente sumergiéndolo en sentido contrario al flujo de agua, procurando que no queden burbujas de aire por dentro antes de taparlo.

## **Sellado**

Una vez que se obtuvo la muestra de agua, el recipiente fue sellado envolviendo cinta adhesiva alrededor de la tapa y envase para evitar derrames. Por último, se identificó cada muestra con su respectivo nombre, fecha y ubicación (latitud y longitud).

## **Análisis *in situ***

Para la toma de datos de los parámetros físicos (conductividad eléctrica, temperatura, potencial de oxidación y pH) de aguas superficiales, se sumergió la sonda multiparamétrica HACH HQ30d dentro del cuerpo de agua procurando que esta no toque el suelo (Figura 5.1).



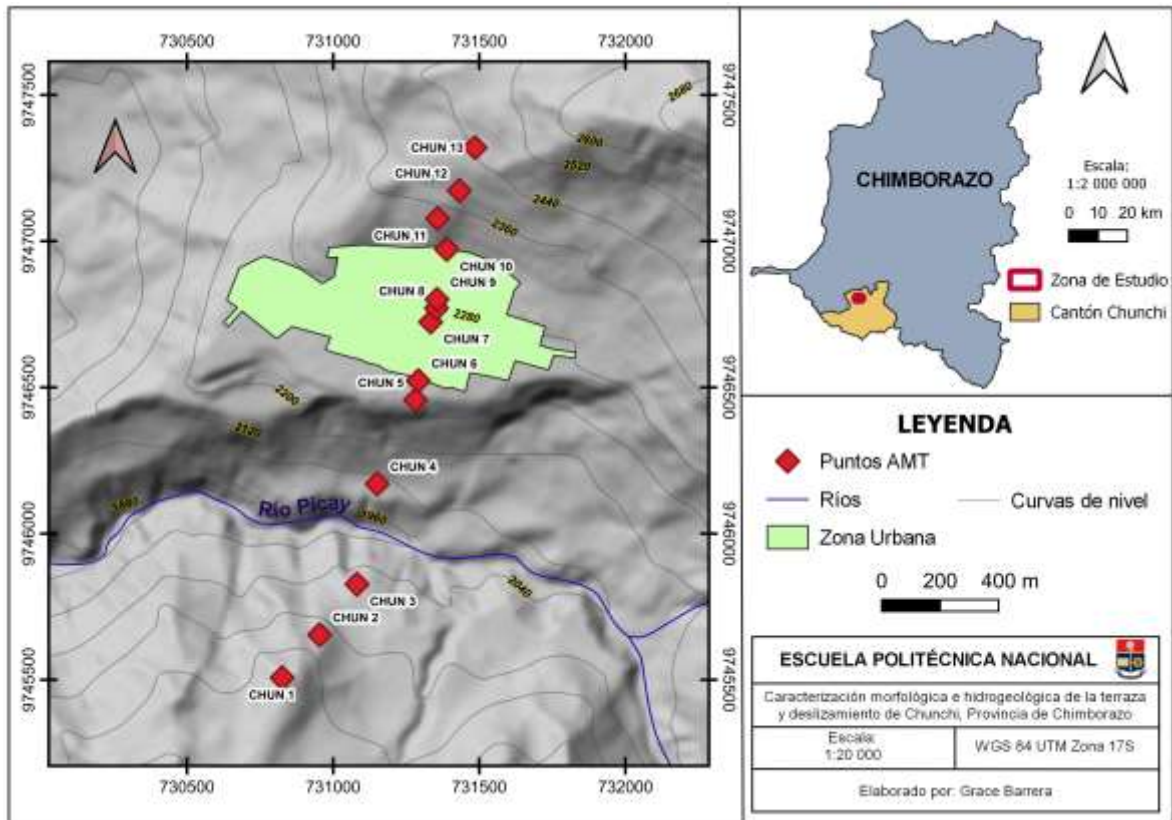
**Figura 5.1** Medición de parámetros físicos en el Río Picay.

## 5.2. Levantamiento de Información Geofísica

Los datos obtenidos como resultado del levantamiento de información realizado con el método Audio Magnetotelúrico en el Cantón Chunchi se muestran en las fichas técnicas obtenidas por el equipo EH4-Geometrics (ANEXO I). En total se instalaron 13 estaciones Audio Magnetotelúricas donde 4 sensores eléctricos fueron colocados en forma de cruz y 2 sensores magnéticos se ubicaron ortogonalmente. Así también, se conectaron los cables desde la batería a sus respectivos sensores y la computadora. Una vez finalizada la instalación de todos los equipos se midió desde la superficie terrestre las series temporales de fluctuaciones naturales eléctricas y magnéticas de la Tierra. A continuación, las series temporales se transformaron al dominio de las frecuencias y a través de relaciones lineales entre las componentes del campo eléctrico y magnético se generaron las respuestas del terreno para cada estación a lo largo del perfil. Este proceso se realizó en cada punto para determinar la distribución de las resistividades eléctricas de la zona de estudio en función de la frecuencia (profundidad desde la superficie de medición). La unión de respuestas obtenidas dio lugar a un modelo de resistividades del subsuelo. En la Tabla 5.2 se resume la ubicación de las zonas en las que se realizó el levantamiento de datos y la Figura 5.2 muestra la distribución de puntos en campo.

**Tabla 5.2** Ubicación de puntos del levantamiento de datos de Audio Magnetotelúrico, UTM WGS 84 zona 17S.

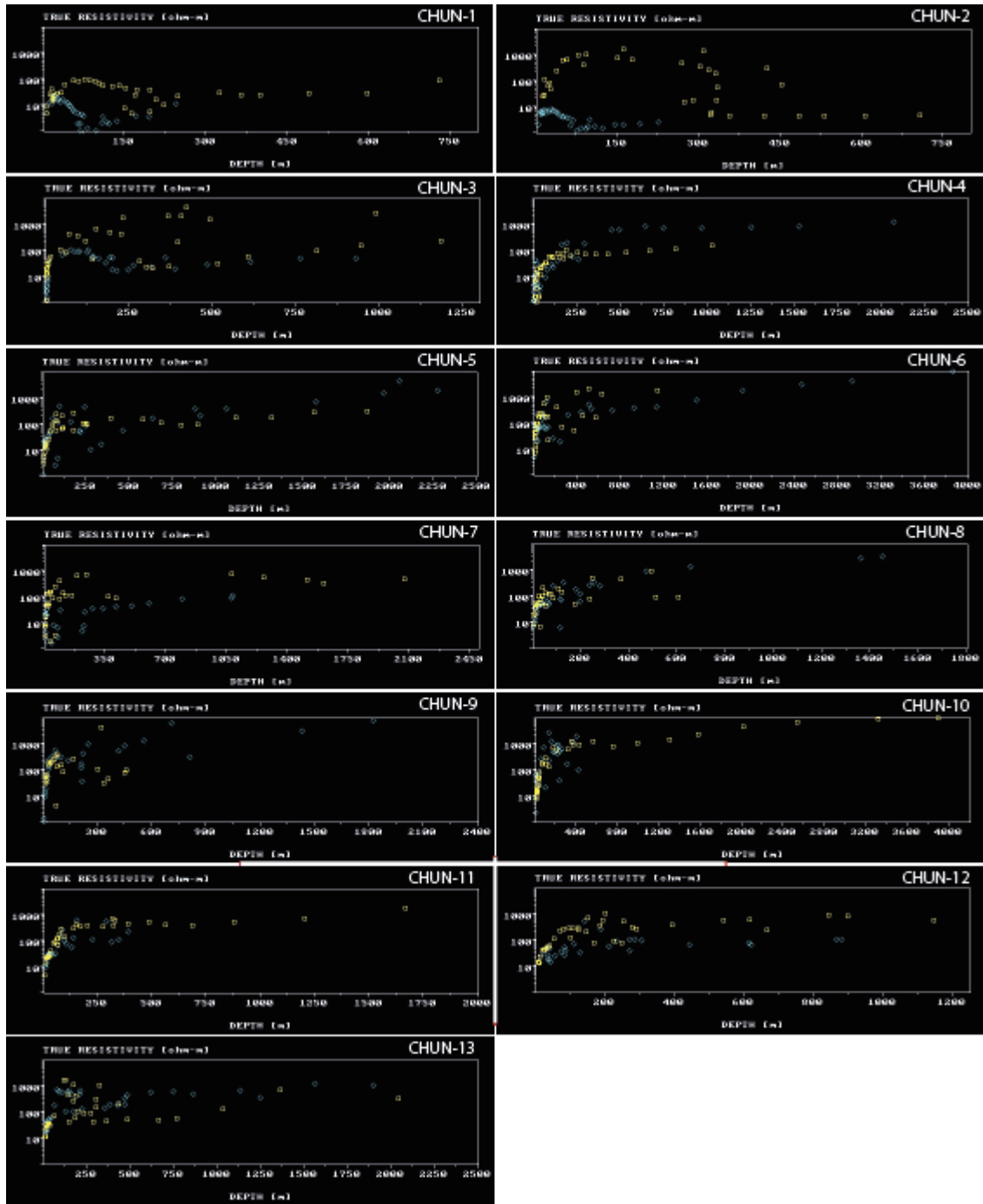
Punto	Longitud	Latitud	Altura (m)	Referencia
CHUN 1	730826	9745507	2613	Escuela Capzol
CHUN 2	730954	9745654	2164	Talud bajo el cementerio
CHUN 3	731082	9745827	2082	Terraza joven (Margen izquierdo de Río Picay)
CHUN 4	731151	9745170	2049	Terraza joven (Margen derecho de Río Picay)
CHUN 5	731282	9746457	2260	Casa Dr. Rueda (alcalde de Chunchi)
CHUN 6	731292	9746523	2262	Casa Sra. Ordoñez
CHUN 7	731334	9746724	2269	Parque, lado sur
CHUN 8	731354	9746771	2275	Diagonal a la iglesia (frente a punto 7)
CHUN 9	731356	9746801	2272	Convento Sto. Domingo de Guzmán
CHUN 10	731389	9746972	2304	Vía Bermeo Vallejo y Abdón Calderón
CHUN 11	731358	9747078	2359	
CHUN 12	731432	9747173	2403	Calle (en una Y)
CHUN 13	731486	9747320	2446	Lliwishí



**Figura 5.2** Distribución de puntos de Audio magnetotelúrico.

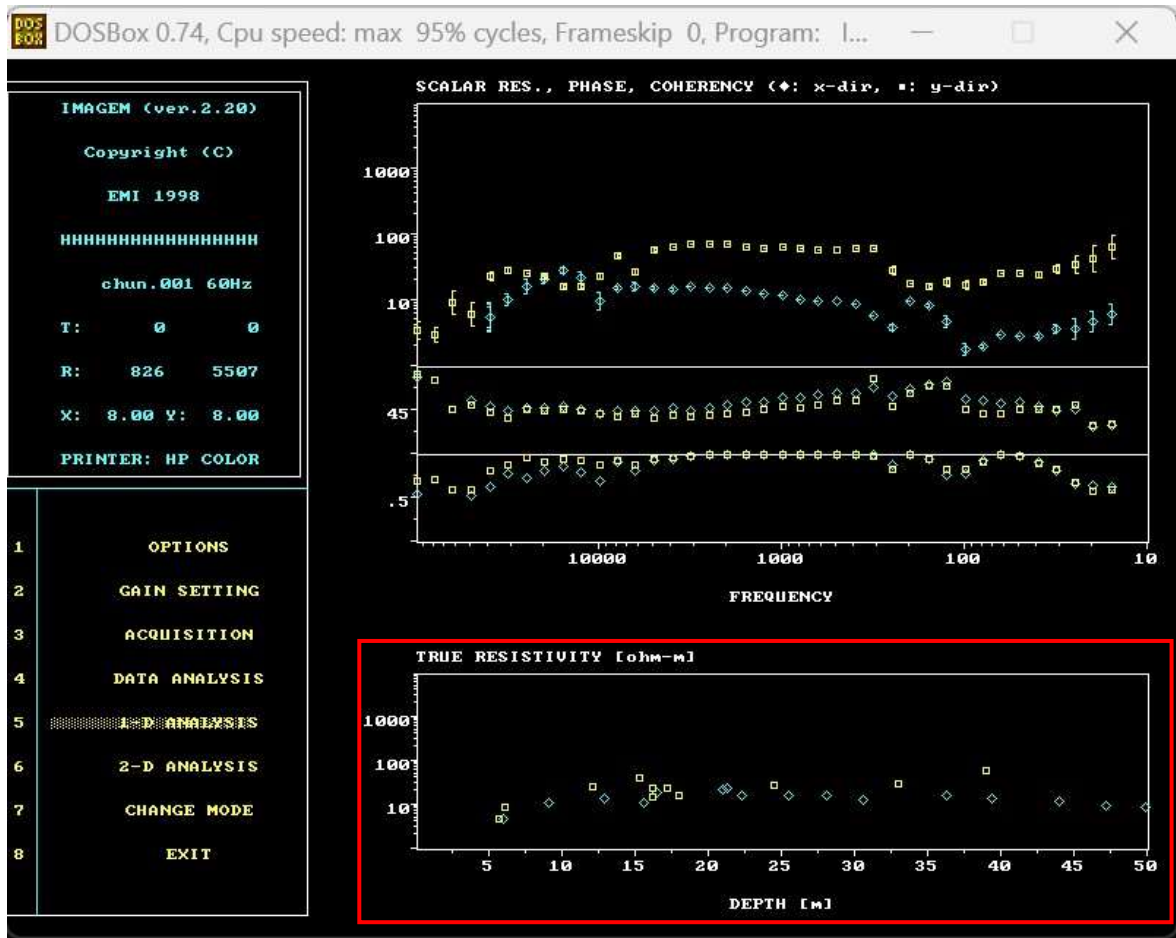
Posterior al levantamiento de información, se realizó el tratamiento de datos para obtener un modelamiento con los 13 puntos registrados. El modelamiento se obtuvo mediante el uso de tres programas informáticos: DOSBox-0.74, WebPlotDigitizer-3.8 y Stratagem Resistivity Plotter.

El programa informático DOSBox-0.74 se utilizó para visualizar la información de cada punto deseado ingresando el número del punto requerido (1-13) a través de la selección de "1-D ANALYSIS" en el panel de opciones. Como resultado de esta acción se obtuvo una gráfica de profundidad *versus* resistividad, donde la profundidad se encuentra en metros y la resistividad en ohm/m (Figura 5.3).



**Figura 5.3** Gráficas de Profundidad versus Resistividad del Audio Magnetotelúrico en DOSBox-0.74.

El programa DOSBox-0.74 permitió modificar la escala del eje X (profundidad) para obtener una imagen más clara de los datos registrados en cada punto. Haciendo uso de la Herramienta Recortes se extrajo la gráfica de Profundidad *versus* Resistividad en al menos 5 partes de acuerdo con la escala escogida para cada punto con el fin de obtener el mayor detalle posible en cada sección (Figura 5.4).



**Figura 5.4** Datos de Profundidad versus Resistividad del punto CHUN-1 con escala de 0 – 50 m en profundidad.

Con el objetivo de conocer los valores numéricos de las imágenes almacenadas se cargaron dichas imágenes en el software WebPlotDigitizer, seleccionando la opción "2D (X-Y) Plot". Después, se calibraron los ejes X y Y considerando que la resistividad (eje Y) se encuentra en escala logarítmica. Posteriormente, con la mayor precisión posible se marcaron todos los puntos en la imagen como se muestra en la Figura 5.5. Los datos numéricos se almacenaron en un archivo .csv el cual fue exportado al finalizar para obtener una base de datos de los 13 puntos (Figura 5.6).



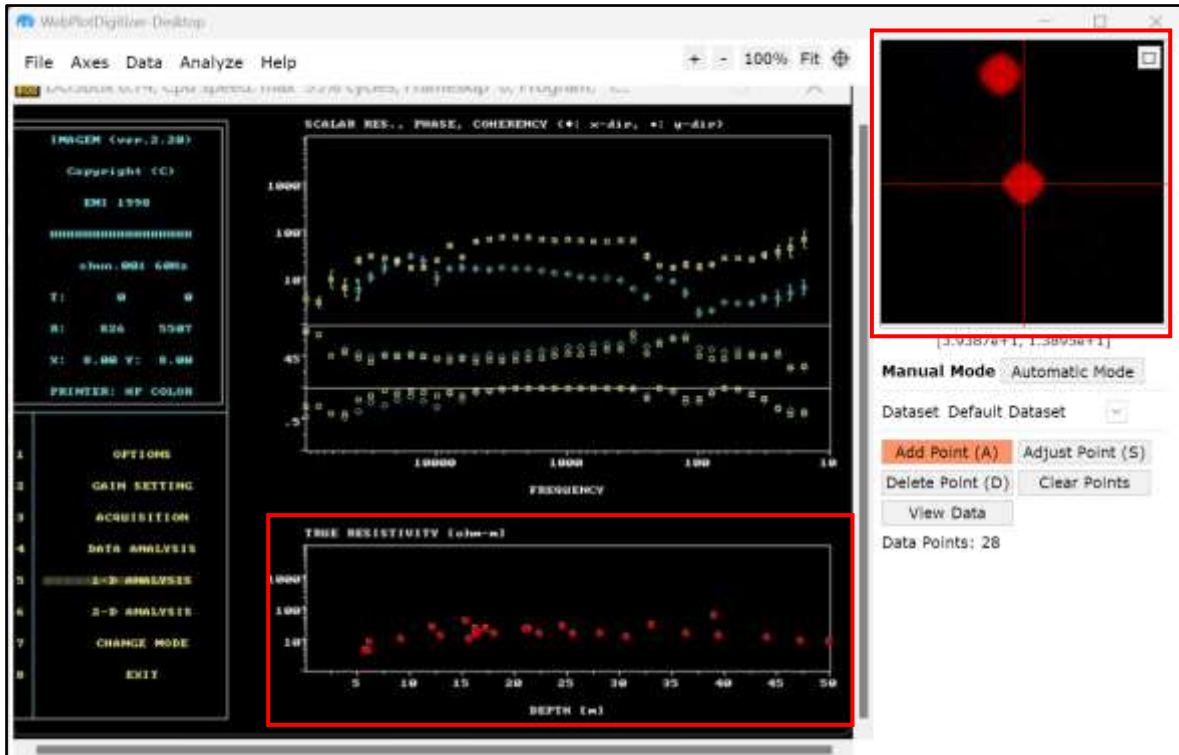


Figura 5.5 Ubicación de datos correspondientes al punto CHUN-1 en WebPlotDigitizer.

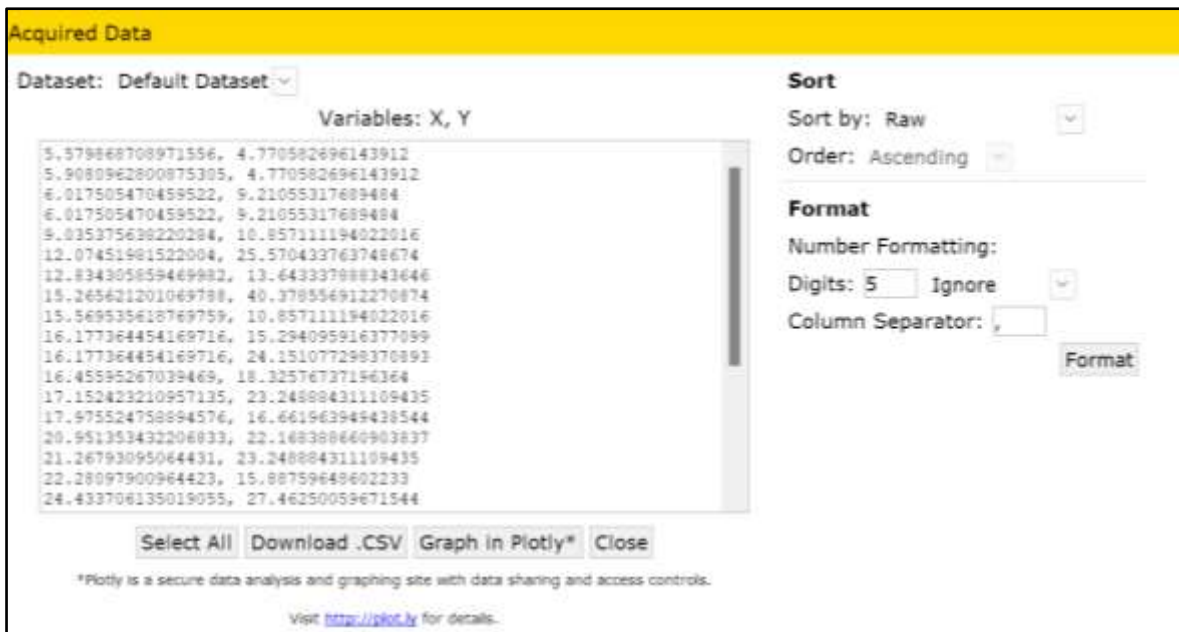
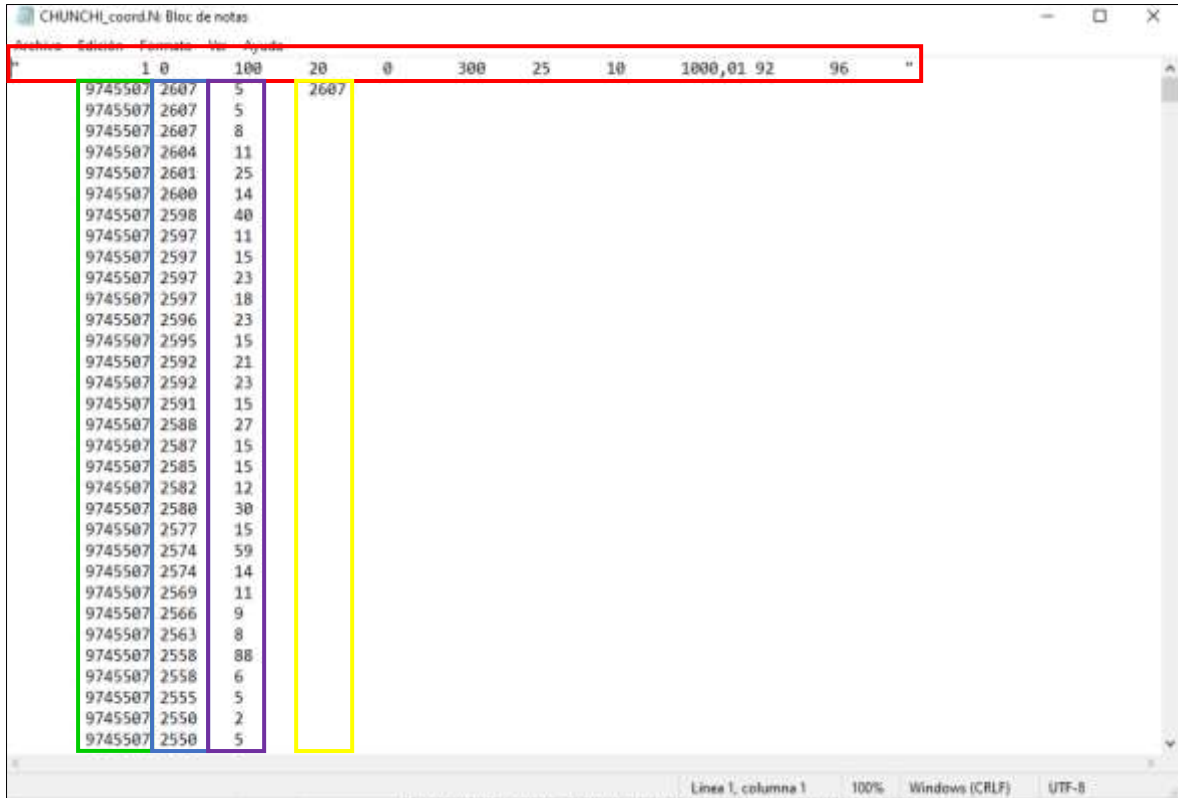


Figura 5.6 Visualización de datos a exportar del punto CHUN-1.

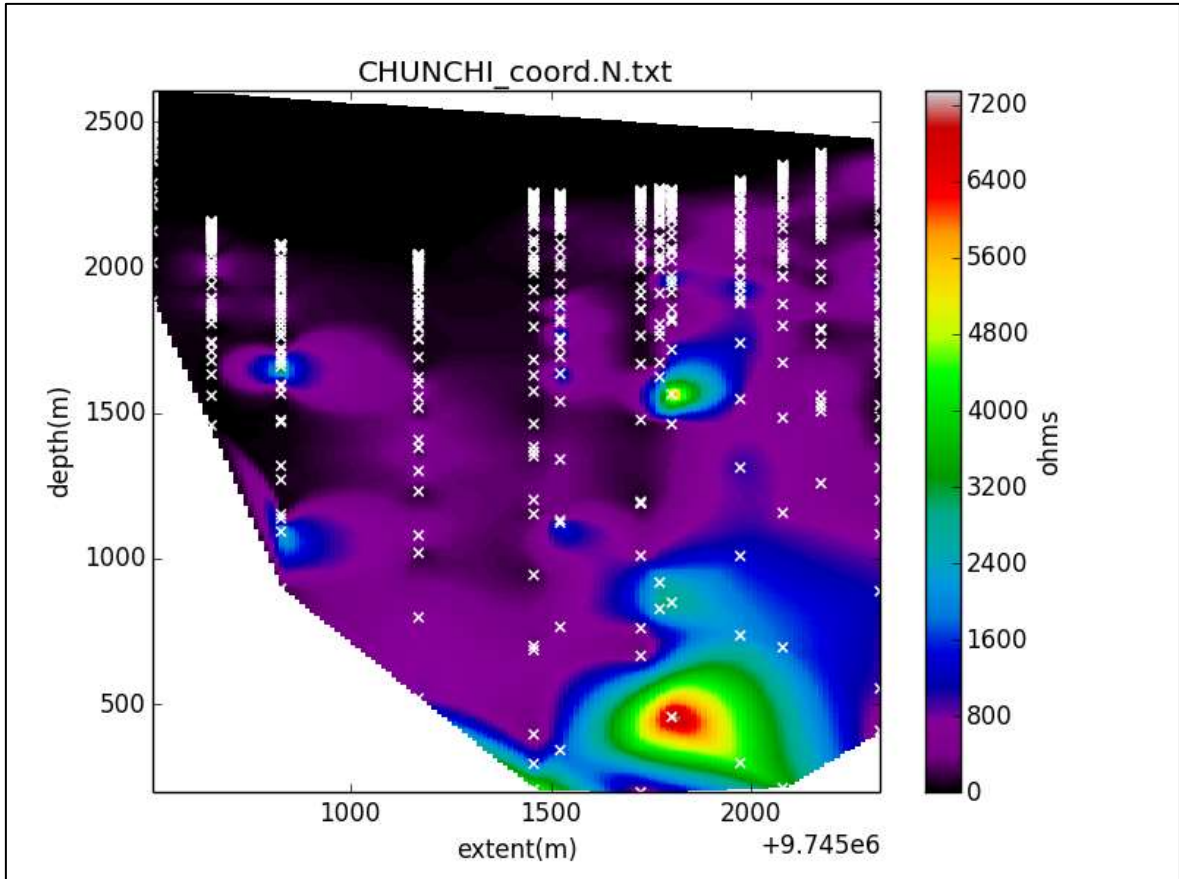
Los datos numéricos de resistividad, profundidad, longitud o latitud y altura de todos los puntos (diferencia entre la altitud y profundidad) se unificaron haciendo uso de una hoja de Excel. Posteriormente, la información se guardó en un archivo .txt con la estructura mostrada en la Figura 5.7.



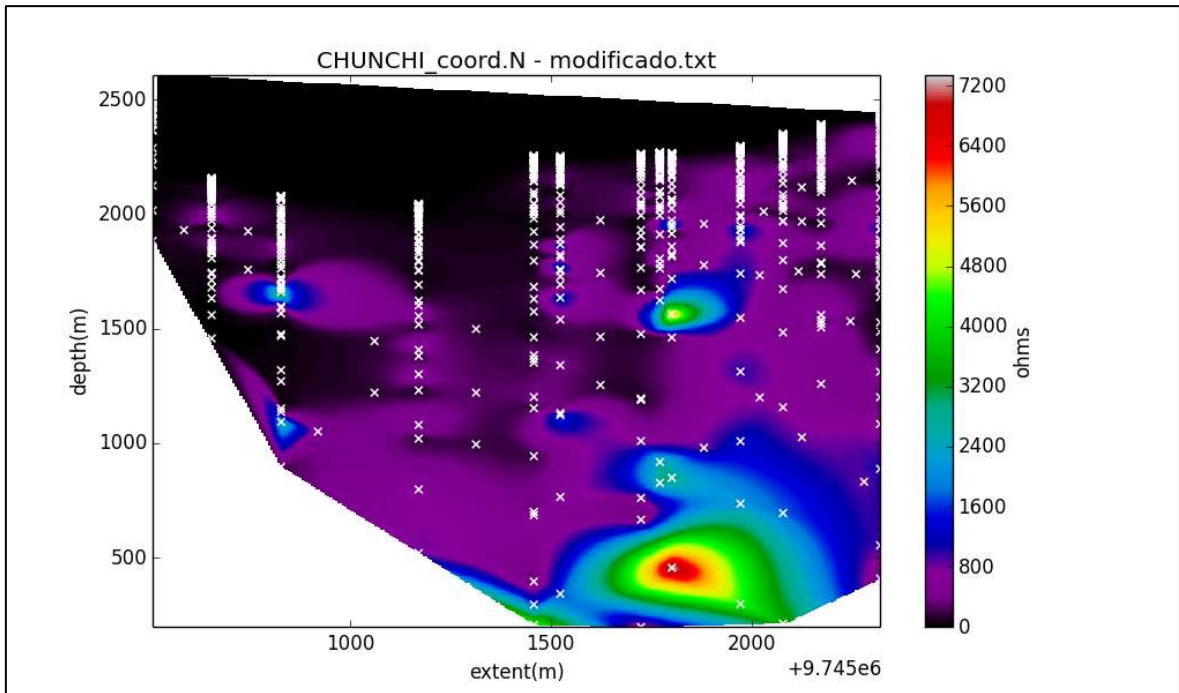
**Figura 5.7** Formato para unificación de datos. Calibración del software Stratagem (rojo), latitud (verde), profundidad (azul), resistividad (morado) e indicador de inicio de cada punto (amarillo).

Finalmente, el archivo de texto fue procesado en el software *Stratagem Resistivity Plotter*, es relevante mencionar que durante este proceso se modificó las escalas de resistividad para mejorar la calidad de la imagen resultante, obteniendo el ploteo de la información ya unificada y dando como resultado una gráfica bidimensional (Figura 5.8).

Con el fin de eliminar las interpolaciones imprecisas y generar una gráfica con detalle óptimo se añadieron puntos al archivo de texto en función de las zonas donde se esperó obtener una mejor definición (Figura 5.9).



**Figura 5.8** Gráfica bidimensional en StratagemResistivityPlotter.



**Figura 5.9** Gráfica bidimensional en StratagemResistivityPlotter con interpolación de puntos.

Para obtener un perfil de elevación, se marcaron los 13 puntos de sondeo Audio Magnetotelúrico en GoogleEarth (Figura 5.10). Por último, se emplearon programas informáticos (Adobe Illustrator 2021 y Adobe Photoshop 2020) para mejorar la calidad de la imagen de la gráfica, así como combinarla con el perfil de elevación.



**Figura 5.10** Ruta de sondeo Audio Magnetotelúrico.

### 5.3. Granulometría de Suelos

El análisis granulométrico se realizó con 25 muestras de sedimentos recolectadas en distintas zonas del área de estudio, incluyendo la zona a lo largo del perfil de resistividades (Figura 5.10).

**Tabla 5.3** Ubicación de muestras recolectadas para análisis granulométrico, UTM WGS84 zona 17S.

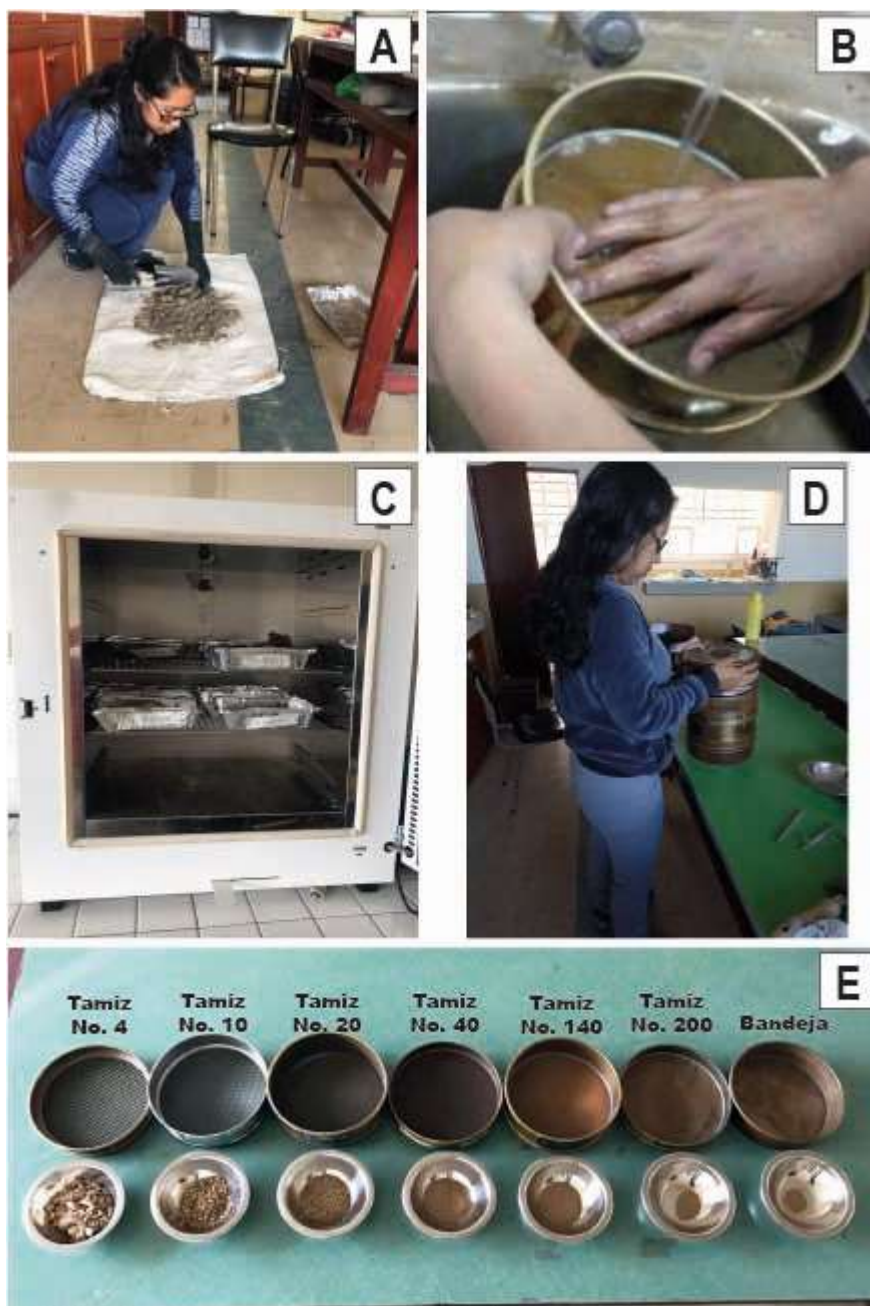
Muestra	Latitud	Longitud	Altura	Observación
CH-GR-01	9747100	727845	1763	Pie del deslizamiento La Armenia (coluvial, presenta laminación)
CH-GR-02	9749183	728209	1578	Río Chanchán
CH-GR-03	9747993	734013	3002	Cabecera Chunchi. Material retrabajado altamente meteorizado con matriz arcillosa. Presenta cuarteamiento

CH-GR-04	9747321	731490	2451	Alteraciones con tonalidades rojizas, violáceas y amarillentas
CH-GR-05	9747180	731445	2403	Aromas a orgánico
CH-GR-06	9746931	731401	2290	Aromas a orgánico
CH-GR-07	9747093	731321	2365	Poco aroma orgánico
CH-GR-08	9747051	730985	2334	Deslizamiento antiguo (cuerpo), coluvial
CH-GR-09	9746474	731346	2268	Coluvial clasto soportado con matriz arenosa
CH-GR-10	9746196	731238	2078	No orgánico
CH-GR-11	9745513	730825	2277	Coluvial, deleznable
CH-GR-12	9745436	730795	2253	No orgánico
CH-GR-13	9746954	729517	1865	Nueva red de drenaje dentro del deslizamiento La Armenia
CH-GR-14	9746933	729678	1889	Nueva red de drenaje dentro del deslizamiento La Armenia
CH-GR-15	9746519	730627	2229	Paredes del deslizamiento. Coluvial del flanco derecho de La Armenia
CH-GR-16	9746957	729506	1879	Pared en deslizamiento, cerca nueva red de drenaje
CH-GR-17	9747044	729505	1884	No orgánico
CH-GR-18	9746313	728733	1900	Vía Huigra

CH-GR-19	9748089	728304	-	Vía Huigra
CH-GR-20	9747246	731356	2429	No orgánico
CH-GR-21	9745737	732224	2121	Coluvial
CH-GR-22	9745461	729369	2040	Vía Huigra
CH-GR-23	9747703	729731	2112	Cabeza de pirámide. Flanco izquierdo de La Armenia
CH-GR-24	9747610	729526	1980	Brecha
CH-GR-25	9746942	730598	2159	Material transportado. Flanco derecho corona

La cantidad recolectada para cada muestra fue de 1 kg aproximadamente. Es relevante mencionar que 3 muestras (CH-GR-02, CH-GR-13 y CH-GR-14) tuvieron que ser previamente secadas antes de continuar con el procedimiento descrito a continuación:

1. Para obtener una fracción representativa de cada muestra, estas fueron debidamente homogeneizadas y cuarteadas (Figura 5.11 A). Se tomó registro tanto del peso del recipiente vacío como del recipiente con la muestra cuarteada. Posteriormente las muestras fueron remojadas en agua durante un día.
2. Se lavó las muestras con el tamiz No. 200 para eliminar el material fino (limos y arcillas) (Figura 5.11 B).
3. El material restante en el tamiz fue puesto a secar en el horno a una temperatura máxima de 300°C por al menos 2 días (Figura 5.11 C).
4. Haciendo uso de los tamices No. 3, 4, 10, 20, 40, 140, 200 y una bandeja, en ese orden, se tamizó cada muestra para separar y pesar el material retenido en cada tamiz (Figura 5.11 D y E).



**Figura 5.11** Procesamiento de muestras para análisis granulométrico. **A)** Homogeneización y Cuarteamiento. **B)** Lavado. **C)** Secado. **D)** Tamizado. **E)** Registro de material retenido en el tamiz.

Los pesos retenidos en cada tamiz fueron registrados en una tabla de clasificación S.U.C.S. y posteriormente estos datos se utilizaron para el cálculo del porcentaje retenido, acumulado y pasante como se muestra en la

Tabla 5.4.

**Tabla 5.4** Análisis granulométrico para la muestra CH-GR-01.

<b>CH-GR-01</b>					
<b>Granulometría</b>					
<b>Norma:</b>	<b>ASTMD 421</b>	<b>ASTMD 422</b>		<b>Peso Inicial (gr):</b>	707.62
<b>Tamiz No.</b>	<b>Abertura Tamiz (Mm)</b>	<b>Peso Retenido (Gr)</b>	<b>Porcentaje Retenido (%)</b>	<b>Porcentaje Acumulado (%)</b>	<b>Porcentaje Pasante (%)</b>
<b>4</b>	4.75	215.64	30.47	30.47	69.53
<b>10</b>	2	50.92	7.20	37.67	62.33
<b>20</b>	0.85	46.22	6.53	44.20	55.80
<b>40</b>	0.425	41.54	5.87	50.07	49.93
<b>140</b>	0.106	40.45	5.72	55.79	44.21
<b>200</b>	0.075	1.72	0.24	56.03	43.97
<b>PASA 200</b>		0.33	43.97	100.00	0.00
	<b>Total</b>	311.13	100.00		

El porcentaje retenido se obtuvo mediante una regla de tres donde se relacionó el peso inicial de la muestra seca con el peso retenido en cada tamiz. Estos resultados permitieron determinar los porcentajes de material grueso (grava + arena) y fino existente en cada muestra.

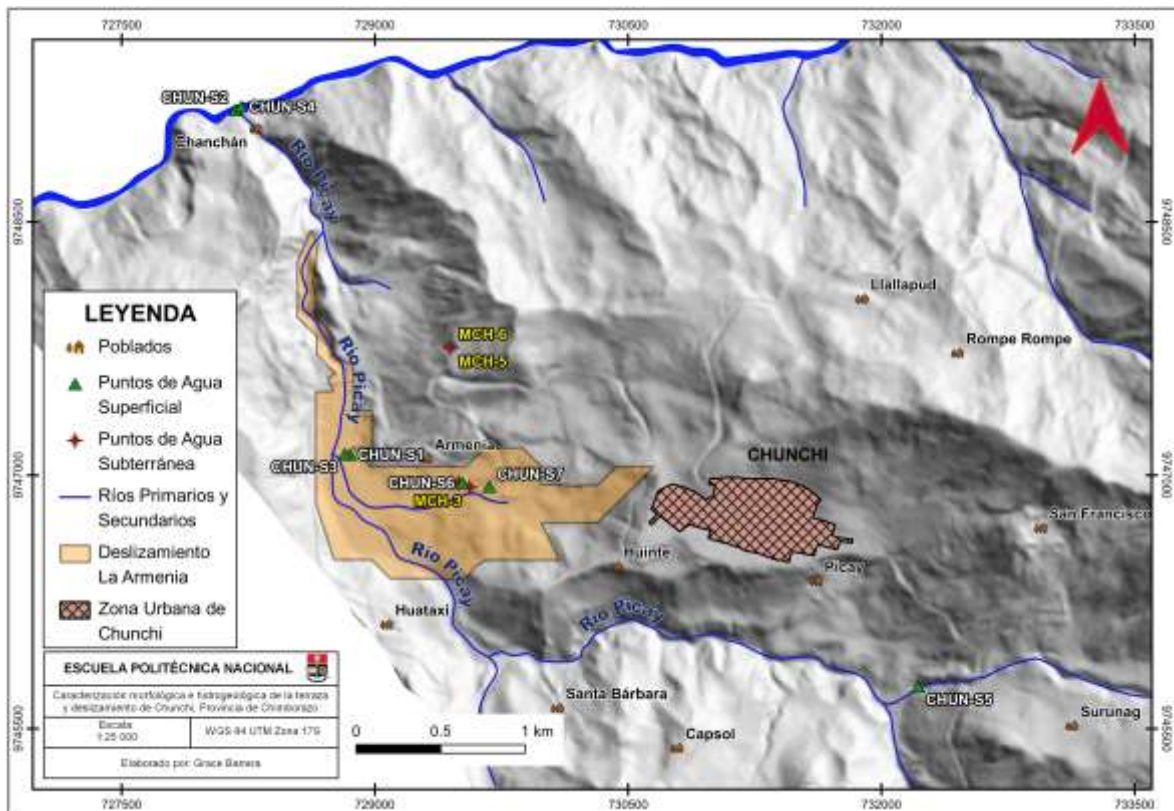
Posteriormente, mediante un trabajo conjunto con la Ing. Alexandra Orozco se obtuvieron los límites líquidos y plásticos, cuyo procedimiento y resultados estarán mejor detallados en su futuro trabajo de investigación. Estos valores permitieron determinar el tipo de clasificación de suelos para cada muestra analizada.



## 6. RESULTADOS

### 6.1. Inventario de Puntos de Agua

El inventario de puntos de agua se basó en el levantamiento de 3 muestras correspondientes a vertientes y 7 muestras de puntos de agua superficial en los ríos Picay, Chanchán, la quebrada Shuruñag y la nueva red de drenaje dentro del deslizamiento (Figura 6.1).



*Figura 6.1* Mapa de ubicación de puntos de agua subterránea y superficial.

#### 6.1.1. Parámetros Físicos del Agua

El análisis de los parámetros físicos del agua registrados *in situ* durante la campaña realizada en campo del 25 al 27 de agosto del 2022 mediante el uso de la sonda multiparamétrica HACH HQ30d indican dos tipos de drenaje (Tabla 6.1). Las muestras CHUN-S4 y CHUN-S5 forman parte de la nueva red drenaje que se ha ido formando en el cuerpo del deslizamiento. Presentan un pH menor a 7 por lo que se trata de aguas ácidas de baja conductividad eléctrica y un potencial de oxidación positivo por lo que se tiene un sistema oxidante. Las muestras CHUN-S1, CHUN-

S2 y CHUN-S3 pertenecen al Río Picay, Río Chanchán y la quebrada Shuruñag, respectivamente. Estas aguas son de carácter alcalino debido a que el valor de pH obtenido fue mayor a 7, con una conductividad eléctrica media. Para estas muestras se tiene valores negativos en el potencial de oxidación, es decir, son sistemas reductores.

**Tabla 6.1** Parámetros físicos del agua tomados en campo.

Muestra	Temperatura del agua (°C)	pH	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	Potencial de Oxidación (mV)
CHUN-S1	21.5	8.34	350	-73.9
CHUN-S2	19.8	8.55	480	-85.5
CHUN-S3	17.9	7.92	496	-49.5
CHUN-S4	22.3	3.94	2.43	175.7
CHUN-S5	21.1	3.77	2.42	183.7

### 6.1.2. Calidad de Agua

La Tabla 6.2 resume los análisis preliminares requeridos para cada muestra de agua (superficial y subterránea) basados en las observaciones realizadas en campo. Las muestras CHUN-S3, CHUN-S4, CHUN-S6 y CHUN-S7 correspondientes a los Ríos Picay, Chanchán y dentro del deslizamiento presentaron una característica significativa durante su recolección la cual fue el olor a cañería sugiriendo una posible contaminación por parte de las aguas servidas.

**Tabla 6.2** Resumen de análisis requeridos para las muestras de agua recolectadas.

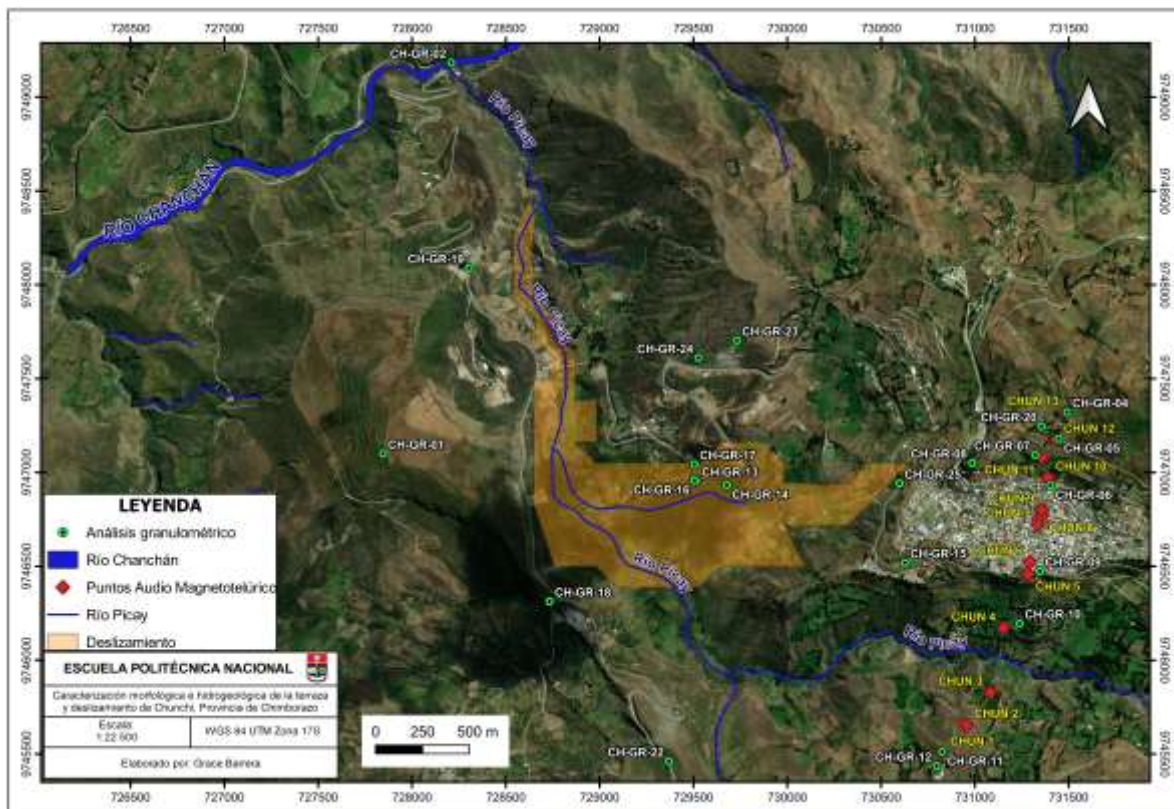
Fecha	Muestra	Tipo de Agua	Parámetros de Medición			
			Parámetros Físico Químicos		Isotopía	
			Cationes	Aniones	Si	No
27/5/2021	MCH-2	Subterránea	Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		X
27/5/2021	MCH-3	Subterránea				X
28/5/2021	MCH-4	Subterránea			X	
3/12/2021	CHUN-S1	Superficial			X	
3/12/2021	CHUN-S2	Superficial			X	
25/8/2022	CHUN-S3	Superficial				X
25/8/2022	CHUN-S4	Superficial			X	
26/8/2022	CHUN-S5	Superficial			X	
27/8/2022	CHUN-S6	Superficial				X
27/8/2022	CHUN-S7	Superficial				X

## 6.2. Contexto Hidrogeológico

### 6.2.1. Granulometría

El análisis de la distribución granulométrica de las 25 muestras de suelo superficial recolectadas en la campaña del 25 al 27 de agosto del 2022 (Figura 6.2) se indica en la Tabla 6.3.

Las muestras comprendidas entre CH-GR-04 y CH-GR-12 fueron tomadas a lo largo del perfil realizado mediante el Audio Magnetotelúrico a excepción de la muestra CH-GR-08. La síntesis del estudio de estos suelos (puntos entre CHUN-1 y CHUN-6) indica que está constituida por gravas, arenas (gruesas y finas) y limos inorgánicos. La zona comprendida entre los puntos CHUN-6 y CHUN-13 está conformada en su mayoría por limos y arcillas, además de arena fina en menor cantidad y muy poca grava. Por lo descrito anteriormente se concluye que la zona de estudio presenta una porosidad primaria.



**Figura 6.2** Mapa de ubicación de puntos con muestras recolectadas para análisis granulométrico, junto con puntos del estudio Audio Magnetotelúrico.

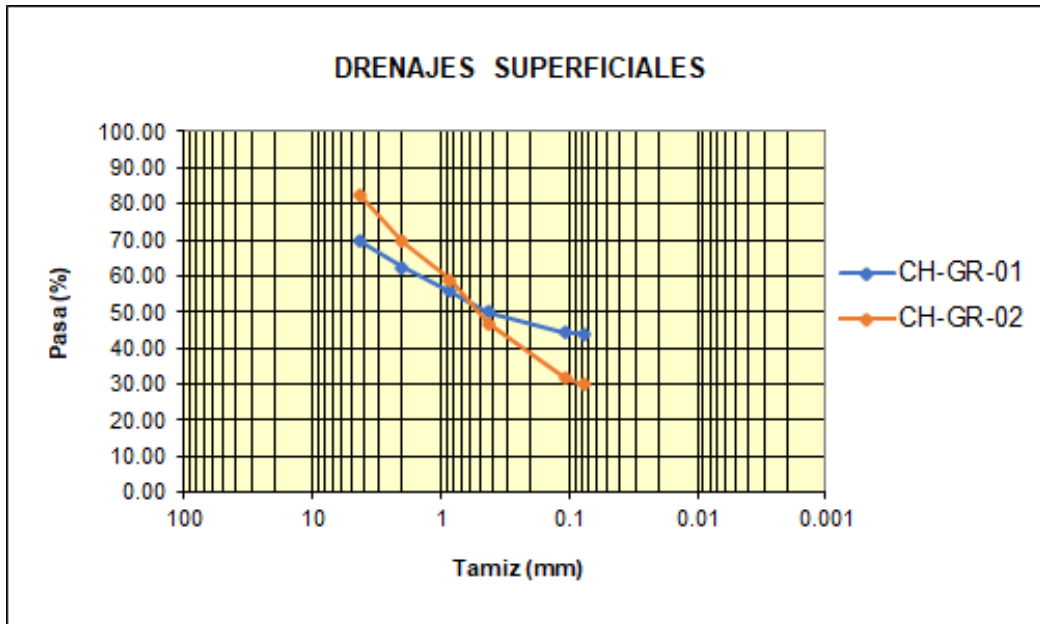
**Tabla 6.3** Resultados de la granulometría realizada a las 25 muestras recolectadas.

Muestra	Composición Litológica	Límites de Atterberg	Tipo de suelo S.U.C.S.	Clasificación	Plasticidad
CH-GR-01	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 56.03% arena + grava</li> <li>• 43.97% finos</li> </ul>	LL=39.03% LP=37.69% IP=1.34%	GM	Gravas con limos y arena	Baja
CH-GR-02	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 70.23% arena + grava</li> <li>• 29.77% finos</li> </ul>	LL=31.08% LP=27.35% IP=3.73%	SM	Arena mal sorteada con limos y grava	Baja
CH-GR-03	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15.50% arena + grava</li> <li>• 84.50% finos</li> </ul>	LL=52.24% LP=44.49% IP=7.75%	MH	Limos inorgánicos con grava y arena	Alta
CH-GR-04	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12.27% arena + grava</li> <li>• 87.73% finos</li> </ul>	LL=24.44% LP=23.66% IP=0.78%	ML	Limos inorgánicos con grava y arenas	Baja
CH-GR-05	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 35.03% arena + grava</li> <li>• 64.97% finos</li> </ul>	LL=45.63% LP=40.02% IP=5.61%	OL	Limos y arcillas orgánicas con grava y arenas	Baja
CH-GR-06	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 31.41% arena + grava</li> <li>• 68.59% finos</li> </ul>	LL=23.98% LP=21.34% IP=2.64%	OL - CL	Limos y arcillas orgánicas con arena y grava	Baja
CH-GR-07	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 36.28% arena + grava</li> <li>• 63.72% finos</li> </ul>	LL=33.58% LP=32.04% IP=1.54%	ML	Limos inorgánicos con arena y grava	Baja
CH-GR-08	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 88.86% arena + grava</li> <li>• 11.14% finos</li> </ul>	LL=20.40% LP=18.92% IP=1.42% Cu=45.93 Cc=4.15 D10=0.08m D30=1.04m D60=3.44m	SM - SP	Arena mal sorteada con limos y grava	Baja
CH-GR-09	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 60.66% arena + grava</li> <li>• 39.34% finos</li> </ul>	LL=33.16% LP=30.71% IP=2.45%	SM	Arena con limos y grava	Baja

CH-GR-10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 45.01% arena + grava</li> <li>• 54.99% finos</li> </ul>	LL=32.17% LP=29.40% IP=2.77%	ML	Limos inorgánicos con grava y arena	Baja
CH-GR-11	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 68.11% arena + grava</li> <li>• 31.89% finos</li> </ul>	LL=25.66% LP=24.03% IP=1.63%	GM	Gravas con limos y arena	Baja
CH-GR-12	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 46.92% arena + grava</li> <li>• 53.08% finos</li> </ul>	LL=43.61% LP=42.93% IP=0.68%	ML	Limos inorgánicos con grava y arena	Baja
CH-GR-13	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 81.85% arena + grava</li> <li>• 18.15% finos</li> </ul>	LL=37.93% LP=30.69% IP=7.24%	GC	Gravas con arcillas y arenas	Baja
CH-GR-14	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 55.15% arena + grava</li> <li>• 44.85% finos</li> </ul>	LL=42.47% LP=36.18% IP=6.29%	SM - SC	Arenas con limos arcillosos y grava	Baja
CH-GR-15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 95.42% arena + grava</li> <li>• 4.58% finos</li> </ul>	Cu=42.89% Cc=2.34% D10=0.319 mm D30=3.20mm D60=13.67 mm	GW	Grava bien sorteada con arenas	Baja
CH-GR-16	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 44.34% arena + grava</li> <li>• 55.66% finos</li> </ul>	LL=36.99% LP=30.29% IP=6.7%	ML	Limos inorgánicos con arena y grava	Baja
CH-GR-17	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 68.26% arena + grava</li> <li>• 31.74% finos</li> </ul>	LL=34.38% LP=29.47% IP=4.91%	GM - GC	Grava con limos arcillosos y arenas	Baja
CH-GR-18	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 49.69% arena + grava</li> <li>• 50.31% finos</li> </ul>	LL=34.67% LP=24.52% IP=10.15%	ML - CL	Limos y arcillas con grava y arena	Baja
CH-GR-19	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 74.87% arena + grava</li> <li>• 25.13% finos</li> </ul>	LL=24.25% LP=23.14% IP=1.11%	GM	Grava con limos y arenas	Baja

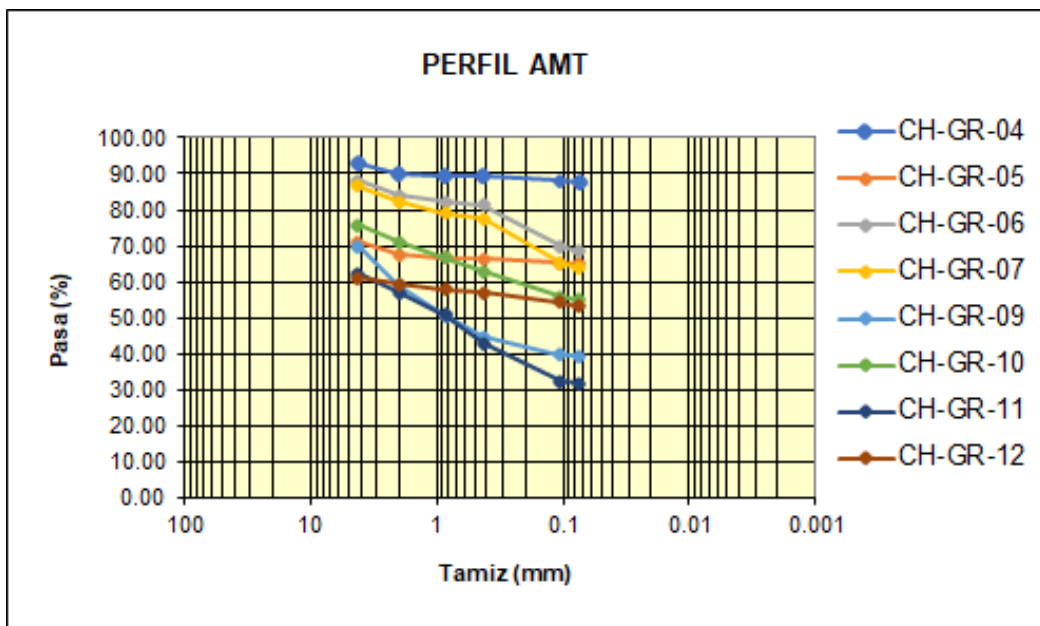
CH-GR-20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 49.64% arena + grava</li> <li>• 50.36% finos</li> </ul>	LL=41.76% LP=35.07% IP=6.69%	ML	Limos inorgánicos con grava y arenas	Baja
CH-GR-21	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 85.72% arena + grava</li> <li>• 14.28% finos</li> </ul>	LL=29.07% LP=27.20% IP=1.87%	GM	Grava limosa con arenas	Baja
CH-GR-22	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 71.46% arena + grava</li> <li>• 28.54% finos</li> </ul>	LL=25.30% LP=20.71% IP=4.59%	GM - GC	Grava con limos arcillosos y arenas	Baja
CH-GR-23	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 48.88% arena + grava</li> <li>• 51.12% finos</li> </ul>	LL=36.85% LP=24.36% IP=12.49%	ML - CL	Limos y arcillas con grava y arena	Baja
CH-GR-24	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 65.19% arena + grava</li> <li>• 34.81% finos</li> </ul>	LL=31.37% LP=24.90% IP=6.47%	SM - SC	Arenas con limos arcillosos y grava	Baja
CH-GR-25	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 81.67% arena + grava</li> <li>• 18.33% finos</li> </ul>	LL=33.24% LP=30.59% IP=2.65%	GM	Gravas con limos y arena	Baja

Las curvas granulométricas correspondientes a zonas con presencia de drenajes superficiales se muestran en la Figura 6.3, donde se observa la distribución de tamaños de grano entre las muestras de suelo del Río Chanchán y el pie del deslizamiento (Río Picay). Las curvas muestran una gradación importante en el tamaño de grano cuya principal diferencia es el porcentaje de grava y arena en cada muestra.



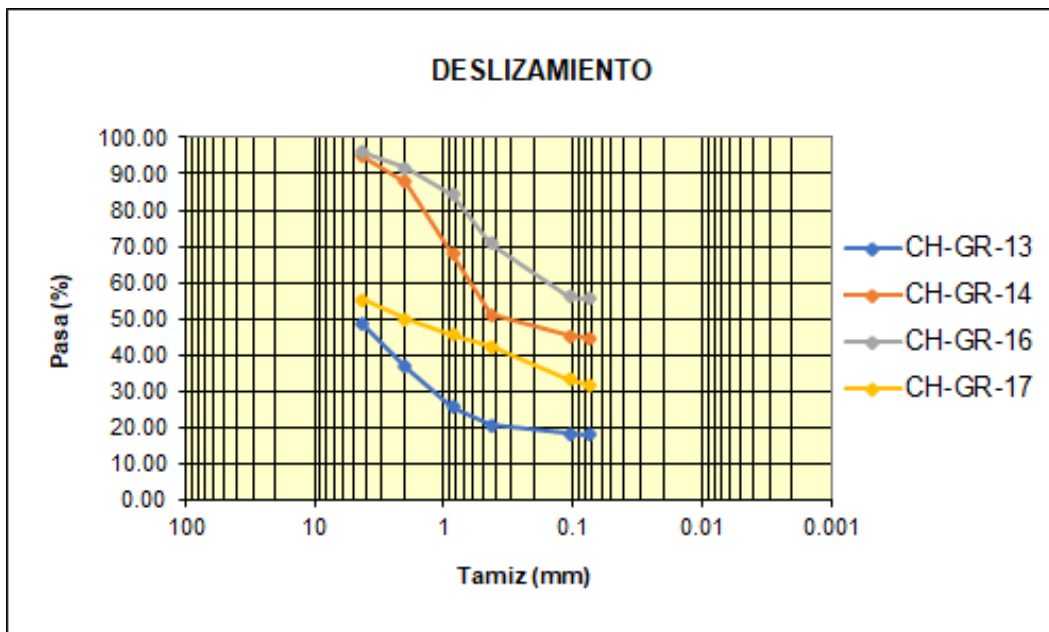
**Figura 6.3** Curva granulométrica para las muestras de suelo recolectadas en zonas de drenajes superficiales.

Las muestras de suelo recolectadas en la ruta donde se realizó el perfil de resistividades que atraviesa la ciudad de Chunchi generaron curvas granulométricas con tendencias similares (Figura 6.4). En general, este grupo presenta una mayor gradación en el tamaño de las partículas del suelo que aquellos pertenecientes a los drenajes principales en la zona. Esta conclusión se basa en la baja inclinación que se observa en las curvas.

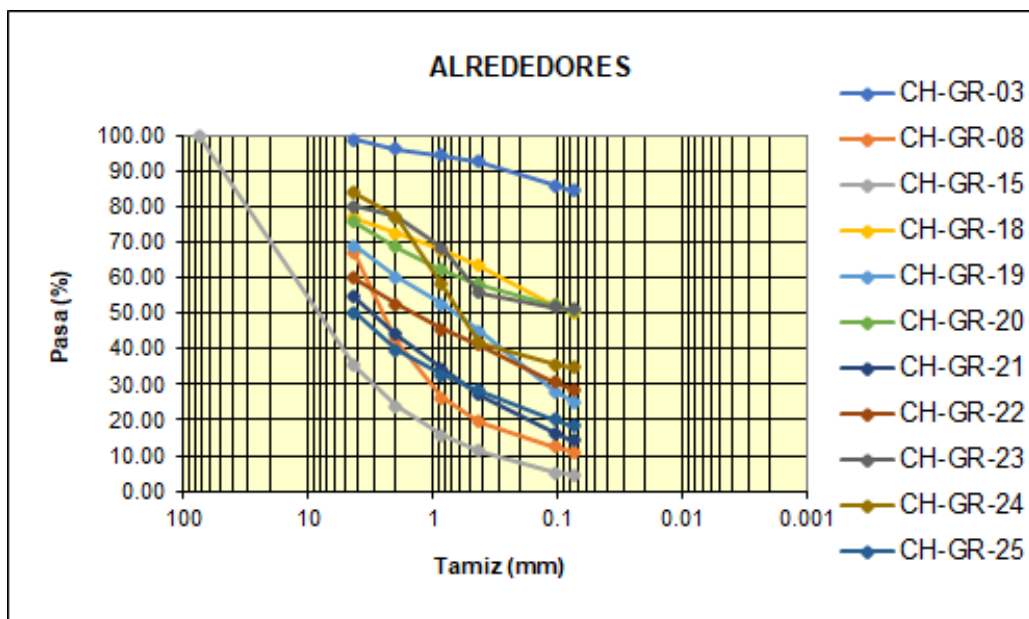


**Figura 6.4** Curva granulométrica de las muestras de suelo recolectadas en la ruta del perfil AMT.

En la Figura 6.5 se observa que las muestras de suelo tomadas en el cuerpo del deslizamiento de La Armenia también evidencian gradación en el tamaño de las partículas. Las curvas con mayor tendencia a la vertical indican una menor variación en el tamaño de grano predominando en este caso la presencia de limos y arenas con arcilla.



**Figura 6.5** Curva granulométrica de las muestras de suelo recolectadas en el cuerpo del deslizamiento.



**Figura 6.6** Curva granulométrica de las muestras de suelo recolectadas en zonas cercanas a las áreas de interés.



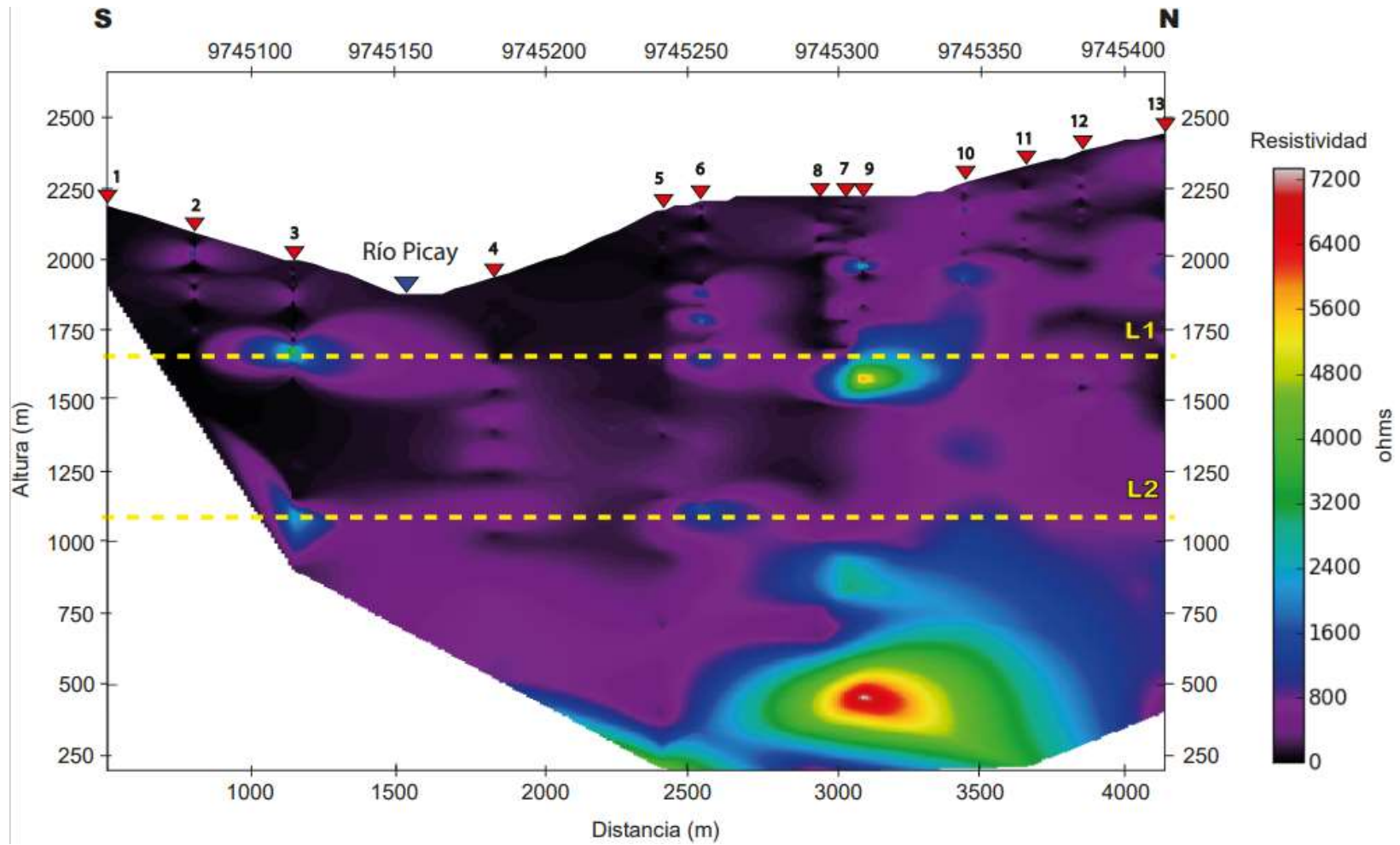
Por último, las muestras de suelo analizadas en los alrededores del deslizamiento, perfil AMT y drenajes superficiales evidencian una tendencia similar en las curvas granulométricas respecto a la variabilidad del tamaño de grano (Figura 6.6). Las muestras CH-GR-03 y CH-GR-15 presentan mayor gradación que el resto del grupo.

### **6.2.2. Audio Magnetoteléurico**

El análisis de los datos magnetoteléuricos levantados en 13 puntos localizados a lo largo la terraza de Chunchi durante la campaña realizada del 26 al 28 de mayo del 2021 permitió determinar un perfil de la distribución de la resistividad eléctrica con respecto a la profundidad (Figura 6.7).

De acuerdo con lo que se observa en la Figura 6.7, existe un predominio de bajas resistividades cuyos valores van desde 0 a 800 ohms entre los puntos del 1 al 6. Esta es la zona más amplia con resistividades de 0 ohms la cual tiene una distancia aproximadamente de 2 km a lo largo del perfil y una profundidad aproximada de 550 m desde la superficie. El segmento que atraviesa el Río Picay de Sur a Norte sugiere la presencia de un acuífero libre. No obstante, también existe la presencia de áreas con la misma resistividad (0 ohms) de menor tamaño que se encuentran dispersas en todo el perfil. Estas se encuentran mayormente distribuidas entre los puntos 6 – 13 y se aluden a la presencia de acuíferos colgados. Adicionalmente, se observan anomalías las cuales reflejan valores de resistividades elevadas entre 1000 – 7000 ohms bajo la zona correspondiente a la terraza de Chunchi.

Otra característica que se observa en el perfil de resistividades (Figura 6.7) es la conexión horizontal entre acuíferos colgados. Así también se evidencia la lineación horizontal de los acuíferos colgados en el nivel L2. Las muestras de agua subterránea (vertientes) tomadas a alturas entre 1858 – 2008 m de altitud forman parte del nivel acuífero superior (L1).



**Figura 6.7** Perfil Audio Magnetotelúrico de resistividades.

Así también existen dos anomalías con resistividades entre 1000 y 7200 ohms, una de ellas ubicada cerca del límite L1 a una altura de 1550 m y una segunda anomalía bajo el límite L2 a una altura de 450 m las cuales nos sugieren la presencia de acuíferos confinados. Conforme a la profundidad a la que se encuentra la segunda anomalía (1800 m desde la superficie) se alude la presencia de un posible basamento hidrogeológico compuesto por los volcánicos de la Formación Puñay?, los volcánicos de la Formación Huigra?, las lavas de la Formación Cisarán? o los coluviales con presencia de rocas silicificadas.

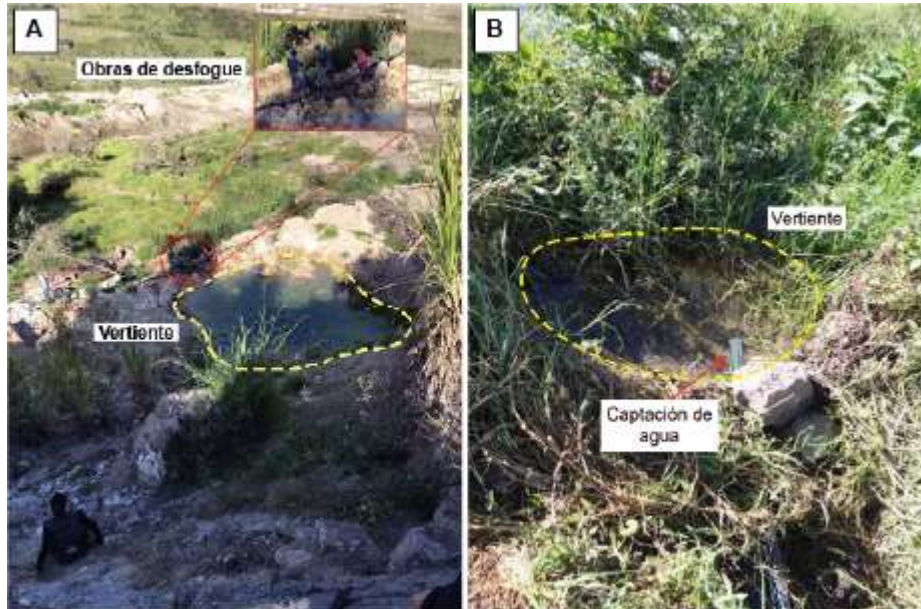


**Figura 6.8** Variación de tonalidades en vegetación en sector de La Armenia.

El perfil atraviesa zonas con evidencia visual de la presencia de acuíferos observadas en campo durante las campañas realizadas. Una de las evidencias presentes en el área de estudio son zonas con vegetación en tonalidades verdes más claras a diferencia de la vegetación que se encuentra a su alrededor, como se muestra en la Figura 6.8.

Otra evidencia de la existencia de diversos niveles acuíferos es la presencia de vertientes las cuales primaban en las zonas cercanas a La Armenia (lugar donde se produjo el deslizamiento). En la Figura 6.9 A se observa una de las vertientes dentro del cuerpo del deslizamiento, que al tener un caudal abundante llegó a formar una pequeña “laguna”. En algunos casos el GAD de Chunchi coordinaba acciones en busca del reencauzamiento de estas vertientes, mientras que, en otros las vertientes son aprovechadas por la población como captaciones de agua

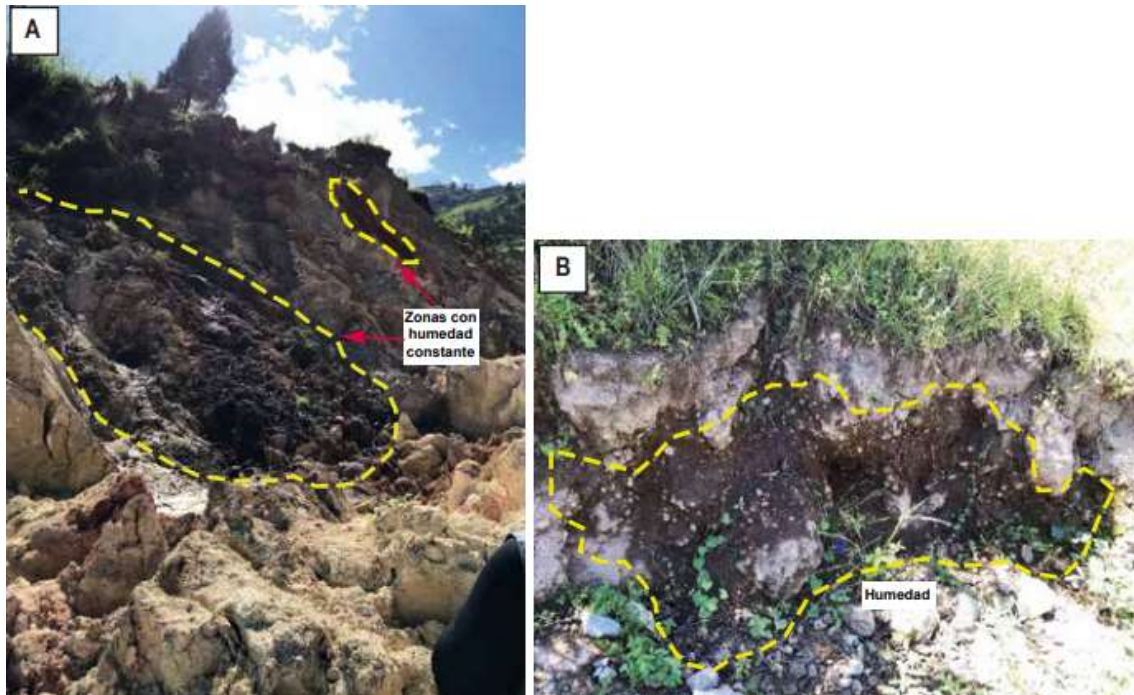
usadas para el riego en actividades agropecuarias (Figura 6.9 B). Además, es relevante mencionar que en al menos dos “lagunas” se observó la presencia de burbujas posiblemente causadas por la salida de CO<sub>2</sub>.



**Figura 6.9** Vertientes en el sector de La Armenia. **A)** Vertiente con salida de burbujas, **B)** Vertiente con captación de agua con manguera de 2 pulgadas.

Una tercera evidencia, son las zonas con humedad constante especialmente visibles en áreas donde la vegetación no estaba presente o quedaron descubiertas a causa del deslizamiento ocurrido el 12 de febrero del 2021 (Figura 6.10).

En el perfil generado junto con los datos de campo y las muestras de suelos se definieron dos niveles de acuíferos, donde el primero (L1) se ubica aproximadamente a 580 m de profundidad y el segundo (L2) a 1166 m de profundidad desde la superficie. Es así como se determina que la zona estudiada presenta acuíferos multinivel. El primer nivel estaría comprendido por un acuífero semiconfinado ubicado hacia el sur del perfil comprendiendo al Río Picay y varios acuíferos colgados ubicados hacia el norte de la ciudad de Chunchi, mientras que el segundo nivel se compone únicamente de acuíferos colgados.

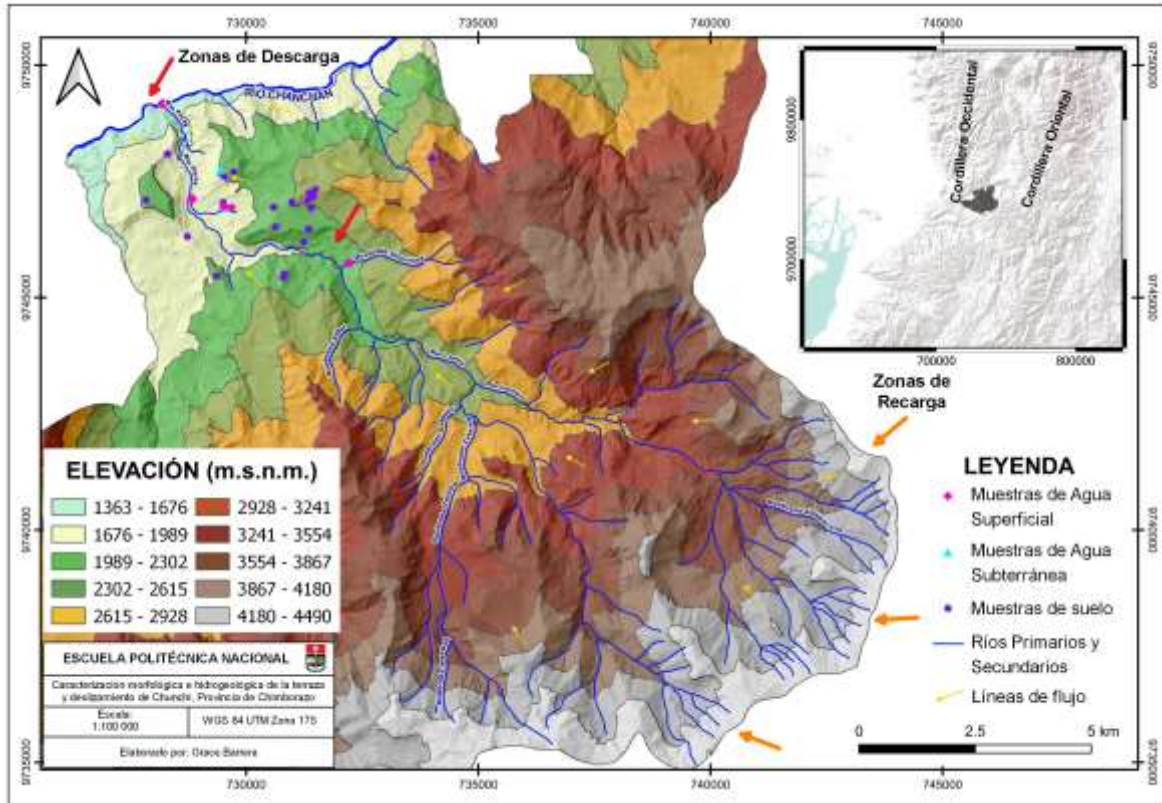


**Figura 6.10** Zonas con humedad. **A)** Humedad en el cuerpo del deslizamiento de La Armenia. **B)** Humedad en zona cercana a la piscina de oxidación.

### 6.3. Modelo Hidrogeológico Conceptual

El movimiento del flujo de aguas superficiales sigue los drenajes de acuerdo con la topografía tanto para la microcuenca del Río Picay como para la microcuenca que comprende el Río Chanchán. Es decir, el agua se mueve desde las zonas más altas hacia zonas de menor altitud (Figura 6.11).

La zona de recarga corresponde a las áreas con elevaciones mayores a 4490 m.s.n.m. ubicadas en los límites fronterizos con la Provincia de Cañar (Figura 6.11). Las zonas de descarga se encuentran a una altura entre 2059 - 1711 m.s.n.m. donde el Río Picay recibe los aportes de ríos secundarios y quebradas (Figura 6.11). Por consiguiente, el Río Chanchán es la zona de descarga final del Río Picay y el restante de drenajes menores; esta zona de descarga se encuentra a una altitud de 1363 m.s.n.m.



**Figura 6.11** Mapa de elevaciones en el área de estudio.

Considerando que la zona de estudio se encuentra en el valle interandino, la Cordillera Real puede ser un contribuyente en la recarga del flujo regional. Localmente, la recarga de los acuíferos provendría de la precipitación tomando en cuenta que Chunchi presenta un clima con temporadas altamente lluviosas entre los meses de enero y abril. Además, es relevante mencionar que otro posible aporte proviene de las zonas de páramo.

El agua subterránea se encuentra en los dominios de la Formación Cisarán, donde a través de la granulometría realizada a lo largo del perfil trabajado con el método geofísico se determinó que los acuíferos presentes se encuentran dentro de un coluvial cuyo material presenta un tamaño de grano desde gravas hasta arcillas. Dado que existe un predominio de material de grano grueso (gravas, arenas gruesas con poca arena fina y limos) hacia el sur del perfil (Figura 6.7) y una tendencia a disminuir el tamaño de grano (limos y arcillas, arena fina y poca grava) hacia el norte del perfil; se concluye que en la zona se tiene la presencia de un acuífero catalogado como semiconfinado con un acuñamiento hacia el norte. La conductividad hidráulica acorde al tipo de material presente en la zona contribuye

a definir que los acuíferos presentan una dirección de flujo de norte a sur formando parte de la recarga del Río Picay.

Es importante señalar que el perfil realizado donde se muestra la variación de resistividades de la zona contribuyó en la caracterización de dos niveles de acuíferos. El primero descrito anteriormente como un acuífero semiconfinado (L1) y el segundo conformado por varios acuíferos colgados (L2) (Figura 6.7).

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. Conclusiones

- Los resultados del análisis de parámetros físicos del agua en la zona del deslizamiento evidencian la presencia de aguas ácidas con pH menores a 7. El agua superficial recolectada especialmente en las zonas del deslizamiento y los Ríos Picay y Chanchán presentaron mal olor (tipo cañería) y de aspecto turbio por lo que puede existir una contaminación doméstica. Este tipo de contaminación no solo podría estar afectando a las aguas superficiales sino también a las aguas subterráneas como consecuencia de la infiltración. De este modo el área agropecuaria se vería afectada como consecuencia del aprovechamiento del agua subterránea a través de captaciones dirigidas al riego de cultivos y el ganado.
- La información recabada sobre la Geología, estudios geofísicos realizados anteriormente y datos hidrogeológicos de la terraza de Chunchi lleva a la conclusión de que el área de estudio forma parte de una gran acumulación de fenómenos de remoción en masa. En el área estudiada hay un predominio de zonas con tobas que presentan distinto grado de meteorización, tobas andesíticas, brechas con clastos de brechas, carbonatados e ígneos. Los depósitos cuaternarios (coluviales) también fueron parte de la zona de estudio, cuyos depósitos conformarían el material que comprenden los acuíferos. Así mismo, como resumen de la información recopilada de la zona de estudio otras características relevantes son su clima de páramo, alta capacidad de retención de humedad y la variedad de alteraciones en la roca.
- Las evidencias observadas en campo con respecto al cambio de tonalidad en la vegetación, zonas con humedad continua y las 3 vertientes localizadas en y cerca al deslizamiento ocurrido el 21 de febrero del 2021 contribuyen a la aseveración de que la zona se encuentra altamente saturada de agua.
- El análisis granulométrico realizado a todas las muestras tomadas en distintas zonas del área de estudio indica un predominio de material grueso y fino en la zona donde se encuentra el acuífero semiconfinado. Así también, se determina que el material que prevalece dentro y en los alrededores al



área donde ocurrió el deslizamiento se compone de material con tamaño de grano fino y arcilloso. Lo cual contribuye en la retención de agua en una zona bastante deleznable y con altos grados de alteración en la roca.

- El perfil realizado con el método geofísico Audio Magnetotelúrico en dirección S - N que cruza la ciudad de Chunchi contribuye en determinación de la presencia de acuíferos multinivel; se definió un primer nivel L1 (1667 m) con un acuífero semiconfinado de gran tamaño el cual presenta un acuñamiento hacia el norte de la ciudad. Los acuíferos colgados a lo largo de este nivel con una aparente conexión horizontal son los responsables de la recarga del Río Picay ya que la dirección de flujo va desde la zona Norte del perfil hacia el Sur como consecuencia de la variación de la conductividad hidráulica. Existe un segundo nivel L2 (1083 m), que se encuentra a una profundidad mayor que el primero con presencia de acuíferos colgados distribuidos a lo largo de todo el perfil.

Las anomalías con variaciones de resistividades de 1000 a 7200 ohms serían el producto de la presencia de acuíferos confinados. En función de la profundidad a la que se encuentra la anomalía más grande, ubicada bajo el nivel L2, se la cataloga como un posible basamento hidrogeológico. Dicho basamento está conformado por los volcánicos de Huigra?, los volcánicos de la Formación Puñay? o las lavas de la Formación Cisarán?. Es relevante mencionar que en la zona a lo largo del perfil se encontró presencia de rocas silicificadas (posibles tobas silicificadas).

La presión en el acuífero confinado ubicado a una altitud aproximada de 500 m.s.n.m. estaría provocando que el agua almacenada suba por artesianismo alimentando a los acuíferos superiores y en consecuencia también sería la causa de los deslizamientos producidos.

La gran capacidad de almacenamiento de los acuíferos colgados y su baja capacidad de drenaje facilitan la saturación de agua en la zona que en conjunto con el material deleznable son factores condicionantes para un deslizamiento como el ocurrido el 12 de febrero del 2021.

## 7.2. Recomendaciones

- Rehabilitar la piscina de oxidación anteriormente usada para el almacenamiento y posterior tratamiento de las aguas servidas. Con esto se espera reducir el impacto que las aguas pueden generar a futuro en el ambiente, así como en el área agropecuaria y consecuentemente en la economía del área de estudio. Se sugiere realizar los análisis de isótopos estables oxígeno 18 y deuterio a las muestras recolectadas en las 3 campañas con el fin de obtener claridad sobre la fuente del agua en la zona de estudio. Además, se recomienda realizar análisis de cationes y aniones al agua recolectada para determinar el grado de contaminación con mayor detalle.
- Se propone realizar un análisis empleando el instrumento TerraSpec para determinar especies minerales y alteraciones del suelo y la roca. Por consiguiente, esto permitirá realizar correlaciones de afloramientos similares a donde se produjo el deslizamiento del 21 de febrero del 2021.
- Realizar un estudio mediante el cual se determine la posibilidad de explotación de los acuíferos para beneficio de la población y mitigar la saturación de agua en el suelo. De esta manera se pretende disminuir el riesgo de futuros fenómenos de remoción en masa.
- Se requiere complementar el análisis granulométrico con un estudio de mecánica de suelos dado el antecedente que la zona se compone por un conjunto de deslizamientos antiguos a pesar de que la población de Chunchi se encuentra levantada sobre una terraza compuesta por rocas silicificadas.
- Por lo que se ha observado en el perfil de resistividades y las observaciones en campo durante las 3 campañas, toda la zona de estudio se compone de acuíferos colgados. Se recomienda realizar otros perfiles de resistividades mediante el mismo método geofísico en otras direcciones con el fin de esclarecer las dimensiones y ubicación de los acuíferos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Andagoya, E., Alquina, D., Reina, J. C., y Coronel, O. (2021). *INFORME DE ASISTENCIA TÉCNICA SNGRE – GADM CANTÓN CHUNCHI – ZONAS INESTABLES EN LOS SECTORES LA ARMENIA Y CULLPA CHUNCHI – PROVINCIA CHIMBORAZO* (p. 30) [Técnico]. Instituto de Investigación Geológico y Energético.
- Appelo, C. A. J., y Postma, D. (2005). *GEOCHEMISTRY, GROUNDWATER AND POLLUTION* (Second). A.A. BALKEMA PUBLISHERS, 647.
- Arzate, J., Corbo, F., Quirola, F., Otiniano, J., y Araguás, L. (2011). Sondeos magnetotélúricos de banda ancha (BMT) para el estudio del acuífero transfronterizo de Zarumilla, Ecuador-Perú. *Revista Geofísica*, 63, 28.
- Aspden, J. A., y Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205(1-3), 187-204. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90426-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90426-7)
- Assouline, S. (2013). Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, 49(4), 1755-1772. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20155>
- Brassington, R. (2017). *Field Hydrogeology*. John Wiley y Sons. 322. Recuperado de: <https://books.google.es/books?id=nR9IDgAAQBAJ>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., y Cisneros, F. (2022). *HIDROLOGÍA DEL PÁRAMO ANDINO: PROPIEDADES, IMPORTANCIA Y VULNERABILIDAD*.
- Chouteau, M., Krivochieva, S., Castillo, R. R., Moran, T. G., y Jouanne, V. (1994). Study of the Santa Catarina aquifer system (Mexico Basin) using magnetotelluric soundings. *Journal of Applied Geophysics*, 31(1-4), 85-106. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90049-3](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90049-3)
- Chow, V. T., Maidment, D., y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada* (Martha Edna Suarez R.). Editorial NOMOS S. A. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=librosslp.xisymethod=postyformato=2ycantidad=1yexpresion=mfn=002681>
- Collischonn, W., y Tassi, R. (2008). *Introduzindo hidrologia*. 152.
- Coordinación Zonal de Gestión de Riesgos 003. (2021). *INFORME DE ESTIMACIÓN DE RIESGO ACEPTABLE* (Técnico SNGRE-IASR-03-2021-010; p. 19). Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias.
- Custodio, E., y Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea* (Segunda-Tomo I). Ediciones Omega S.A. 1192.
- Davis, S., y De Wiest, R. (1966). *Hydrogeology*. New York, Wiley. Recuperado de: <http://archive.org/details/hydrogeology0000davi>

Dunkley, P., y Gaibor, A. (1997). *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 2° y 3° S, escala 1:200.000* [Map].

Duque, P. (2000). *Breve Léxico Estratigráfico del Ecuador* (1era ed.). UCP PRODEMİNCA. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/202463651/Lexico-Del-Ecuador>

Egüez, A., Dugas, F., y Bonhomme, M. (1992). Las unidades Huigra y Alausi en la evolución geodinámica del valle interandino del Ecuador. *Boletín Geológico Ecuatoriano*, 3(1), 47-55.

Egüez, A., Gaona, M., y Albán, A. (2017). *Mapa Geológico de la República del Ecuador* [Map].

Feininger, T., y Seguin, M. K. (1983). Simple Bouguer gravity anomaly field and the inferred crustal structure of continental Ecuador. *Geology*, 11(1), 40. Recuperado de: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1983\)11<40:SBGAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1983)11<40:SBGAF>2.0.CO;2)

Fetter, C. (2000). *Applied Hydrogeology* (4th ed.). Prentice-Hall, Inc. 615.

Fibras y Normas de Colombia S.A.S. (2018). ESCORRENTIA: DEFINICION, TIPOS Y FACTORES QUE LA GENERAN \* TÉRMINOS Y DEFINICIONES. *TÉRMINOS Y DEFINICIONES*. Recuperado de: <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/escorrentia-definicion-tipos-y-factores-que-la-generan/>

Freeze, A., y Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. 624.

GAD Municipal Chunchi. (2020). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2019-2023*.

Gailler, A., Charvis, P., y Flueh, E. R. (2007). Segmentation of the Nazca and South American plates along the Ecuador subduction zone from wide angle seismic profiles. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3-4), 444-464. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.045>

Gámez, W. (2009). *Texto Básico de Hidrología* (1era ed.). 152. Recuperado de: <https://repositorio.una.edu.ni/2464/1/np10g192.pdf>

Giroux, B., Chouteau, M., Descloîtres, M., y Ritz, M. (1997). Use of the magnetotelluric method in the study of the deep Maestrichtian aquifer in Senegal. *Journal of Applied Geophysics*, 38, 77-96.

IDEAM. (2014). *MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA*. Agua. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>

IEE, y MAGAP. (2013a). *PROYECTO: GENERACIÓN DE GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL ESCALA 1: 25 000—EVALUACIÓN DE LAS TIERRAS POR SU CAPACIDAD DE USO* (p. 58) [Memoria Técnica].

IEE, y MAGAP. (2013b). *PROYECTO: GENERACIÓN DE GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL. ESCALA 1: 25 000— GEOMORFOLOGÍA* (p. 57) [Memoria Técnica].

IEE, y MAGAP. (2013c). *PROYECTO: GENERACIÓN DE GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL ESCALA 1: 25000— SISTEMAS PRODUCTIVOS* (p. 80) [Memoria Técnica].

IEE, y MAGAP. (2013d). *PROYECTO: GENERACIÓN DE GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL ESCALA 1:25.000— CLIMA E HIDROLOGÍA* (p. 26) [Memoria Técnica].

IGM. (2013). *Carta Topográfica de Alausí* [Map]. Recuperado de: <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>

INIGEMM. (2015). *Hoja Geológica de Alausí* [Map].

Jaillard, E., Lapierre, H., Ordoñez, M., Álava, J. T., Amórtegui, A., y Vanmelle, J. (2009). Accreted oceanic terranes in Ecuador: Southern edge of the Caribbean Plate? *Geological Society, London, Special Publications*, 328(1), 469-485. Recuperado de: <https://doi.org/10.1144/SP328.19>

Kennerley, J. (1980). *Outline of the Geology of Ecuador*. Recuperado de: [http://archive.org/details/outline-geology-ecuador-kennerley-ingle-s\\_20201229](http://archive.org/details/outline-geology-ecuador-kennerley-ingle-s_20201229)

Lavenu, A., Winter, T., y Dávila, F. (1995). A Pliocene-Quaternary compressional basin in the Interandean Depression, Central Ecuador. *Geophysical Journal International*, 121(1), 279-300. Recuperado de: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03527.x>

Li, J., Wang, W., Cheng, D., Li, Y., Wu, P., y Huang, X. (2021). Hydrogeological structure modelling based on an integrated approach using multi-source data. *Journal of Hydrology*, 600, 126435. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126435>

Linsley, P. (1977). *Hidrología para Ingenieros*. McGRAW-HILL LATINOAMERICANA, S.A. 398.

Litherland, M., Aspden, J. A., y Jemielita, R. (1994). *THE METAMORPHIC BELTS OF ECUADOR*. Recuperado de: <http://archive.org/details/1994-litherland-the-metamorphic-belts-of-ecuador-sp>

MAGAP-IEE. (2013). *Memoria Técnica: "Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional Escala 1: 25000"* (p. 80) [Memoria Técnica].

Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico—“Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico”* (Primera). Recuperado de: [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrolgico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrolgico.pdf)

Pedraza, A., Martos-Rosillo, S., Galindo-Zaldívar, J., Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Martín-Rodríguez, J. F., y Zúñiga-López, M. I. (2016). Unravelling aquifer-wetland interaction using CSAMT and gravity methods: The Mollina-Camorra aquifer and the Fuente de Piedra playa -lake, southern Spain. *Journal of Applied Geophysics*, 129, 17-27. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.018>

Piña, P. (2014). *Aplicación del Método Magnetotelúrico a la Caracterización de Reservorios: Anticlinal de El Hito (Cuenca) y Sistema Geotérmico de Tenerife*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Barcelona. 257.

Pratt, W., Duque, P., y Ponce, M. (2005). An autochthonous geological model for the eastern Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 251-278. Recuperado de: <https://doi.org/doi:10.1016/j.tecto.2004.12.025>

Reyes, P. (2006). *El complejo ofiolítico Peltetec y su relación con las unidades metamórficas jurásicas de la Cordillera Real*. [Tesis de Grado]. Escuela Politécnica Nacional.

Segeer, C., y Villodas, R. (2006). Unidad 5: Las Precipitaciones. En *Hidrología I* (p. 27). Recuperado de: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48599068/hidro1-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1643675728&Signature=cIcaHhwUUw3L5WskaOlkpcGSjKuaedOMSnhDWLOC0SvsIWVOCAdoYTd7y5jYSBhJpdQDBSXdcydjGw1PNtBMmr450z85yktxCCjUXCGvAlfmTpklt-9QRjwEvyYppUwXJwDgfun~Rrqq8BZoZ-Pr6abx4s8RFOjgYu~gkg9061PAjtZJISQbQTMtxmLlyXO1DRfliuGiU6r5wU6SE5BR1XtwikdEAl-1aL0TJBGojHCTrAUjffWdq3kOeLKLGYmelHWojH~7lpWBoxhZKJYxKlwGsDjaQLhZ-E0fhy3XH~geSKPeyJ3FLmyKWXYZC4gyV3N4Yi7yPCYwwB-Yy7vZw\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48599068/hidro1-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1643675728&Signature=cIcaHhwUUw3L5WskaOlkpcGSjKuaedOMSnhDWLOC0SvsIWVOCAdoYTd7y5jYSBhJpdQDBSXdcydjGw1PNtBMmr450z85yktxCCjUXCGvAlfmTpklt-9QRjwEvyYppUwXJwDgfun~Rrqq8BZoZ-Pr6abx4s8RFOjgYu~gkg9061PAjtZJISQbQTMtxmLlyXO1DRfliuGiU6r5wU6SE5BR1XtwikdEAl-1aL0TJBGojHCTrAUjffWdq3kOeLKLGYmelHWojH~7lpWBoxhZKJYxKlwGsDjaQLhZ-E0fhy3XH~geSKPeyJ3FLmyKWXYZC4gyV3N4Yi7yPCYwwB-Yy7vZw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)

Spikings, R. A., Winkler, W., Seward, D., y Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 186(1), 57-73. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00225-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00225-4)

Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos. (2021a). *Informe técnico del movimiento en masa en el sector La Armenia del Cantón Chunchi, Provincia Chimborazo* (Técnico SNGRE-IASR-08-2021-020; p. 22). Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias.

Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos. (2021b). *Interpretación de Tomografías Eléctricas de los Sectores Susceptibles debido al Deslizamiento de La Armenia, Chunchi, Chimborazo*. (Técnico SNGRE-IASR-08-2021-029; p. 24). Dirección de Análisis de Riesgos.

Šumanovac, F., y Orešković, J. (2018). Exploration of buried carbonate aquifers by the inverse and forward modelling of the Controlled Source Audio-Magnetotelluric

data. *Journal of Applied Geophysics*, 153, 47-63. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.04.007>

Thornthwaite, C. W. (1948). *An Approach toward a Rational Classification of Climate*. 38(1), 55-94. Recuperado de: <https://doi.org/10.2307/210739>

Tibaldi, A., y Ferrari, L. (1992). Latest Pleistocene-Holocene tectonics of the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 205(1-3), 109-125. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90421-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90421-2)

Todd, D., y Mays, L. (2005). *Groundwater Hydrology* (Third). John Wiley and Sons, Inc. 652.

Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R. A., Luzieux, L., Heller, F., y Bussy, F. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. En S. M. Kay, V. A. Ramos, y W. R. Dickinson, *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision* (pp. 197-216). Geological Society of America. Recuperado de: [https://doi.org/10.1130/2009.1204\(09\)](https://doi.org/10.1130/2009.1204(09))

Vélez, V., Ortiz, C., y Vargas, C. (2011). *Las Aguas Subterráneas: Un Enfoque Práctico* (Instituto Colombiano de Geología y Minería). 58. Recuperado de: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/Aguas-subterranas-enfoque-practico.PDF>.

Waller, R. M. (1982). *Ground Water and the Rural Homeowner*. 38. Recuperado de: [https://pubs.usgs.gov/gip/gw\\_ruralhomeowner/pdf/gw\\_ruralhomeowner.pdf](https://pubs.usgs.gov/gip/gw_ruralhomeowner/pdf/gw_ruralhomeowner.pdf)

Werner, J. (1996). *Introducción a la Hidrogeología* (Pimera). Centro de Apoyo y Servicios Académicos, UANL. 101.

Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, St., y Egüez, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 5-19. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.06.006>

Xu, Z., Li, G., Xin, H., Tang, J., y Lv, F. (2020). Hydrogeological prospecting in the Da Qaidam area of the Qaidam Basin using the audio-frequency magnetotelluric method. *Journal of Applied Geophysics*, 182, 34. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104179>

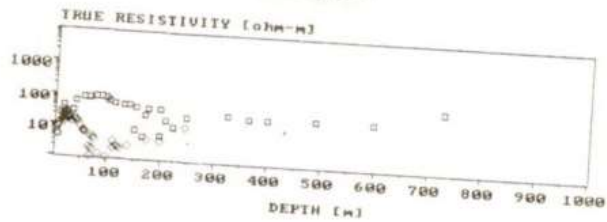
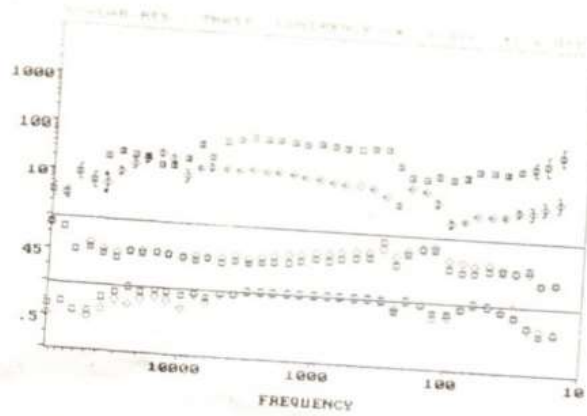
## 9. ANEXOS

### ANEXO I. Fichas Técnicas Audio Magnetotelúrico

Chan 1  
X → 120730022  
Y → 9745516  
h: 2613m  
Cementerio Capul  
09:08 am  
27/may/2021

EMULUM (COPY 2.2.10)  
Copyright (C)  
EMI 1998  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
chan.001 60Hz  
T: 0 0  
R: 826 5507  
X: 8.00 Y: 8.00  
\*PRINTER\* THERMAL

1	OPTIONS
2	GAIN SETTING
3	ACQUISITION
4	DATA ANALYSIS
5	<b>1-D ANALYSIS</b>
6	2-D ANALYSIS
7	CHANGE MODE
8	EXIT





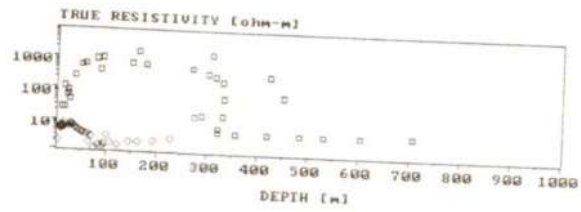
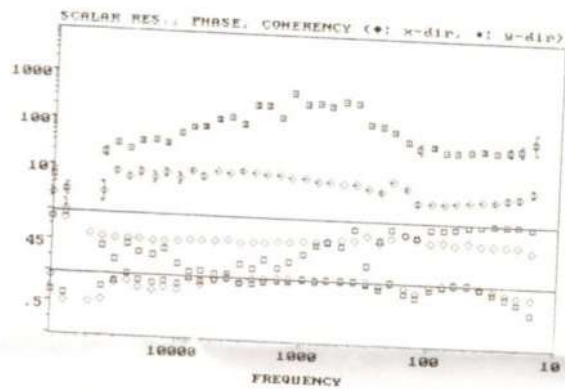
Church 2  
 0730955  
 9745654  
 h = 2164 m.

27/05/2021  
 10:20 am.

```

  IMAGEM (ver.2.21h)
  Copyright (C)
  EMI 1998
  HHHHHHHHHHHHHHHHHHH
  chun.002 60Hz
  T: 0 0
  R: 954 5654
  X: 8.00 Y: 8.00
  *PRINTER* THERMAL

  1  OPTIONS
  2  GAIN SETTING
  3  ACQUISITION
  4  DATA ANALYSIS
  5  1-D ANALYSIS
  6  2-D ANALYSIS
  7  CHANGE MODE
  8  EXIT
  
```



Church 3

0731082

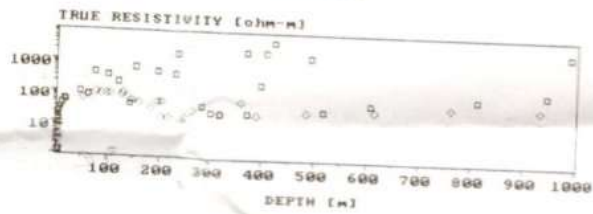
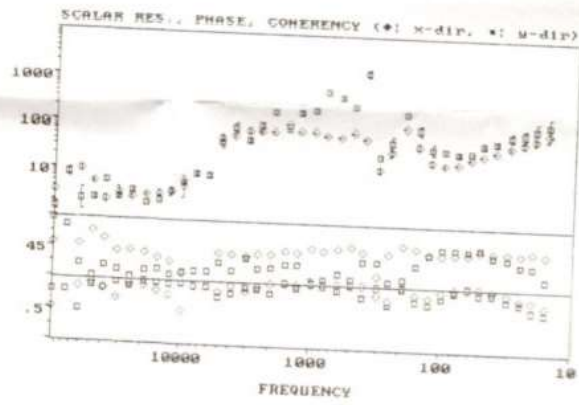
9745826

2085 m

11:24 am

```
IMAGEM (ver.2.21h)
Copyright (C)
EMI 1998
#####
chun.003 60Hz
T: 0 0
R: 1082 5827
X: 16.00 Y: 16.00
*PRINTER* THERMAL

1  OPTIONS
2  GAIN SETTING
3  ACQUISITION
4  DATA ANALYSIS
5  1-D ANALYSIS
6  2-D ANALYSIS
7  CHANGE MODE
8  EXIT
```



Church 4

170731150

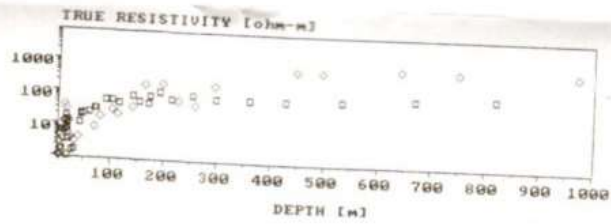
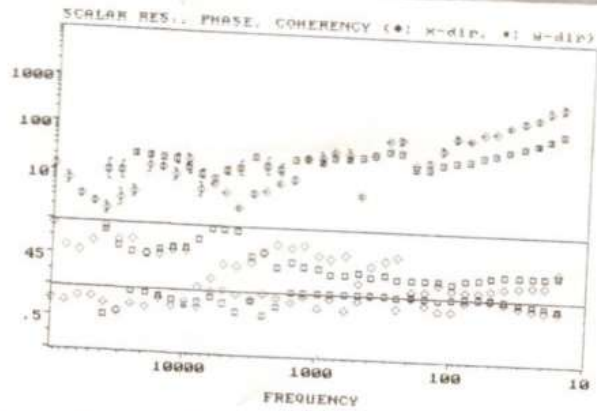
9746169

2049

13:10

```
IMAGE (ver. 2.21h)
Copyright (C)
EMI 1998
#####
Chun.004 60Hz
T: 0 0
R: 1151 6170
X: 20.00 Y: 20.00
*PRINTER* THERMAL

1  OPTIONS
2  GAIN SETTING
3  ACQUISITION
4  DATA ANALYSIS
5  1-D ANALYSIS
6  2-D ANALYSIS
7  CHANGE MODE
8  EXIT
```



Church

170731202

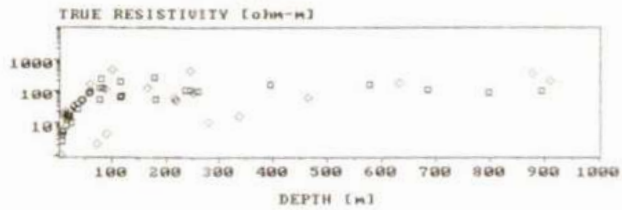
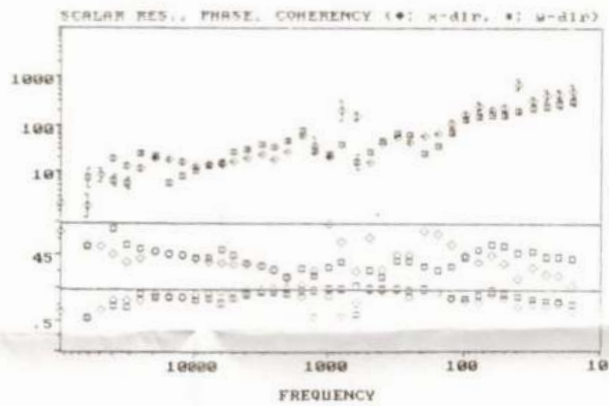
9746457

2260 m

15:40

```
IMAGER (ver. 2.21b)
Copyright (C)
EMI 1998
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
chun.005 60Hz
T: 0 0
R: 1282 6457
X: 16.00 Y: 16.00
*PRINTER* THERMAL
```

- 1 OPTIONS
- 2 GAIN SETTING
- 3 **ACQUISITION**
- 4 DATA ANALYSIS
- 5 1-D ANALYSIS
- 6 2-D ANALYSIS
- 7 CHANGE MODE
- 8 EXIT



Church 6

170731292

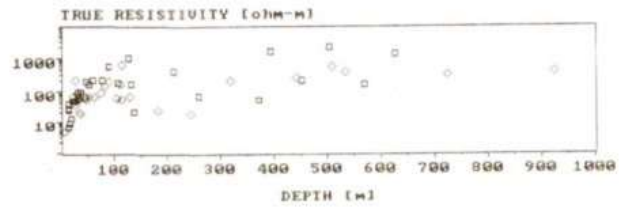
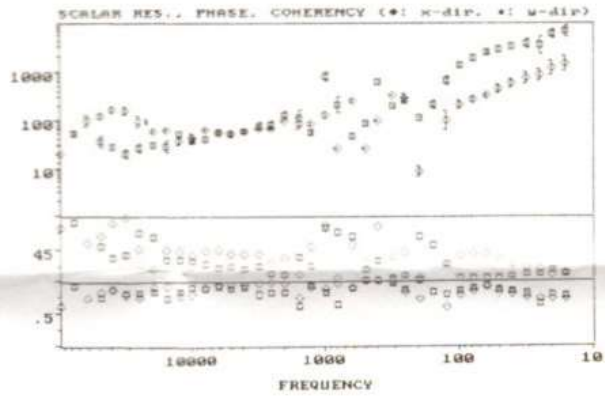
9746523

2262 m.

16:42.

```
IMAGEM (ver.2.21b)
Copyright (C)
EMI 1998
HHHHHHHHHHHHHHHHHHHH
chun.006 60Hz
T: 0 0
R: 1292 6523
X: 10.00 Y: 10.00
*PRINTER* THERMAL

1  OPTIONS
2  GAIN SETTING
3  ACQUISITION
4  DATA ANALYSIS
5  1-D ANALYSIS
6  2-D ANALYSIS
7  CHANGE MODE
8  EXIT
```



Church 7

170731334

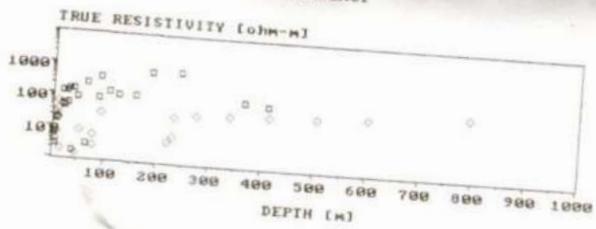
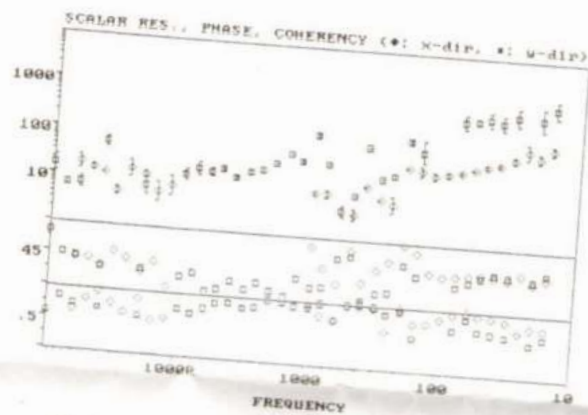
9746724

2262m

08:40

IMAGEM (ver.2.21h)  
Copyright (C)  
EMI 1998  
#####  
chun.007 60Hz  
T: 0 0  
R: 1334 6724  
X: 10.00 Y: 10.00  
\*PRINTER= THERMAL

- 1 OPTIONS
- 2 GAIN SETTING
- 3 ACQUISITION
- 4 DATA ANALYSIS
- 5 1-D ANALYSIS
- 6 2-D ANALYSIS
- 7 CHANGE MODE
- 8 EXIT

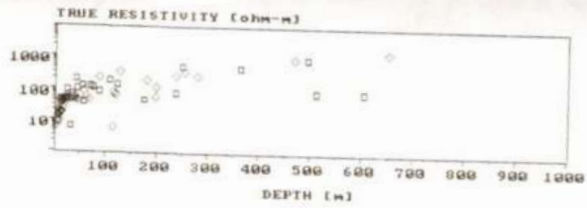
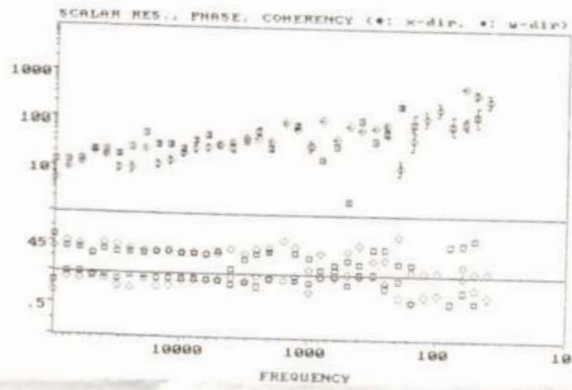


Church 8  
 170731356  
 9746760  
 2267 m.

9:25 am.

IMAGEM (ver. 2.21h)  
 Copyright (C)  
 EMI 1998  
 HHHHHHHHHHHHHHHHHH  
 chun.000 60Hz  
 T: 0 0  
 R: 1354 6771  
 X: 10.00 Y: 10.00  
 \*PRINTER\* THERMAL

- 1 OPTIONS
- 2 GAIN SETTING
- 3 **ACQUISITION**
- 4 DATA ANALYSIS
- 5 1-D ANALYSIS
- 6 2-D ANALYSIS
- 7 CHANGE MODE
- 8 EXIT



Church 9

170731355

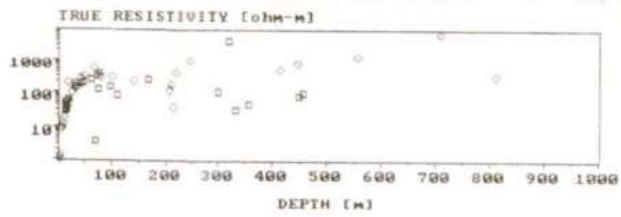
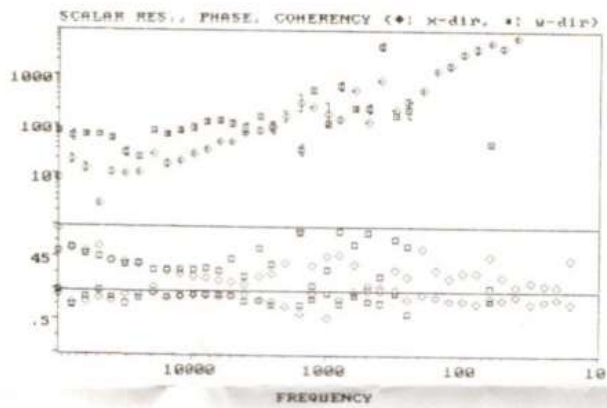
2746801

2272 m

10:02 am

```
IMAGE (ver.2.21h)
Copyright (C)
EMI 1998
#####
chun.009 60Hz
T: 0 0
R: 1956 6801
X: 10.00 Y: 10.00
*PRINTER* THERMAL
```

- 1 OPTIONS
- 2 GAIN SETTING
- 3 ACQUISITION
- 4 DATA ANALYSIS
- 5 1-D ANALYSIS
- 6 **2-D ANALYSIS**
- 7 CHANGE MODE
- 8 EXIT





Church 10

170731390

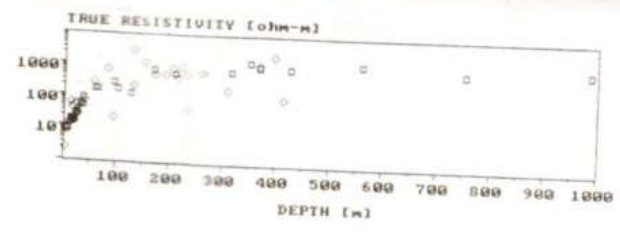
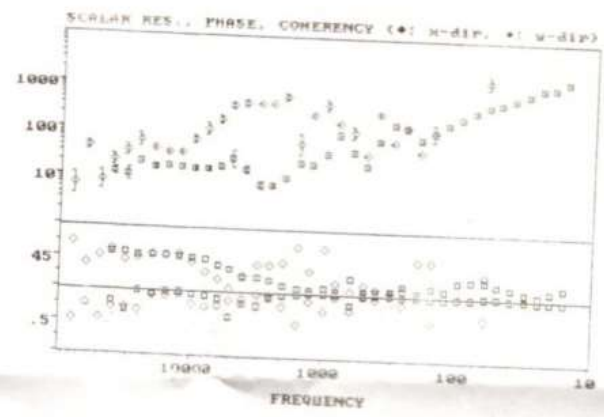
9746972

2303 m.

11:15

IMAGEM (ver.2.21h)  
Copyright (C)  
EMI 1998  
#####  
chan.010 60Hz  
T: 0 0  
R: 1389 6972  
X: 10.00 Y: 5.00  
\*PRINTER\* THERMAL

- 1 OPTIONS
- 2 GAIN SETTING
- 3 ACQUISITION
- 4 DATA ANALYSIS
- 5 1-D ANALYSIS
- 6 2-D ANALYSIS
- 7 CHANGE MODE
- 8 EXIT



Church 11

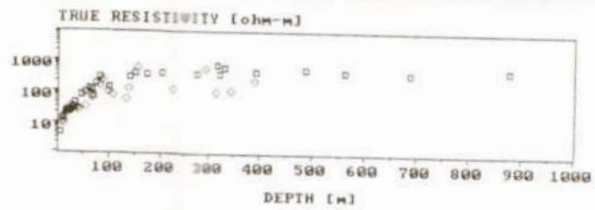
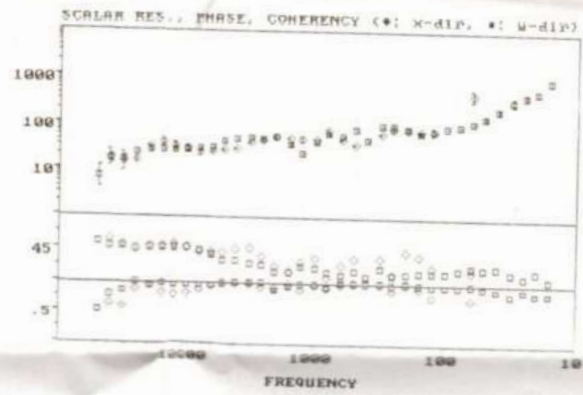
170731358

9747078

2359 m

```
IMAGE (ver. 2.21h)
Copyright (C)
EMI 1998
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
chan.011 60Hz
I: 0 0
R: 1358 7078
X: 10.00 Y: 10.00
*PRINTER* THERMAL

1  OPTIONS
2  GAIN SETTING
3  ACQUISITION
4  DATA ANALYSIS
5  1-D ANALYSIS
6  2-D ANALYSIS
7  CHANGE MODE
8  EXIT
```



Church 12

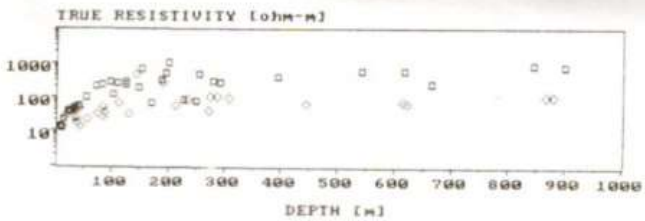
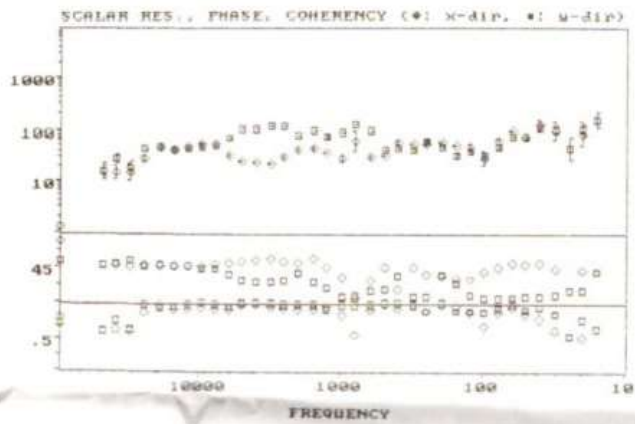
170731440

9747168

2400 m

```
IMAGEM (ver.2.21b)
Copyright (C)
EMI 1998
#####
chun.012 60Hz
T: 0 0
R: 1432 7173
X: 10.00 Y: 10.00
*PRINTER* THERMAL

1  OPTIONS
2  GAIN SETTING
3  ACQUISITION
4  DATA ANALYSIS
5  1-D ANALYSIS
6  2-D ANALYSIS
7  CHANGE MODE
8  EXIT
```



Church 13

170731486

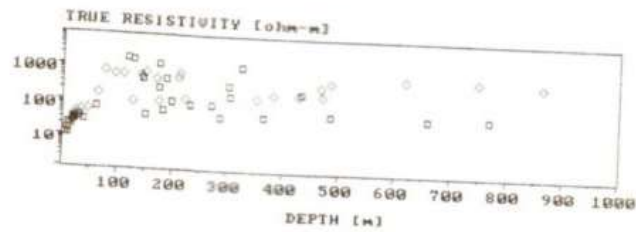
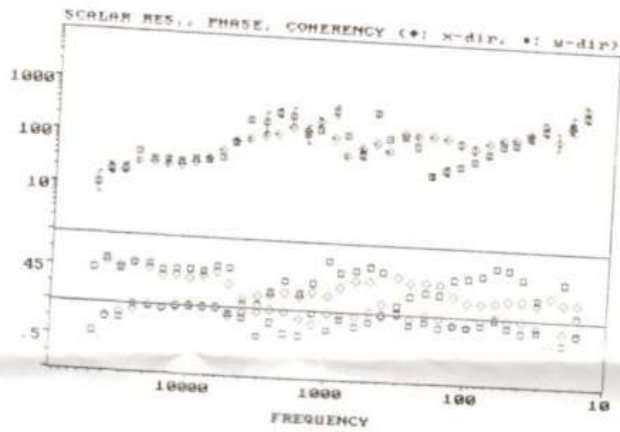
9747320

2446 m.

14:05

```
IMAGEN (ver. 2.21h)
Copyright (C)
EMI 1998
HHHHHHHHHHHHHHHHHH
  chun.013 60Hz
T:   0      0
R:  1486   7320
X: 10.00 Y: 10.00
*PRINTER* THERMAL

1  OPTIONS
2  GAIN SETTING
3  ACQUISITION
4  DATA ANALYSIS
5  1-D ANALYSIS
6  2-D ANALYSIS
7  CHANGE MODE
8  EXIT
```



Church 14

170731301

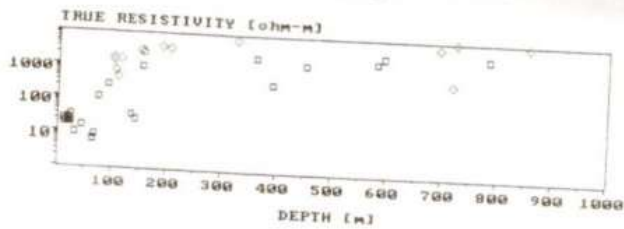
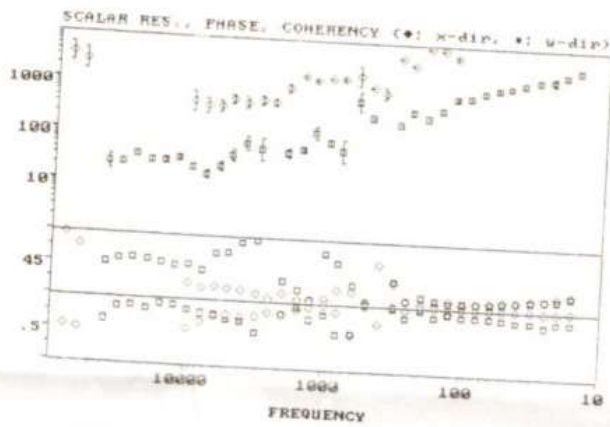
2746888

2201 m

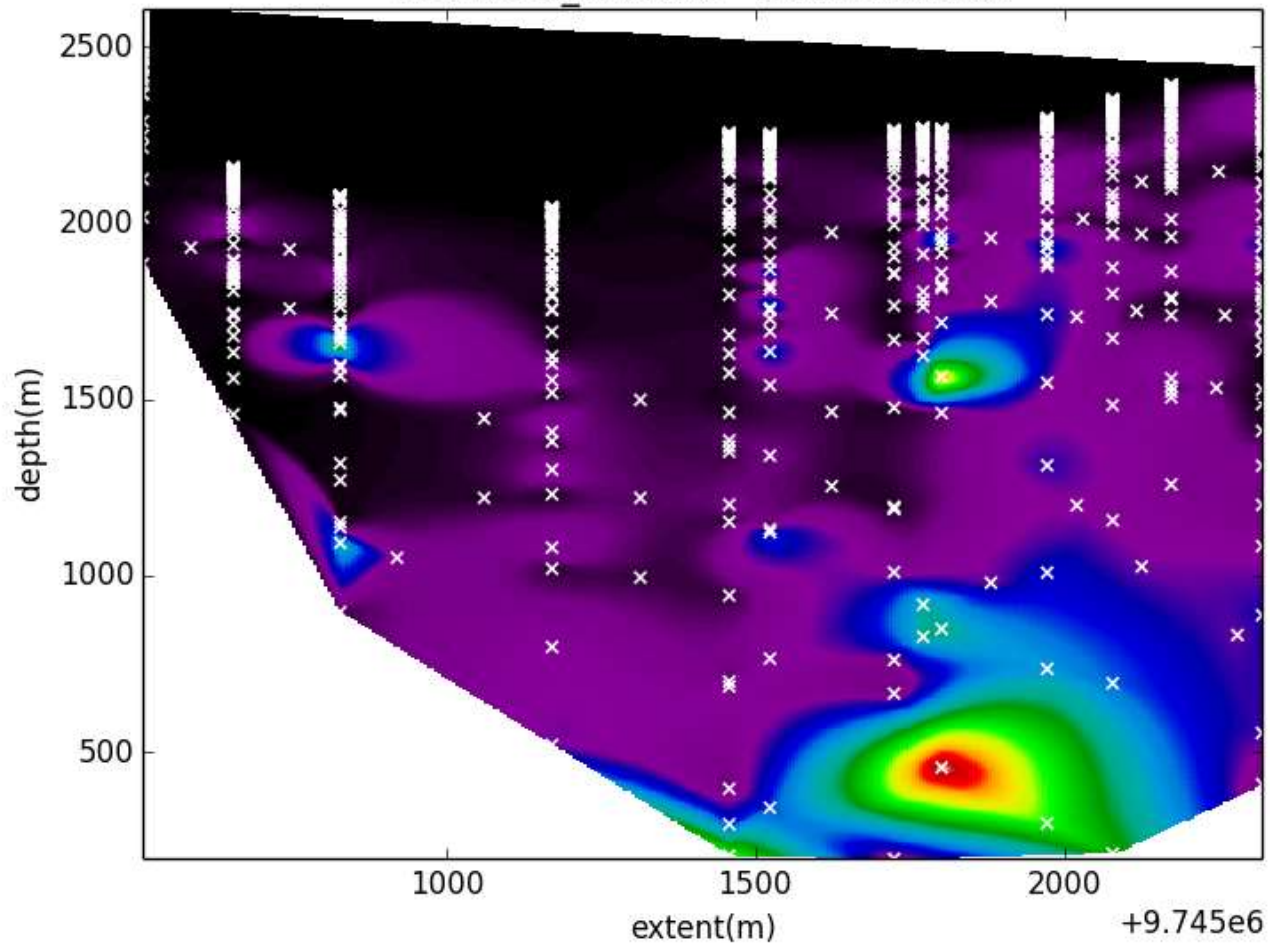
15:50

```
IMAGEM (ver.2.21h)
Copyright (C)
EMI 1998
#####
chan.014 60Hz
I: 0 0
R: 1379 6892
X: 5.00 Y: 10.00
*PRINTER* THERMAL

1  OPTIONS
2  GAIN SETTING
3  ACQUISITION
4  DATA ANALYSIS
5  1-D ANALYSIS
6  2-D ANALYSIS
7  CHANGE MODE
8  EXIT
```



## ANEXO II. Perfil Audio Magnetotelúrico de Resistividades



## ANEXO III. Clasificación Granulométrica S.U.C.S.

CH-GR-01					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	707.62
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	215.64	30.47	30.47	69.53
10	2	50.92	7.20	37.67	62.33
20	0.85	46.22	6.53	44.20	55.80
40	0.425	41.54	5.87	50.07	49.93
140	0.106	40.45	5.72	55.79	44.21
200	0.075	1.72	0.24	56.03	43.97
Pasa 200		0.33	43.97	100.00	0.00
	<b>Total</b>	311.13	100.00		
Resultados					
W =	19.87	%	LP =	37.69	%
LL =	39.03	%	IP =	1.34	%
% Grava	30.47	% Arena	25.56	% Finos	43.97
<b>Clasificación SUCS:</b>		GM			

CH-GR-02					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	519.62
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	92.36	17.77	17.77	82.23
10	2	65.38	12.58	30.36	69.64
20	0.85	55.02	10.59	40.95	59.05
40	0.425	63.3	12.18	53.13	46.87
140	0.106	80.1	15.42	68.54	31.46
200	0.075	8.78	1.69	70.23	29.77
Pasa 200		1.12	29.77	100.00	0.00
	<b>Total</b>	154.68	100.00		
Resultados					
W =	38.57	%	LP =	27.35	%
LL =	31.08	%	IP =	3.73	%
% Grava	17.77	% Arena	52.46	% Finos	29.77
<b>Clasificación SUCS:</b>		SM			

CH-GR-03					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	577.5
Tamiz No.	ABERTURA Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	6.76	1.17	1.17	98.83
10	2	15.05	2.61	3.78	96.22
20	0.85	11.04	1.91	5.69	94.31
40	0.425	10.06	1.74	7.43	92.57
140	0.106	38.78	6.72	14.15	85.85
200	0.075	7.8	1.35	15.50	84.50
Pasa 200		1.34	84.50	100.00	0.00
	<b>Total</b>	488.01	100.00		
Resultados					
W =	15.63	%	LP =	44.49	%
LL =	52.24	%	IP =	7.75	%
% Grava	1.17	% Arena	14.33	% Finos	84.50
<b>Clasificación SUCS:</b>		MH			

CH-GR-04					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	494.14
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	34.89	7.06	7.06	92.94
10	2	13.56	2.74	9.80	90.20
20	0.85	3.85	0.78	10.58	89.42
40	0.425	0.66	0.13	10.72	89.28
140	0.106	6.09	1.23	11.95	88.05
200	0.075	1.59	0.32	12.27	87.73
Pasa 200		0.46	87.73	100.00	0.00
	<b>Total</b>	433.5	100.00		
Resultados					
W =	22.07	%	LP =	23.66	%
LL =	24.44	%	IP =	0.78	%
% Grava	7.06	% Arena	5.21	% Finos	87.73
<b>Clasificación SUCS:</b>		ML			



CH-GR-05					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	599.27
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido(gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	172.93	28.86	28.86	71.14
10	2	22.12	3.69	32.55	67.45
20	0.85	5.33	0.89	33.44	66.56
40	0.425	0.98	0.16	33.60	66.40
140	0.106	7.62	1.27	34.87	65.13
200	0.075	0.94	0.16	35.03	64.97
Pasa 200		0.21	64.97	100.00	0.00
	<b>Total</b>	389.35	100.00		
Resultados					
W =	36.13	%	LP =	40.02	%
LL =	45.63	%	IP =	5.61	%
% Grava	28.86	% Arena	6.17	% Finos	64.97
Clasificación SUCS:		OL			

CH-GR-06					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	523.38
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	61.94	11.83	11.83	88.17
10	2	21.14	4.04	15.87	84.13
20	0.85	10.58	2.02	17.90	82.10
40	0.425	4.17	0.80	18.69	81.31
140	0.106	59.03	11.28	29.97	70.03
200	0.075	7.55	1.44	31.41	68.59
Pasa 200		0.68	68.59	100.00	0.00
	<b>Total</b>	358.97	100.00		
Resultados					
W =	20.26	%	LP =	21.34	%
LL =	23.98	%	IP =	2.64	%
% Grava	11.83	% Arena	19.58	% Finos	68.59
Clasificación SUCS:		OL - CL			

CH-GR-07					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	587.34
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	78.05	13.29	13.29	86.71
10	2	26.57	4.52	17.81	82.19
20	0.85	17.92	3.05	20.86	79.14
40	0.425	9.25	1.57	22.44	77.56
140	0.106	72.69	12.38	34.81	65.19
200	0.075	8.6	1.46	36.28	63.72
Pasa 200		2.27	63.72	100.00	0.00
	<b>Total</b>	374.26	100.00		
Resultados					
W =	15.1	%	LP =	32.04	%
LL =	33.58	%	IP =	1.54	%
% Grava	13.29	% Arena	22.99	% Finos	63.72
<b>Clasificación SUCS:</b>		ML			

CH-GR-08					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	783.01
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	259.69	33.17	33.17	66.83
10	2	191.93	24.51	57.68	42.32
20	0.85	125.38	16.01	73.69	26.31
40	0.425	52.74	6.74	80.43	19.57
140	0.106	55.27	7.06	87.48	12.52
200	0.075	10.78	1.38	88.86	11.14
Pasa 200		1.77	11.14	100.00	0.00
	<b>Total</b>	87.22	100.00		
Resultados					
W =	15.54	%	LP =	18.98	%
LL =	20.4	%	IP =	1.42	%
% Grava	33.17	% Arena	55.70	% Finos	11.14
<b>Clasificación SUCS:</b>		SM - SP			

CH-GR-09					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	676.84
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	203.16	30.02	30.02	69.98
10	2	74.84	11.06	41.07	58.93
20	0.85	57.17	8.45	49.52	50.48
40	0.425	39.04	5.77	55.29	44.71
140	0.106	33.87	5.00	60.29	39.71
200	0.075	2.52	0.37	60.66	39.34
Pasa 200		1.2	39.34	100.00	0.00
	<b>Total</b>	266.24	100.00		
Resultados					
W =	8.72	%	LP =	30.71	%
LL =	33.16	%	IP =	2.45	%
% Grava	30.02	% Arena	30.65	% Finos	39.34
<b>Clasificación SUCS:</b>		SM			

CH-GR-10					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	500.02
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	120.57	24.11	24.11	75.89
10	2	24.17	4.83	28.95	71.05
20	0.85	21.85	4.37	33.32	66.68
40	0.425	18.57	3.71	37.03	62.97
140	0.106	35.03	7.01	44.04	55.96
200	0.075	4.86	0.97	45.01	54.99
Pasa 200		2.01	54.99	100.00	0.00
	<b>Total</b>	274.97	100.00		
Resultados					
W =	13.8	%	LP =	29.4	%
LL =	32.17	%	IP =	2.77	%
% Grava	24.11	% Arena	20.90	% Finos	54.99
<b>Clasificación SUCS:</b>		ML			

CH-GR-11					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial(gr):	695.99
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	262.55	37.72	37.72	62.28
10	2	37.37	5.37	43.09	56.91
20	0.85	42.77	6.15	49.24	50.76
40	0.425	53.58	7.70	56.94	43.06
140	0.106	73.67	10.58	67.52	32.48
200	0.075	4.08	0.59	68.11	31.89
Pasa 200		0.51	31.89	100.00	0.00
	<b>Total</b>	221.97	100.00		
Resultados					
W =	5.42	%	LP =	24.03	%
LL =	25.66	%	IP =	1.63	%
% Grava	37.72	% Arena	30.38	% Finos	31.89
Clasificación SUCS:		GM			

CH-GR-12					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	708.66
TAMIZ No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	274.87	38.79	38.79	61.21
10	2	13.52	1.91	40.70	59.30
20	0.85	9.36	1.32	42.02	57.98
40	0.425	5.88	0.83	42.85	57.15
140	0.106	20.2	2.85	45.70	54.30
200	0.075	8.68	1.22	46.92	53.08
Pasa 200		0.9	53.08	100.00	0.00
	<b>Total</b>	376.15	100.00		
Resultados					
W =	27.94	%	LP =	42.93	%
LL =	43.61	%	IP =	0.68	%
% Grava	38.79	% Arena	8.13	% Finos	53.08
Clasificación SUCS:		ML			

CH-GR-13					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial(gr):	621.85
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	319.37	51.36	51.36	48.64
10	2	74.23	11.94	63.30	36.70
20	0.85	68.52	11.02	74.31	25.69
40	0.425	30.47	4.90	79.21	20.79
140	0.106	14.63	2.35	81.57	18.43
200	0.075	1.79	0.29	81.85	18.15
Pasa 200		0.11	18.15	100.00	0.00
	<b>Total</b>	112.84	100.00		
Resultados					
W =	36.36	%	LP =	30.69	%
LL =	37.93	%	IP =	7.24	%
% Grava	51.36	% Arena	30.50	% Finos	18.15
<b>Clasificación SUCS:</b>		GC			

CH-GR-14					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	470.74
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	23.81	5.06	5.06	94.94
10	2	33.63	7.14	12.20	87.80
20	0.85	94.1	19.99	32.19	67.81
40	0.425	78.79	16.74	48.93	51.07
140	0.106	26.66	5.66	54.59	45.41
200	0.075	2.62	0.56	55.15	44.85
Pasa 200		0.2	44.85	100.00	0.00
	<b>Total</b>	211.13	100.00		
Resultados					
W =	31.27	%	LP =	36.18	%
LL =	42.47	%	IP =	6.29	%
% Grava	5.06	% Arena	50.09	% Finos	44.85
<b>Clasificación SUCS:</b>		SM - SC			

CH-GR-15					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	840.02
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	544.65	64.84	64.84	35.16
10	2	94.6	11.26	76.10	23.90
20	0.85	68.56	8.16	84.26	15.74
40	0.425	37.57	4.47	88.73	11.27
140	0.106	51.33	6.11	94.84	5.16
200	0.075	4.83	0.57	95.42	4.58
Pasa 200		1.93	4.58	100.00	0.00
	<b>Total</b>	38.48	100.00		
Resultados					
W =		%	LP =		%
LL =		%	IP =		%
% Grava	64.84	% Arena	30.58	% Finos	4.58
<b>Clasificación SUCS:</b>		GW			

CH-GR-16					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial(gr):	497.33
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido(gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	20.17	4.06	4.06	95.94
10	2	21.1	4.24	8.30	91.70
20	0.85	37.33	7.51	15.80	84.20
40	0.425	66.58	13.39	29.19	70.81
140	0.106	72.86	14.65	43.84	56.16
200	0.075	2.48	0.50	44.34	55.66
Pasa 200		1.17	55.66	100.00	0.00
	<b>Total</b>	276.81	100.00		
Resultados					
W =	7.46	%	LP =	30.29	%
LL =	36.99	%	IP =	6.7	%
% Grava	4.06	% Arena	40.29	% Finos	55.66
<b>Clasificación SUCS:</b>		ML			

CH-GR-17					
Granulometría					
<b>Norma:</b>	<b>ASTMD 421</b>	<b>ASTMD 422</b>		<b>Peso Inicial (gr):</b>	737.61
<b>Tamiz No.</b>	<b>Abertura Tamiz (mm)</b>	<b>Peso Retenido (gr)</b>	<b>Porcentaje Retenido (%)</b>	<b>Porcentaje Acumulado (%)</b>	<b>Porcentaje Pasante (%)</b>
4	4.75	330.39	44.79	44.79	55.21
10	2	37.74	5.12	49.91	50.09
20	0.85	33.41	4.53	54.44	45.56
40	0.425	24.57	3.33	57.77	42.23
140	0.106	65.91	8.94	66.70	33.30
200	0.075	11.48	1.56	68.26	31.74
<b>Pasa 200</b>		1.48	31.74	100.00	0.00
	<b>Total</b>	234.11	100.00		
Resultados					
<b>W =</b>	12.85	%	<b>LP =</b>	29.47	%
<b>LL =</b>	34.38	%	<b>IP =</b>	4.91	%
<b>% Grava</b>	44.79	<b>% Arena</b>	23.47	<b>% Finos</b>	31.74
<b>Clasificación SUCS:</b>		GM - GC			

CH-GR-18					
Granulometría					
<b>Norma:</b>	<b>ASTMD 421</b>	<b>ASTMD 422</b>		<b>Peso Inicial (gr):</b>	769.08
<b>Tamiz No.</b>	<b>Abertura Tamiz (mm)</b>	<b>Peso Retenido (gr)</b>	<b>Porcentaje Retenido (%)</b>	<b>Porcentaje Acumulado (%)</b>	<b>Porcentaje Pasante (%)</b>
4	4.75	177.48	23.08	23.08	76.92
10	2	35.03	4.55	27.63	72.37
20	0.85	36.32	4.72	32.35	67.65
40	0.425	32.78	4.26	36.62	63.38
140	0.106	86.01	11.18	47.80	52.20
200	0.075	14.5	1.89	49.69	50.31
<b>Pasa 200</b>		0.91	50.31	100.00	0.00
	<b>Total</b>	386.96	100.00		
Resultados					
<b>W =</b>	12.85	%	<b>LP =</b>	24.52	%
<b>LL =</b>	34.67	%	<b>IP =</b>	10.15	%
<b>% Grava</b>	23.08	<b>% Arena</b>	26.61	<b>% Finos</b>	50.31
<b>Clasificación SUCS:</b>		ML - CL			

CH-GR-19					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial(gr):	771.61
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	239.68	31.06	31.06	68.94
10	2	68.52	8.88	39.94	60.06
20	0.85	58.15	7.54	47.48	52.52
40	0.425	57.48	7.45	54.93	45.07
140	0.106	131.75	17.07	72.00	28.00
200	0.075	22.15	2.87	74.87	25.13
Pasa 200		2.37	25.13	100.00	0.00
	<b>Total</b>	193.88	100.00		
Resultados					
W =	4.67	%	LP =	23.14	%
LL =	24.25	%	IP =	1.11	%
% Grava	31.06	% Arena	43.81	% Finos	25.13
<b>Clasificación SUCS:</b>		GM			

CH-GR-20					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	587.22
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	143.42	24.42	24.42	75.58
10	2	40.12	6.83	31.26	68.74
20	0.85	38.62	6.58	37.83	62.17
40	0.425	23.37	3.98	41.81	58.19
140	0.106	35.25	6.00	47.82	52.18
200	0.075	10.69	1.82	49.64	50.36
Pasa 200		1.14	50.36	100.00	0.00
	<b>Total</b>	295.75	100.00		
Resultados					
W =	18.83	%	LP =	35.07	%
LL =	41.76	%	IP =	6.69	%
% Grava	24.42	% Arena	25.21	% Finos	50.36
<b>Clasificación SUCS:</b>		ML			



CH-GR-21					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	710.06
TAMIZ No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	321.64	45.30	45.30	54.70
10	2	75.35	10.61	55.91	44.09
20	0.85	69.64	9.81	65.72	34.28
40	0.425	50.55	7.12	72.84	27.16
140	0.106	77.33	10.89	83.73	16.27
200	0.075	14.14	1.99	85.72	14.28
Pasa 200		2.12	14.28	100.00	0.00
	<b>Total</b>	101.41	100.00		
Resultados					
W =	6.42	%	LP =	27.2	%
LL =	29.07	%	IP =	1.87	%
% Grava	45.30	% Arena	40.42	% Finos	14.28
<b>Clasificación SUCS:</b>		GM			

CH-GR-22					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial(gr):	827.04
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	333.06	40.27	40.27	59.73
10	2	60.02	7.26	47.53	52.47
20	0.85	57.45	6.95	54.47	45.53
40	0.425	37.34	4.51	58.99	41.01
140	0.106	84.96	10.27	69.26	30.74
200	0.075	18.21	2.20	71.46	28.54
Pasa 200		1.89	28.54	100.00	0.00
	<b>Total</b>	236	100.00		
Resultados					
W =	6.27	%	LP =	20.71	%
LL =	25.3	%	IP =	4.59	%
% Grava	40.27	% Arena	31.19	% Finos	28.54
<b>Clasificación SUCS:</b>		GM - GC			

CH-GR-23					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	796.89
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	158.4	19.88	19.88	80.12
10	2	25.12	3.15	23.03	76.97
20	0.85	69.42	8.71	31.74	68.26
40	0.425	99.21	12.45	44.19	55.81
140	0.106	32.65	4.10	48.29	51.71
200	0.075	4.71	0.59	48.88	51.12
Pasa 200		2.15	51.12	100.00	0.00
	<b>Total</b>	407.38	100.00		
Resultados					
W =	5.28	%	LP =	24.36	%
LL =	36.85	%	IP =	12.49	%
% Grava	19.88	% Arena	29.00	% Finos	51.12
<b>Clasificación SUCS:</b>		ML - CL			

CH-GR-24					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	727.84
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	118.48	16.28	16.28	83.72
10	2	47.74	6.56	22.84	77.16
20	0.85	139.19	19.12	41.96	58.04
40	0.425	118.64	16.30	58.26	41.74
140	0.106	44.07	6.05	64.32	35.68
200	0.075	6.35	0.87	65.19	34.81
Pasa 200		0.44	34.81	100.00	0.00
	<b>Total</b>	253.37	100.00		
Resultados					
W =	8.01	%	LP =	24.9	%
LL =	31.37	%	IP =	6.47	%
% Grava	16.28	% Arena	48.91	% Finos	34.81
<b>Clasificación SUCS:</b>		SM - SC			

CH-GR-25					
Granulometría					
Norma:	ASTMD 421	ASTMD 422		Peso Inicial (gr):	624.23
Tamiz No.	Abertura Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
4	4.75	310.7	49.77	49.77	50.23
10	2	65.49	10.49	60.26	39.74
20	0.85	43.49	6.97	67.23	32.77
40	0.425	28.68	4.59	71.83	28.17
140	0.106	50.64	8.11	79.94	20.06
200	0.075	10.79	1.73	81.67	18.33
Pasa 200		2.6	18.33	100.00	0.00
	<b>Total</b>	114.44	100.00		
Resultados					
W =	8.98	%	LP =	30.59	%
LL =	33.24	%	IP =	2.65	%
% Grava	49.77	% Arena	31.89	% Finos	18.33
<b>Clasificación SUCS:</b>		GM			