

**MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO
Y ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS TERMALES**

DAIRO ALEXANDER GÓMEZ ROMERO

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN GEOTECNIA
TUNJA
2019**

**MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO
Y ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS TERMALES**

DAIRO ALEXANDER GÓMEZ ROMERO

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Geotécnia

LUIS ALBERTO CÁCERES CÁRDENAS

Magister en Geotécnia

Director

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

MAESTRIA EN GEOTECNIA

TUNJA

2019

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, Noviembre de 2019

Resumen

En el presente trabajo se expone la evaluación fisicoquímica e isotópica del agua que emerge de fuentes termales del municipio Paipa del departamento de Boyacá.

En las fuentes seleccionadas, se realizaron mediciones in situ y se tomaron muestras de agua para su posterior análisis químico. Se midieron las temperaturas, considerándose que en las zonas se encuentran fuentes con características hipotermiales, meso termales e hipertermales. Se tomaron los valores de pH, así como de conductividad y sólidos totales disueltos, para identificar si son aguas con una apreciable mineralización y sólidos disueltos. La presente investigación mostrará si las aguas pueden ser usadas para fines recreativos y de esparcimiento que promuevan el desarrollo económico y social de los sectores donde emergen.

Para la construcción del modelo geotérmico específico se ejecutó un programa de exploración geofísica para determinar variaciones laterales y verticales de las propiedades físicas del subsuelo.

Palabras clave: Modelo, geotérmico, subsuelo.

Abstract

The present work presents the physico-chemical and isotopic evaluation of water which emerges from springs in the municipality of Paipa in Boyacá Department. In the selected sources, measured in-situ were made, and water samples were taken for chemical analysis. Measured temperatures, considering that sources are included in areas with hypothermic features, mesothermal and hyperthermic. PH values, were taken as well as conductivity and total dissolved solids, to identify if they are waters with noticeable mineralization and dissolved solids, this research will show if the waters can be used for recreational purposes and leisure activities that promote economic and social development of the sectors where emerge. For the construction of the geothermal specific model was executed a programme of geophysical exploration to determine lateral and vertical variations of the physical properties of the subsurface.

Key Words: model, geothermal, subsurface.

Dedicatoria

A Dios por darme la oportunidad y proveerme las herramientas para crecer profesionalmente.

A mi padre Julio Tomás Gómez Pinto y a mi madre Rosa Arcelia Romero Niño, que con gran esfuerzo y dedicación forjaron el profesional que soy.

A mi esposa Nydia Elena Cortes Cervantes que me apoyo en todo momento y no dejo que desfalleciera a lo largo del duro camino para la terminación de la maestría.

Agradecimientos

A mi director de tesis, el ingeniero Luis Alberto Cáceres Cárdenas quien con su guía y conocimiento me brindo valiosos aportes en el desarrollo del estudio.

A los grupos de investigación GIISAG y GICA que me apoyaron en el desarrollo de mi proyecto de grado.

A nuestros profesores que nos brindaron su conocimiento y experiencia para el crecimiento profesional.

Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Planteamiento del problema	21
1.1 El problema de la investigación	21
2. Justificación	22
3. Objetivos	23
3.1 Objetivo General	23
3.2 Objetivos Específicos	23
4. Localización	24
5. Marco Geológico	26
5.1 Geología Regional	26
5.1.1 Triásico Superior.	27
5.1.1.1 <i>Formación Palermo (Jp).</i>	27
5.1.2 Jurásico.	28
5.1.2.1 <i>Formación Montebel (Jlm).</i>	28
5.1.2.2 <i>Formación Rusia (Jru).</i>	28
5.1.2.3 <i>Formación Arcabuco (Jar).</i>	29
5.1.3 Cretáceo.	29
5.1.3.1 <i>Formación Ritoque (Kiri).</i>	29
5.1.3.2 <i>Formación los medios (Kim).</i>	30
5.1.3.3 <i>Formación Tibasosa (Kit).</i>	31
5.1.3.4 <i>Formación Une (Kiu).</i>	31

MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN

5.1.3.5 Formación Churuvita (Ksch).	32
5.1.3.6 Formación Conejo (Kscn).	33
5.1.3.7 Formación Plaeners (Kg2).	33
5.1.3.8 Formación Los Pinos (Klp).	34
5.1.3.9 Formación Labor y Tierna (Kg1).	34
5.1.3.10 Formación Guaduas (Ktg).	35
5.1.4 Terciario. A continuación se plasman las formaciones presentes.	35
5.1.4.1 Formación Bogotá (Tb).	35
5.1.4.2 Formación Tilatá (Tst).	36
5.1.5 Neógeno. A continuación se plasman las formaciones presentes.	36
5.1.5.1 Vulcanitas (NgQv).	37
5.1.6 Cuaternario. A continuación se plasman los depósitos presentes en la zona de estudio.	37
5.1.6.1 Depósitos cuaternarios aluviales (Qal).	37
5.1.6.2 Depósitos cuaternarios coluviales (Qc).	38
5.2 Geología estructural regional	38
5.2.1 Fallas.	39
5.2.1.1 Falla de Boyacá.	39
5.2.1.2 Falla El Curial.	39
5.2.1.3 Fallas menores.	40
5.2.2 Pliegues y Estructuras.	40
5.2.2.1 Anticlinal de Arcabuco.	40
5.2.2.2 Sinclinal de Los Medios.	40

MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN

5.2.2.3 <i>Estructuras menores.</i>	41
5.3 Geomorfología	41
5.4 Geología Local	42
5.5 Geología estructural local	43
6. Materiales y métodos	45
6.1 Metodología	45
6.1.1 Recolección de información existente.	45
6.1.2 Etapa de campo.	45
6.1.3 Etapa de laboratorio.	45
6.1.4 Etapa de oficina.	45
6.1.5 Informe final.	45
7. Prospección directa e indirecta	46
7.1 Prospección Geoeléctrica	46
7.1.1 Leyes que limitan la geoeléctrica	47
7.1.2 Sondeos eléctricos verticales y su interpretación	48
7.2 Prospección mediante magnetometría	58
7.2.1 Fundamentos teóricos. A continuación se plasman los fundamentos teóricos más relevantes utilizados en la magnetometría.	59
7.2.1.1 <i>Magnetismo de rocas y minerales</i>	59
7.2.1.2 <i>Magnetismo remanente</i>	60
7.2.1.3 <i>Correcciones temporales</i>	60
7.2.2 Levantamiento Magnético	61
7.2.3 Procesamiento.	63

MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN

7.2.3.1 <i>Corrección por drift.</i>	65
7.2.3.2 <i>Corrección por campo normal.</i>	66
7.2.4 Interpretación.	68
7.3 Prospección Directa	70
7.3.1 Perforación.	70
7.3.1.1 <i>Primer sondeo.</i>	70
7.3.1.2 <i>Segundo Sondeo.</i>	78
8. Análisis físico químico de aguas termales	87
8.1 Clasificación de las aguas termales de acuerdo con su temperatura	89
8.2 Clasificación de las aguas termales de acuerdo con su mineralización global	89
8.3 Clasificación de las aguas termales de acuerdo con su composición	90
8.4 Clasificación de las aguas termales de acuerdo con su potencial de hidrogeno (PH)	90
9. Resultados	93
9.1 Exploración del subsuelo	93
9.1.1 Indirecta	93
9.1.2 Directa	96
9.2 Análisis físico químico de aguas termales	99
9.3 Modelo conceptual geológico – geotérmico	99
10. Análisis y discusión de los resultados	101
11. Conclusiones	105
12. Recomendaciones	107
Anexos	111

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Datos de campo de Sondeo Eléctrico Vertical</i>	49
Tabla 2. <i>Rangos de resistividad asociados a las unidades geológicas presentes en el área</i>	51
Tabla 3. <i>S. E. V. - 1. Coordenadas: E:1107127; N:1128957. Error: 1.77%</i>	52
Tabla 4. <i>S. E. V. - 2. Coordenadas: E: 1106729; N: 1128440. Error: 2.84%</i>	53
Tabla 5. <i>S. E. V. - 3. Coordenadas: E: 1107291; N: 1128036. Error: 4.9%</i>	54
Tabla 6. <i>S. E. V. - 4. Coordenadas: E: 1107314; N: 1128916. Error: 3.9%</i>	55
Tabla 7. <i>S. E. V. - 5. Coordenadas: E: 1107038; N: 1128104. Error: 1.2%</i>	56
Tabla 8. <i>Datos de campo levantamiento magnético.</i>	63
Tabla 9. <i>Datos corregidos por la deriva instrumental y campo normal.</i>	66
Tabla 10. <i>Resultados de la caracterización geomecánica del primer sondeo</i>	71
Tabla 11. <i>Resultados del ensayo de corte directo de la muestra 3.</i>	76
Tabla 12. <i>Clasificación de las muestras obtenidas en el sondeo 2.</i>	80
Tabla 13. <i>Resultados de los ensayos de SPT</i>	84
Tabla 14. <i>Resultados de laboratorio análisis de agua.</i>	88
Tabla 15. <i>Inventario puntos de aguas termales en la zona de estudio.</i>	91
Tabla 16. <i>Resumen Interpretación SEV 5.</i>	101

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Localización de la zona de estudio.	24
Figura 2. Modelo digital de elevación.	25
Figura 3. Geología Regional del municipio de Paipa.	26
Figura 4. Geología Local, Plancha geológica 171	43
Figura 5. Esquema estructural con fallas longitudinales NNE, fallas transversales NW y NE.	44
Figura 6. ABEM Terrameter LS.	46
Figura 7. Dispositivo Schlumberger	47
Figura 8. Ubicación de SEV, vista en planta y vista SW-NE	49
Figura 9. Curva ρ_a vs. AB/2 (m) S.E.V. 1	52
Figura 10. Curva ρ_a vs. AB/2 (m) S.E.V	53
Figura 11. Curva ρ_a vs. AB/2 (m) S.E.V. 3	54
Figura 12. Curva ρ_a vs. AB/2 (m) S.E.V. 4	55
Figura 13. Curva ρ_a vs. AB/2 (m) S.E.V. 5	56
Figura 14. Pseudosección de ρ_a vs. AB/2 (m) S.E.V. 2, 5 y 3	57
Figura 15. Pseudosección de ρ_a vs. AB/2 (m) S.E.V. 1, y 4	58
Figura 16. Grilla de puntos de medición utilizada para la magnetometría	61
Figura 17. Magnetómetro Scintrex y computadora con el programa para descarga de datos.	62
Figura 18. Geoposicionador Satelital Garmin 64s	63
Figura 19. Magnetómetro Scintrex (Estación base)	63
Figura 20. Mapa de la intensidad total del campo geomagnético en nT	66
Figura 21. Curvas de nivel de valores nT sobrepuestas en imagen satelital de Google earth	69

MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN

Figura 22. Mapa magnético corregido por deriva instrumental y campo normal y la posible ubicación de las fallas, Escala de Colores de ΔZ con los valores en nT (Derecha)	70
Figura 23. Muestras de la perforación directa y ubicación del sondeo 1	71
Figura 24. Perfil del subsuelo sondeo 1	73
Figura 25. Resistividad aparente vs Humedad Natural	74
Figura 26. Resistividad aparente vs Índice de plasticidad	74
Figura 27. Resistividad aparente vs resistencia a la compresión simple	75
Figura 28. Esfuerzo cortante a diferentes cargas vs Deformación	77
Figura 29. Esfuerzo cortante último vs Esfuerzo normal	77
Figura 30. Lugar de perforación directa sondeo 2.	79
Figura 32. Resistividad aparente vs Humedad Natural	83
Figura 33. Esfuerzo efectivo vs esfuerzo cortante y regresión para obtener C' y $\tan \Phi'$	85
Figura 34. Muestreo de agua pozo azul	87
Figura 35. Ubicación de puntos de aguas termales	91
Figura 36. Medición de PH de los suelos mediante papel tornasol azul y rojo	92
Figura 37. Curva de SEV 2 de cuatro y SEV 5 de cinco capas, cada una con tabla de resultados donde se observa resistividades y espesores de capa	93
Figura 38. Secciones en falso color de resistividad aparente entre los S.E.V. 1, y 4 y S.E.V. 2, 5, 3	94
Figura 39. Mapa de anomalía magnética (nT) corregido por deriva instrumental y componente global del campo magnético, sobrepuesto en imagen satelital.	95
Figura 40. Perfil del subsuelo Sondeo 1.	97
Figura 41. Perfil del subsuelo y Gráfico de SPT corregido N45	98

MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN

Figura 42. Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa	100
Figura 43. Modelo Geotérmico conceptual de la zona de estudio	100
Figura 44. Mapa de anomalía magnética y la posible ubicación de las fallas (Línea roja)	103

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Resultados del ensayo de compresión simple muestra 1	111
Anexo B. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg muestra 1 y Tamizado, la gráfica muestra la obtención de límite líquido	112
Anexo C. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS muestra 1	113
Anexo D. Ensayo de compresión simple muestra 3	114
Anexo E. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg muestra 3 y Tamizado, la gráfica muestra la obtención de límite líquido	115
Anexo F. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS, muestra 3	116
Anexo G. Ensayo de compresión simple muestra 5	117
Anexo H. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg y Tamizado de la muestra 5, la figura muestra la obtención de límite líquido	118
Anexo I. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS, muestra 5	119
Anexo J. Ensayo de compresión simple muestra 6	120
Anexo K. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg y Tamizado de la muestra 6, la figura muestra la obtención de límite líquido	121
Anexo L. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS muestra 6	122
Anexo M. Ensayo de compresión simple muestra 7	123

MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN

Anexo N. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg y Tamizado de la muestra 7, la figura muestra la obtención de límite líquido	124
Anexo O. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS, muestra 7	125
Anexo P. Ensayo de compresión simple muestra 9	126
Anexo Q. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg y Tamizado de la muestra 9, la figura muestra la obtención de límite líquido	127
Anexo R. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS, muestra 9	128
Anexo S. Laboratorio de aguas	129

Introducción

Los trabajos que antecedieron la presente investigación en la zona geotérmica de Paipa, comenzaron con la caracterización química de las aguas termales llevada a cabo en 1849 por Baptiste & François. Posteriormente, Navia & Barriga (1929), realizaron un estudio geoquímico más detallado y se identificaron las rocas ígneas extrusivas. Luego, por medio de un estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos, OLADE, ICEL y Geotérmica Italiana, llevaron a cabo una actualización de las características químicas de las aguas, en el año 1982, datando, por vez primera las rocas del volcán de Paipa (2.5 Ma) y, clasificaron este sistema geotérmico con una prioridad media-alta, como posible fuente de generación eléctrica. Con posterioridad han sido integrados trabajos posteriores para construir modelos conceptuales.

Ferreira & Hernández (1988), llevaron a cabo observaciones geológicas y caracterización química de las aguas termales, resultando en la formulación del sistema geotérmico, conformado por una fuente de calor generada por una intrusión magmática. Un reservorio con temperatura geoquímica de más de 200°C, de permeabilidad primaria, probablemente hospedado en la formación Une, la capa sello conformada por capas arcillosas del Grupo Churuvita. La zona de recarga relacionada con afloramientos de la formación Une y una zona de descarga profunda conducida por fallas normales NE-SW.

En 1990, Lozano solapó un estudio geoelectrico a la información geológica de Olade, ICEL & Geotérmica Italiana y de esa manera presentó un sistema con una fuente de calor ligado al vulcanismo existente en la zona, localizada entre 3 y 5 km de profundidad y dos reservorios. El primero, albergado por el grupo Guadalupe, sería más superficial y pequeño. El segundo, con una mayor profundidad y alojado en las formaciones Churuvita y Une, sería el de mayor potencia cuyo sello sería la formación Churuvita.

INGEOMINAS concibió un modelo basado en la integración de varios estudios realizados (cartografía geológica y modelo estructural en escala 1:25000, caracterización isotópica de las aguas termales, estudios preliminares de alteración) como parte de la investigación de esta área geotérmica (Alfaro, y otros, 2005). De acuerdo con este modelo (figura 2), el sistema geotérmico se encuentra localizado en una caldera formada por el Volcán de Paipa, al finalizar el primero de dos eventos eruptivos. La fuente de calor, del sistema es la intrusión del magma en enfriamiento, con edad inferior a 2.3 millones de años. La recarga del sistema está controlada por permeabilidad secundaria, definida por las estructuras circulares alrededor de las intrusiones ígneas y las fracturas de la formación Plaeners. Un reservorio profundo, y en una roca fracturada, estaría ubicado alrededor de las fallas extensivas de basamento, consideradas posibles conductos de ascenso del magma del Volcán de Paipa. Otros reservorios más someros estarían alojados en capas de permeabilidad primaria en la secuencia sedimentaria, cuya extensión lateral permitiría el flujo de agua geotérmica hacia el norte, en donde se ubica la zona de descarga del sistema. La zona de descarga, está regida estructuralmente por cruces de fallas. La principal zona de descarga se localiza en el Sector ITP-Lanceros, zona de influencia del cruce de las fallas El Bizcocho – El Hornito, a partir del flujo lateral que va de sur a norte. El fluido profundo sufre procesos de mezcla que apantallan su composición química e isotópica por lo cual la caracterización química del agua y los gases del reservorio, puede no ser representativa. Además de los posibles procesos de dilución y la mezcla con una fuente de agua fría y salada (sulfatada sódica), cerca de la superficie (entre 5 y 35 m), el fluido hidrotermal recibe aportes de una fuente orgánica de gases, localizada en varios estratos de la secuencia sedimentaria.

Con posterioridad, y a cargo del INGEOMINAS, se realizaron estudios complementarios sobre inventario de puntos de aguas subterránea(Ortiz & Alfaro, 2010), la evaluación preliminar de la composición isotópica del agua meteórica(Alfaro, 2012, p. 28), gravimetría y magnetometría(Vásquez, 2012, p. 93), prospección geo eléctrica (Franco, 2016, p. 27) y un modelamiento preliminar de la estructura resistiva con magnetotelúrica(Moyano, 2015).

1. Planteamiento del problema

1.1 El problema de la investigación

Se quiere conocer la estructura del subsuelo al detalle en el área geotérmica de Paipa, principalmente en el sector de las piscinas municipales, como aporte y complementación del conocimiento del sistema geotérmico y su modelo conceptual preliminar de anteriores estudios realizados en el sector, lo anterior con miras a establecer sus usos potenciales e incrementar y optimizar los actuales, con base en el estudio físico y químico de las aguas termales e integración con otras técnicas geofísicas y su relación con parámetros geomecánicos de los materiales.

2. Justificación

Este estudio se realizó debido a la carencia de información sobre los orígenes de estas aguas termales, así como también por la falta de estudios desde el punto de vista geotérmico y las propiedades que generan cambios físico-químicos en los materiales a través de los cuales fluyen generando alteraciones de comportamiento de los mismos.

Las aguas termales en general, son recursos naturales subutilizados que tienen importantes características físico-químicas y un uso potencial que puede contribuir a la generación de empleo a nivel regional.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar el origen de las Aguas Termales de Paipa, complementar su modelo Hidrogeológico y posible uso en la generación de energía eléctrica a través de planta geotérmica.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar el análisis físico-químico de las aguas termales, objeto de estudio, para su posterior interpretación.
- Caracterizar los materiales a través de los cuales resurgen para elaboración de columna estratigrafía y posterior comparación con los datos obtenidos mediante los métodos geofísicos.
- Determinar el perfil del subsuelo mediante la realización de una perforación con recuperación continua de muestras.
- Evaluar la estructura geológica del subsuelo dentro del área de estudio mediante métodos geofísicos.
- Integrar la información obtenida a partir del método aplicado con la información geológica y geofísica (magnetometría, gravimetría, resistividad) existente.
- Evaluar la incidencia de las aguas en los cambios químicos de los materiales.

4. Localización

La zona de trabajo se encuentra ubicada en el departamento de Boyacá, en el municipio de Paipa, al sur del casco urbano y al sur este del lago Sochagota. Enmarcada dentro del polígono rojo; E:1106500 - 1107500 y N: 1127650 - 112900 (Figura 1). En el área están presentes elevaciones sobre el nivel del mar que comprenden un rango que oscila entre 2492 msnm y 2529 msnm (Figura 2), siendo predominante el piso térmico templado, la temperatura media anual es de 14.4°C. (Figura 1).

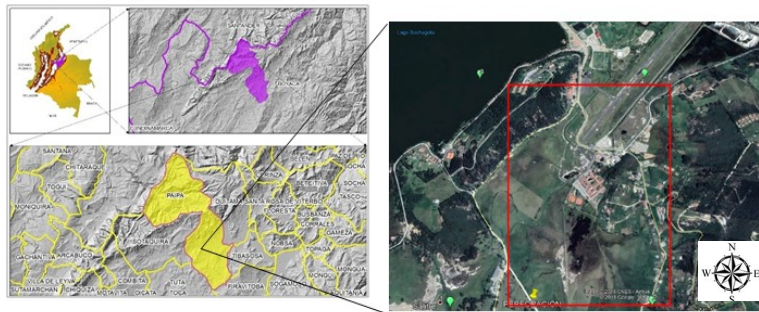


Figura 1. Localización de la zona de estudio. El cuadro rojo indica los límites en el área de estudio. El marcador amarillo indica la ubicación de la perforación. Fuente. Google maps

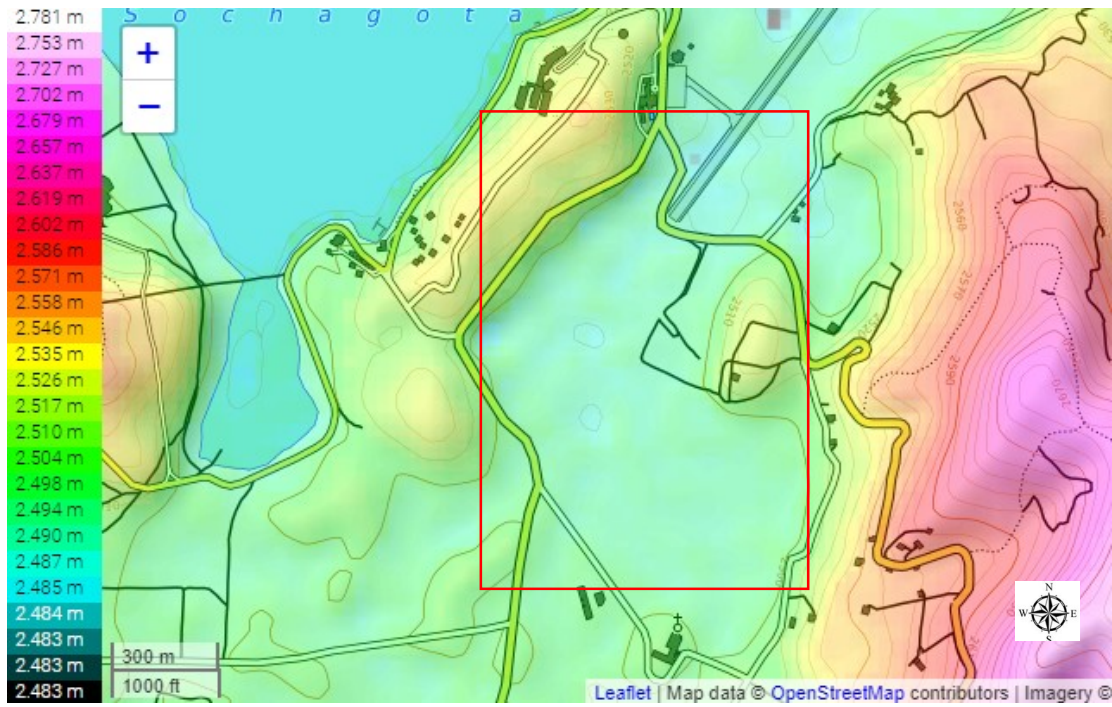


Figura2. Modelo digital de elevación. La escala de colores a la izquierda indica la altura en metros sobre el nivel del mar, el cuadro en rojo indica el área de estudio. Fuente. es-co.topographic-map.com,

5. Marco Geológico

5.1 Geología Regional

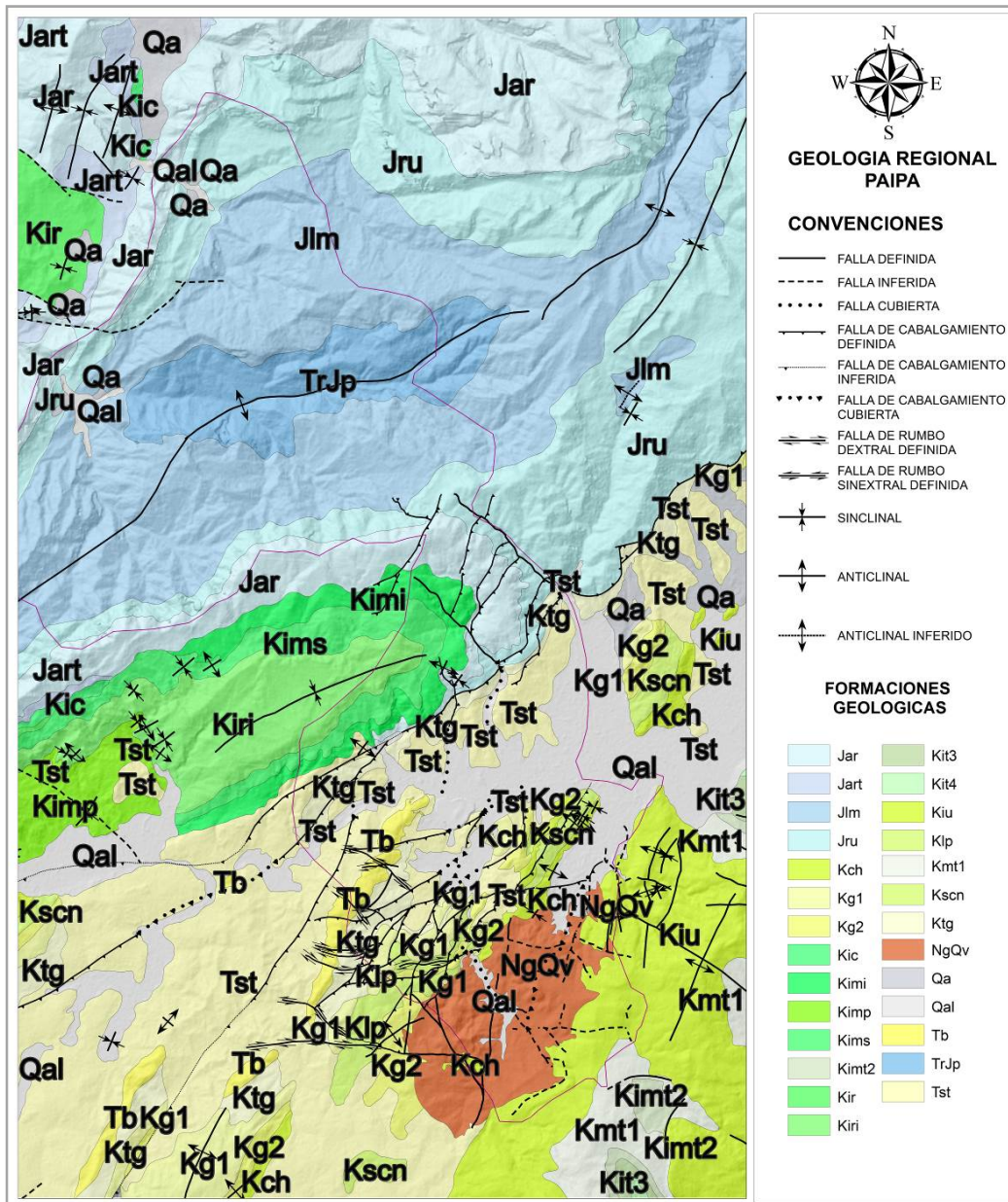


Figura 3. Geología Regional del municipio de Paipa. Fuente. Estudio de Caracterización Hidrogeológica en el municipio de Paipa por Problemas de Desabastecimiento de Agua para Consumo Humano Originado por los Efectos del Fenómeno del Niño en el Departamento de Boyacá, UPTC, mostrando las unidades geológicas existentes en la zona de estudio.

El Municipio de Paipa está ubicado en la cordillera oriental y específicamente en el Altiplano Cundiboyacense. Las formaciones presentes la conforman rocas de origen sedimentario y volcánico, depositadas durante el jurásico, cretácico, terciario y cuaternario; estas últimas corresponden a los depósitos recientes, las formaciones geológicas encontradas son: Formación Palermo (Jp), Formación Montebel (Jlm), Formación Rusia (Jru), Formación Arcabuco (Jar), Formación Ritoque (Kiri), Formación los medios (Kim), El miembro conglomerático Inferior (Kimi), El miembro limolítico superior (Kims), Formación Tibasosa (Kiti), Formación Une (Kiu), Formación Churuvita (Ksch), Formación Conejo (Ksc), Formación Plaeners (Kg2), Formación Los Pinos (Klp), Formación Labor y Tierna (Kg1), Formación Guaduas (Ktg), Formación Bogotá (Tb), Formación Tilatá (Tst), Vulcanitas, Depósitos cuaternarios aluviales (Qal), Depósitos cuaternarios coluviales (Qc).

5.1.1 Triásico Superior.

5.1.1.1 Formación Palermo (Jp). Secuencia que aflora en los alrededores de Palermo, 15 km al noreste de Paipa. La parte más baja, Renzoni (1981), aflora por el río Huertas entre Palermo y Gambita, está constituida por un conjunto de guijos de areniscas rojas de pocos metros de espesor y por un nivel de unos 50 m de shales negros. La parte restante de la formación, que aflora subiendo de Palermo por la quebrada Las Varas, consta de una sucesión de areniscas de grano fino a medio con tintes rojizos, verdosos y violáceos hasta el techo. Su espesor aproximado se calcula en 530 m y aflora en la carretera que de Paipa conduce a Palermo, en la vereda Santa Bárbara. La formación Palermo subyace a la formación Montebel y corresponde a una parte baja del “middle shaly member” del Grupo Girón, se supone que la formación es Mesozoica y en atención a la posición estratigráfica bajo la formación Montebel, la ubica en el Triásico-Jurásico.

5.1.2 Jurásico.

5.1.2.1 Formación Montebel (Jlm). Los Geólogos de la Shell, Trumpy (1943), así llamaron a unas capas arcillosas negras de unos centenares de metros que afloran en el área de Montebel, 18 km al norte de Paipa. En el camino que conduce de Palermo a Paipa sobre la vertiente de la quebrada Las Varas; consta de shales negros con limolitas grises verduscas; shales negros; limolitas ocre a rojizas con intercalaciones de areniscas arcillosas grises, blancuzcas y ocre; sigue un banco de limolitas gris oscuras con restos de vegetales y lamelibranquios y de intercalaciones de areniscas feldespato-micáceas, grises, rojizas y verduscas. La formación Montebel corresponde a los 400 m más altos del “middleshalymember” de Langenheim. Por su posición estratigráfica y el contenido de braquiópodos se ha supuesto que la formación Montebel debe representar el Jurásico inicial o Triásico terminal (D. Trumpy, et. al., 1943), el Rético-Liásico (Geyer, 1973), o el Liásico medio superior H. Bürgl (1964).

5.1.2.2 Formación Rusia (Jru). Con este nombre denominó Renzoni (1981), a las sedimentitas que subrayasen, en relación aparentemente concordante a la Formación Montebel en el Páramo de La Rusia, consta de 55m basales de arenisca conglomerática blanca y verde; 92m de alternancias de arenisca verde fina con areniscas conglomeráticas verduscas; 100m de alternancias de areniscas verde fina con arenisca conglomerática blanca, lentes de arcillolita hacia la parte alta; 89m de arenisca conglomerática blanca con intercalaciones de areniscas conglomerática y arenisca fina de color rojo; estas capas presentan estructuras internas tipo estratificación entrecruzada; 90 m areniscas de varios colores intercaladas por limolitas rojas y verdes. El espesor promedio de los estratos, a lo largo de toda la formación, es superior al metro, el espesor total es de 682m. Mas al sureste, por el camino que de Palermo conduce a Paipa se

observa una sucesión constituida por 80m de arenisca rojizo-blancuzca, limolitas gris-verdosas con alternancia amarilla-ocre; 200m de arenisca conglomerática, conglomerado y arenisca de color blanco a rojiza (con estructuras de estratificación cruzada); 64m de arenisca a veces feldespato-micácea, fina, roja con intercalaciones de conglomerados y arenisca conglomerática y de limolitas rojizas. Espesor total 334m. No se encontraron fósiles; Las dos sucesiones tienen por subyacente la Formación Montebel y por suprayacente la Formación Arcabuco.

5.1.2.3 Formación Arcabuco (Jar). El nombre y el rango de la formación fueron escogidos por Olson & Carter (1934), para indicar las areniscas que afloran por el Río Pómea. La formación está constituida por capas de arenisca cuarzosa blanca con intercalaciones de Shales rojos que a veces llegan a formar niveles de 10 a 50m de grueso. La formación aflora ampliamente en los flancos del sinclinal de los Medios en los alrededores de Sotaquirá y por la vía que de Paipa conduce a Palermo. Está expuesta ampliamente formando los flancos del Anticlinal de Arcabuco; mayor estructura que limita al occidente la cuenca del río Chicamocha, y se encuentra expuesta por la vía que de Sotaquirá conduce a Arcabuco.

Esta formación es subyacente por la Formación Rusia de edad jurásico superior y suprayacente por la Formación Cumbre de edad valanginiano. En la vía que de Paipa conduce a Los Medios se ha determinado un espesor promedio de 300 metros, mientras que en la vía que de Paipa conduce a Palermo el espesor alcanza los 500 m.

5.1.3 Cretáceo.

5.1.3.1 Formación Ritoque (Kiri). La formación Ritoque posee su localidad tipo en la quebrada Samacá, vecindad de Samacá (Boyacá). La Formación Ritoque está compuesta por una sucesión de limolitas grises, amarillentas a rojizas por procesos de meteorización, arcillolitas de color gris oscuro y algunos bancos esporádicos de caliza en algunos casos lumaquelica, es decir

roca conformada con restos fósiles generalmente con equinoideos (Erizos de mar), trigonias y amonitas (caracoles). Se correlaciona con base en la fauna, de fósiles, con una parte de la Formación Tibasosa (Renzoni, 1981). Esta unidad constituye el núcleo del sinclinal de los medios, presente parcialmente en el área del municipio de Paipa. Su edad estimada Cretáceo inferior con base en los estudios paleontológicos de Etayo, Julivert y Hubach.

5.1.3.2 Formación los medios (Kim). Denominada así por Renzoni (1981), su localidad tipo se ubica en la carretera Paipa-Palermo. Este autor la divide con base en la litología en un miembro conglomerático Inferior y un miembro lutítico superior. La Formación Los Medios está dividida en dos segmentos claramente diferenciables por sus características litológicas y sedimentológicas. Suprayace a la Formación Arcabuco (Jurásico superior) y subyace a la Formación Tibasosa (Aptiano – Albiano).

- **El miembro conglomerático Inferior (Kimi)**

Aflora por el carretable que conduce de Palermo a Paipa, al norte del sitio Los Medios y se extiende hasta los lados de Sotaquirá, está compuesto por capas de conglomerados, con guijos de arenisca cuarzosa similar a la de la formación Arcabuco y capas de arenisca conglomerática y limolitas, con restos de equínidos. La parte basal conglomerática cambia lateralmente a arenisca. El miembro conglomerático Inferior yace sobre la formación Arcabuco y presenta un espesor aproximado de 120 m.

- **El miembro limolítico superior (Kims)**

Se observa en el carretable Palermo-Paipa en los alrededores del sitio Los Medios, y se extiende igualmente que el miembro conglomerático inferior hasta la parte Este de Sotaquirá, compuesto por limolitas con restos de equínidos y con un espesor aproximado de 60 m.

La formación aflora completa en el carreteable que de Paipa conduce a la localidad de Los Medios y hace parte de los flancos del sinclinal de Los Medios. A la Formación Los Medios se le ha asignado una edad Hauteriviana según Etayo-Serna (1968).

5.1.3.3 Formación Tibasosa (Kit). Esta unidad fue descrita por Renzoni (1981) y cartografiada por Renzoni, Rosas, & Etayo (1983), la Formación Tibasosa yace discordantemente sobre la Formación Cuche y concordantemente bajo la Formación Une, se divide en tres miembros bien diferenciados por estos mismos autores en la geología del bloque J-12 quienes describen el primer miembro o miembro basal (Kit4) como una secuencia de rocas que en su base presentan un conglomerado heterogéneo mal gradado, seguido por conglomerado homogéneo, luego por limolitas verdes y moradas y por arenisca a veces conglomeráticas con estratificación entre cruzada; un miembro inferior (Kit3) de shales negros, calizas más o menos arenosas; un miembro arenáceo intermedio (Kmt2) de shales grises oscuros y areniscas y un miembro calcáreo superior (Kmt1), que aflora al SE de Paipa, compuesto por shales grises oscuros, calizas y areniscas, ricos en restos fósiles que les permite datar la unidad como Albiano medio a Albiano superior en el Cretácico inferior. Estos autores calculan para este miembro un espesor de 132 m a 150 m.

5.1.3.4 Formación Une (Kiu). Renzoni (1981), describe la Formación Une como una sucesión de 510 m de areniscas localmente conglomeráticas intercaladas con shales negros algunos con presencia de fósiles que permitió datar la formación en el área con una edad de Albiano superior a Cenomaniano, regionalmente la Formación Une yace sobre el miembro superior de la Formación Tibasosa (Kmt1) y bajo las capas calcáreas de la Formación Churuvita.

La Formación Une se presenta al Suroriente de la región de Paipa, más localmente se observan múltiples afloramientos en un carreteable que se deriva de la vía que conduce de la

localidad de Pantano de Vargas hacia el municipio de Firavitoba. En los afloramientos se observan capas de 20-50 cm de arenisca presentando un tamaño de grano de grueso a medio y de redondeadas a subangulares bien seleccionado, con una composición mineralógica general de Cuarzo y Micas (Moscovita), alternándose con paquetes de lodolitas limosas de color gris claro que se presentan en láminas que van desde pocos milímetros hasta 2 cm con bastante fracturamiento en estructura plana paralela discontinua. En algunos niveles la Formación Une puede presentarse como conglomerática, además de esto presenta laminación cruzada en niveles arenosos delgados de grano fino. La Formación Une se presenta en la zona con una morfología predominantemente dura alomada a escarpada, se observan pendientes suaves conformando pendientes medias de erosión que contrasta con la geomorfología suave de los depósitos residuales. En la zona sur-oriental del municipio de Paipa esta se encuentra en contacto concordante con la Formación Tibasosa y en contacto discordante con un depósito volcánico piroclásticos (vulcanitas).

5.1.3.5 Formación Churuvita (Ksch). Está definida en la región de Sáchica-Tunja por Etayo (1965), la Formación Churuvita está constituida por una arenisca basal de 105 m de espesor, por una alternancia en la parte intermedia de areniscas, arcillolitas y calizas con alto contenido fósil, de 75 m y por una parte superior de arenisca y caliza de 225 m. Se pueden encontrar capas de glauconita de granos de tamaño medio, de composición principalmente cuarzo, de granos subangulares a subredondeados. La edad de la Formación Churuvita se determinó en Cenomaniano – Turoniano debido a que se encuentra sobre una capa con contenido fósil del Albaniano. Su espesor es de aproximadamente 470 metros. Esta formación se encuentra aflorando en una pequeña franja localizada en el costado oriental del municipio de Paipa en la vereda conocida como venta de llanos.

5.1.3.6 Formación Conejo (Kscn). Esta Formación propuesta por Renzoni (1981), está compuesta por una sucesión de 80 m de shales gris oscuros con delgadas intercalaciones de arenisca, 170 m (Miembro Cucaita según Etayo), de arcillas grises y amarillentas con grandes nódulos calcáreos en la parte inferior y 120 m de shales grises oscuros, areniscas y calizas con ostras. La Formación Conejo aflora en la parte nororiental de la zona de estudio en el sector de Loma Paja Blanca, al occidente se encuentra en contacto concordante con la Formación Churuvita y al oriente en contacto fallado con la misma formación. Se presenta en el afloramiento en un paquete de lodolitas negras cuyo espesor va de unos pocos milímetros hasta 5 cm aproximadamente, presenta una estructura plano paralela continua, sobre el cual se ubica una arenisca de grano fino a medio de color gris claro, subredondeados, cuya composición mineralógica es cuarzo y líticos compactos. Según datación fósil la formación conejo tiene una edad de Coniaciano a Santoniano según Etayo-Serna (1979).

5.1.3.7 Formación Plaeners (Kg2). Según Renzoni (1981), esta unidad se correlaciona con parte del Grupo Guadalupe de la Sabana de Bogotá, la columna tipo de esta formación se describió en el trayecto Sáchica-Tunja, se compone por una secuencia de 50 m de delgadas capas de porcelanitas, chert y esporádica fosforita, en el sector de Paipa se compone de unos 100 m de arcillas grises a blancuzcas un poco caoliníticas. La Formación Plaeners se encuentra aflorando en la carretera que de las piscinas municipales de Paipa se dirige a la piscina olitas, la Formación Plaeners se caracteriza por presentar amplios niveles de liditas con presencia de cherts intercalados por delgadas capas de lodos. Esta formación en la zona de Paipa presenta un espesor de aproximadamente 120 m, ocasionalmente con presencia de turquesa. Se pueden encontrar bancos de arenisca de grano fino afectado plegamiento y por erosión. En otras secciones fuera del área la formación incluye niveles de porcelanitas, shales y fosforitas.

5.1.3.8 Formación Los Pinos (Klp). Etayo (1965), describen que la unidad está compuesta por “lodolitas negras, con interstratificaciones lenticulares de calizas fosilíferas, limolitas silíceas y arenitas.” (p. 186)

La Formación los Pinos se caracterizan por contener paquetes de lodolitas fisibles, con delgadas intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino con cemento silíceo y hacia la base amplios niveles de calizas lumaquelicas. Esta formación se encuentra aflorando dentro del área de estudio, poniendo en contacto con rocas de la formación Plaeners, mientras que hacia el techo se encuentra en contacto con las rocas de la Formación Arenisca Tierna hacia el sector SW del área de estudio, las rocas se encuentran expuesta en una franja de dirección NE-SW con un viraje hacia el norte, en el sector conocido como la quebrada El Tunal, y sector Los Pantanos, al igual que en el sector de La Sevilla y La Laguna sobre una franja de dirección E-W y que posteriormente adquiere una orientación NE-SW. La Formación Los Pinos presenta un espesor aproximado dentro del área de estudio equivalente a 120 mts de espesor. Se ha aproximado una edad geológica dentro del Coniaciano y Campaniano según Fabre (1986).

5.1.3.9 Formación Labor y Tierna (Kg1). La formación labor y tierna fue descrita por Renzoni (1981), en el sector de Samacá- Combita como una sucesión de 49 m inferiores de shales que contienen Foraminíferos y 10 metros superiores de arenisca que presentan una morfología alomada y algunos escarpes, Consta de una parte inferior de lutitas amarillas y grises, siguen lutitas con intercalaciones de areniscas cuarzosas blancas de grano fino a medio y una parte superior con bancos potentes de areniscas cuarzosas, de color claro de grano medio, generalmente friables, denominada Arenisca Tierna. Los afloramientos de la formación Labor y Tierna de más fácil acceso se observan en la carretera que de Paipa conduce a pantano de Vargas, se observa una serie de capas de arenisca de grano fino a medio, los cuales presentan un

rango de redondeado a subredondeado, muy deleznable, suprayaciendo estas capas, se observa un paquete de arcillolitas de color blancuzco a gris claro muy plástica en láminas que van de milímetros hasta 5 cm de espesor.

5.1.3.10 Formación Guaduas (Ktg). La Formación Guaduas fue descrita por Renzoni (1981), en el sector de Chivata-Toca por la quebrada la Carbonera, corresponde a una sucesión de arcillas grises y esporádicas areniscas friables de 250 m de espesor mal expuestas; unos 270 m de arcillas grises, arenisca friable y carbón; al techo 50 m de arcillas verduzcas y violáceas y arenisca. Se presenta en los afloramientos como pequeños paquetes de lodolitas con una capa carbonosa de color gris oscuro en láminas de pocos milímetros de espesor, presenta una estructura plano paralelo continuo con un elevado grado de fracturamiento. Las exposiciones de la Formación Guaduas, al Norte de Paipa en la vereda El Tunal están perturbadas por efectos de la Falla de Boyacá. Presenta pendientes suaves conformando pendientes bajas de erosión que contrasta con las geformas suaves de los depósitos residuales.

La formación Guaduas yace sobre la formación Labor-Tierna y constituye la transición del Cretáceo marino al Terciario continental, subyace de manera discordante con Formaciones del Terciario. En su mayor parte es de edad Maestrichtiano Superior, siendo el conjunto superior, bancos de arenisca de color rojo ya del Paleoceno.

5.1.4 Terciario. A continuación, se plasman las formaciones presentes.

5.1.4.1 Formación Bogotá (Tb). Stutzer (1942), denominó “piso de Bogotá” a los sedimentos equivalentes al “terciario” medio en Cundinamarca y Bogotá.

Esta formación aflora como una unidad relativamente dura en los cerros al W de Paipa en el sector conocido como Vereda Miraval y la Vereda el Salitre. Se trata de areniscas cuarzosas y de líticas en capas delgadas a medias con estratificación ondulada no paralela continua a

lenticular, con grano fino a grueso, subangular a subredondeado. Son friables e inmaduras en su mayoría y se encuentran intercaladas con capas medias de limolitas y arcillolitas de color gris a crema; presentan abundantes óxidos rojizos. No es posible establecer un espesor en la zona, entre otros aspectos por estar cubierta discordantemente por la Formación Tilatá. Renzoni (1981), correlaciona la base de esta unidad con la Arenisca del Cacho (Formación Cacho) de la Sabana de Bogotá para inferir también una edad paleocena.

5.1.4.2 Formación Tilatá (Tst). Scheibe (1937), Describe conjunto de areniscas de grano grueso con lechos de gravas, primer autor que utiliza el término “Formación Tilata para referirse a un conjunto de areniscas especiales, encontrada sobre formaciones Guadalupe y Guaduas por superposición discordante más reciente y muy probablemente de edad terciaria que afloran en la hacienda Tilatá en la represa del Sisga.

Esta unidad está ampliamente distribuida a lo largo del Altiplano Cundiboyacense hasta Duitama. En la zona aparece en las partes bajas cercanas al Lago Sochagota y con morfología suavemente alomada al E de La Casona, hacia la Vereda Cruz de Murcia. La unidad se compone predominantemente de niveles arenosos en capas medias a gruesas, intercaladas con limolitas y arcillolitas abigarradas. Las arenas son cuarzosas, bien seleccionadas, muy friables y de grano que varía de grueso a fino, redondeado a subredondeado. Son comunes los óxidos de hierro tanto en los niveles duros como blandos. Se presentan capas de lignito, explotados en la zona como carbón de regular calidad. Renzoni (1981), calcula un espesor en el área de 150 m y reporta una edad del Plioceno a Pleistoceno calculada por Van Der Hammen a partir de palinología de muestras de lignitos.

5.1.5 Neógeno. A continuación, se plasman las formaciones presentes.

5.1.5.1 Vulcanitas (NgQv). Renzoni (1981), identifica al sur de Paipa, en la localidad de Olitas, dos cuellos volcánicos de tipo andesítico, que de acuerdo al autor cruzan la formación Churuvita y la Formación Conejo y subyacen a la formación Tilatá. (Cabecera de la quebrada Olitas).

Este tipo de depósitos se encuentran ampliamente distribuidos dentro del área del municipio de Paipa y están compuestos en su mayoría por cenizas volcánicas y material de origen aluvial. La ceniza se encuentra conformando la matriz de los materiales presentes en el depósito. El material aluvial se encuentra conformado por cantos angulares a subangulares de más de 6 cm de diámetro de areniscas y líticos. La mayoría de los afloramientos presentan un espesor de 20 a 80 m. En la localidad de Olitas, al sur de Paipa, afloran dos cuellos volcánicos. Las rocas presentes se encuentran constituidas por traquitas y riolitas. Por la alta meteorización dan una apariencia de aglomerados vulcano-sedimentarios, este hecho indica que la roca ígnea de Paipa es posterior al aluvionamiento pliocénico y precede la depositación Tilatá, lo que puede estar confirmado por la fuerte acción hidrotermal presente en los sectores de Pantano de Vargas, Paipa y Toca, donde hay mineralizaciones de hidróxidos de hierro, travertino, caolín, etc. En el caso de los pequeños yacimientos de mineral de hierro de Pantano de Vargas y Toca, el metasomatismo no solo afecta a las areniscas cretáceas sino a los mismos conglomerados del aluvial antiguo.

Estos depósitos se encuentran ocupando una extensa área localizada en la parte central del municipio de Paipa.

5.1.6 Cuaternario. A continuación, se plasman los depósitos presentes en la zona de estudio.

5.1.6.1 Depósitos cuaternarios aluviales (Qal). Son depósitos fluviales constituidos por

cantos heterométricos semirredondeados de areniscas, embebidos en una matriz areno-arcillosa; caracteriza las planicies en la vecindad del Río Chicamocha y parte del sitio del casco urbano de Paipa, generalmente forman conos de deyección con terrazas levemente inclinadas, cuyas alturas no superan los 5 m y originadas durante los súper-flujos de las quebradas y ríos.

5.1.6.2 Depósitos cuaternarios coluviales (Qc). Depósitos producto de deslizamientos de materiales de diferentes tamaños y composiciones. Los depósitos coluviales cubren la mayoría de las laderas de los valles, formando los respectivos taludes, constituidos por acumulaciones de bloques subangulares, de dimensiones variables, embebidos en matriz areno-arcillosa. En muchos casos son terrenos mixtos coluviales con morrénicos o aluviales, por causa de sucesivos movimientos en masa.

5.2 Geología estructural regional

Debido a la orogenia andina, esta sección de la cordillera Oriental fue sometida a esfuerzos regionales que se manifiestan en una tectónica muy compleja, que ha originado extensas fallas compresionales y de distensión, lo cual dan a la zona unas características especiales, a zonas fracturadas de muy baja estabilidad, desórdenes y repetición estratigráfica. Los pliegues y fallas presentan una dirección preferencial SW - NE la cual corresponde a la directriz tectónica normal para la Cordillera Oriental en el centro del Departamento de Boyacá. (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

La región de Paipa está caracterizada por dos provincias morfoestructurales contrastantes. Hacia el Norte de la Falla de Boyacá se destaca un Bloque tectónico levantado, el cual se identifica el sinclinal de los medios y el Anticlinal de Arcabuco. Hacia el Sur de la falla de Boyacá se observa un bloque tectónico deprimido de paisaje ondulado, correspondiente al llamado Bajo Estructural o depresión del Río Chicamocha. Mientras en el Bloque Norte se

presentan estructuras plegadas amplias y básicamente constituidas por rocas de Jurásico y Triásico, en el Bloque Sur, es decir la depresión del Chicamocha, son notorios los plegamientos cortos y estrechos y estructuras plegadas volcadas por acción de gravedad.(Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

5.2.1 Fallas.La zona de estudio se encuentra afectada por fallas de carácter regional y local en las que se referencian:

5.2.1.1 Falla de Boyacá.La falla de Boyacá limita estructuralmente dos providencias tectónicamente diferentes: La provincia de Arcabuco que constituye el bloque colgante de la falla y está dominada por pliegues amplios y la provincia estructural de Paipa dominada por un sistema de cabalgamiento con vergencia SE y que comprende el bloque yacente de la falla. Localmente la Falla de Boyacá presenta cambios en el rumbo a través de cortos desplazamientos perpendiculares a su rumbo, ese tipo de estructura se denomina falla de desgarre y su función es acomodar desplazamientos diferenciales a lo largo de las fallas generando zonas de transferencia. (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

Es una estructura de carácter inverso que discurre al noroccidente presentando un rumbo general NE – SW y pone en contacto rocas de edad Jurásico, cretácico con unidades del Paleógeno y Neógeno, según Renzoni (1981), la falla está cubierta en gran parte de su trazo por la Formación Tilitá y los depósitos cuaternarios, de tal forma la falla de Boyacá nace en las inmediaciones del Manzano y se dirige hacia el noreste, la cual pone en contacto rocas del final del Jurásico con rocas de Cretáceo superior, Formación Guaduas. La falla ejerce un control estructural en el sector, y a finales del terciario se deposita la Formación Tilitá, la cual fosiliza la falla. (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

5.2.1.2 Falla El Curial.La falla El Curial se localiza al Sur del corregimiento de Palermo,

y presenta una tendencia N10°E. Brechas, escarpes de falla y dislocaciones en estratos constituyen evidencias de la falla, la cual está asociada a otros lineamientos de similar tendencia que podrían constituir la extensión de la misma. Toda esta zona asociada a la falla y otros lineamientos se ha denominado como la zona de fracturamiento de Palermo. (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

5.2.1.3 Fallas menores. Son fallas de carácter local las cuales en su mayoría son transversales a su directriz tectónica de estructuras principales, presentan pequeños desplazamientos acompañados de fracturamiento e incremento en rumbo y buzamientos y generando cambios morfológicos considerables y se reconocen por los pequeños cortes en estructuras que han dado paso a esporádicas corrientes o quebradas. (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

5.2.2 Pliegues y Estructuras. A continuación, se plasman la geología estructural presentes a nivel regional.

5.2.2.1 Anticlinal de Arcabuco. El anticlinal de Arcabuco constituye un pliegue cuyo eje se orienta según tendencia N78E y afecta rocas del Triásico – Jurásico y cretácicas. Su origen se asocia al levantamiento final andino que dio lugar a la cordillera oriental en el Terciario. El pliegue es amplio y se extiende más hacia el occidente, fuera del área; generalizado, el flanco sur presenta aproximadamente 20 grados de buzamiento mientras en su flanco Norte presenta 15 grados de buzamiento. Su núcleo erosionado descubre rocas del Triásico y está caracterizado por valles fluviales relativamente profundos de los ríos Cuestano y Chontal. (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

5.2.2.2 Sinclinal de Los Medios. El sinclinal de Los Medios es un pliegue asimétrico, amplio, con ángulo interlimbo de 100°, su eje tiene una dirección y cabeceo promedio de 220°

(N40°E) y 10° respectivamente. Presenta geometría tipo kink con tres dominios de rumbo definidos. En general el pliegue se comporta de forma cilíndrica. (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

Estos dos pliegues están asociados genéticamente con la falla de Boyacá, por lo cual se disponen de manera paralela o sub-paralela a su trazo. Esto indica que la dirección de transporte tectónico de la falla es igual a la dirección de máximo acortamiento de estos pliegues. El plegamiento involucra unidades jurásicas y cretácicas.

5.2.2.3 Estructuras menores. Lo conforman sinclinales y anticlinales de menor dimensión que deben su origen al alto tectonismo que afectó la cordillera oriental, como el anticlinal de Tibasosa – Toledo, el Sinclinal de Tunja, el anticlinal de Samacá, el anticlinal que pasa entre Puente Boyacá y Ventaquemada y se prolonga hasta Combita, entre Boyacá y Turmequé cortos y estrechos sinclinales y anticlinales. (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000)

5.3 Geomorfología

El municipio de Paipa presenta cuatro ambientes geomorfológicos (Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá, 2000); el denudacional se localiza principalmente al norte del municipio, hacia el sector de Palermo desarrollando unidades tipo laderas erosionadas y escarpes denudacionales, sobre rocas del triásico superior de la Formación Palermo (TrJp) y rocas jurásicas la Formación Montebel (Jlm). Al norte del casco urbano en las veredas Los Medios y Los Colorados, se encuentran laderas erosionadas, desarrolladas sobre una secuencia cretácica constituida por las Formaciones Ritoque (Kiri), Los Medios Superior (Kims) y Los Medios Inferior (Kim), y las rocas jurásicas de la Formación Arcabuco (Jar).

El ambiente estructural se encuentra tanto en la zona sur del municipio en las veredas La Playa, El Tunal y Venta de Llanos, mostrando geformas tipo cuchillas y lomerío con moderado

grado de disección, desarrolladas sobre rocas cretácicas de la formación Labor y Tierna (Kg1), Los Pinos (Klp) y Conejo (Kscn) y sobre rocas recientes del neógeno. Al norte del municipio, al occidente del sector La Hondura, en la vereda Guacamayas, se presenta una cuchilla con disección moderada, desarrollada sobre rocas jurásicas de la Formación Arcabuco.

El ambiente glacial se presenta principalmente al norte de Paipa, al norte de la vereda Guacamayas, en los sectores Gaital, El Chuscal y Santa Elena, se observan circos glaciales, planicies glaciales y conos fluvio-glaciales, sobre rocas jurásicas de la Formación Montebel (Jlm). En menor proporción se encuentra laderas glaciales al sur del municipio, en las veredas De Toches y Pastoreo en rocas Neógenas.

El ambiente Fluvial está relacionado directamente con depósitos cuaternarios de tipo aluvial generados por la dinámica fluvial de los ríos Piedras, Chicamocha y Quebrada Honda Grande.

5.4 Geología Local

En la zona de estudio afloran materiales rocosos correspondientes al Paleógeno y al Neógeno, representado por las formaciones; Bogotá (Pgb) y Tilatá (NgQt), respectivamente.

Predominantemente, en el área de trabajo, se presenta un depósito cuaternario (Q) integrado por arenas, limos y arcillas, producto de la actividad más reciente de tipo fluvio-lacustre, materiales que estarían suprayaciendo discordantemente a la Formación Tilatá (Figura 4).

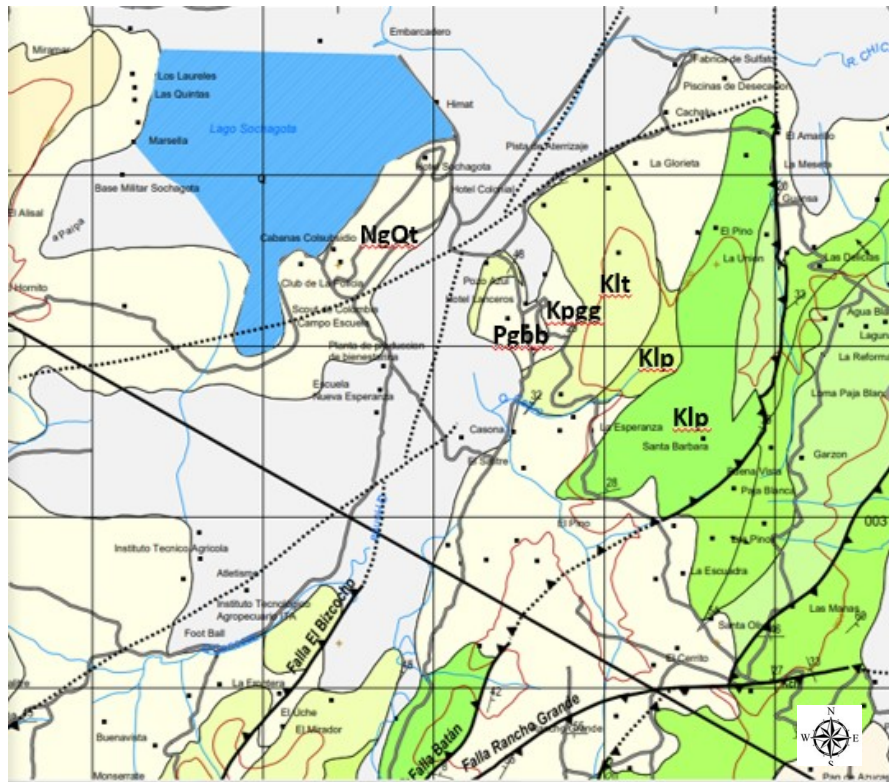


Figura 4. Geología Local, Plancha geológica 171. Fuente.Ingeominas hoy Servicio Geológico Colombiano,mostrando las unidades geológicas existentes en la zona de estudio.

5.5 Geología estructural local

Estructuralmente la zona de estudio se encuentra influenciada por las fallas el Bizcocho y el Hornito (Figura 5), las cuales no son evidenciables las mismas están cubiertas por el depósito cuaternario. Las fallas fueron reveladas por medio de la magnetometría, este método busca anomalías por la variación de las propiedades magnéticas de las rocas, en especial las zonas de falla presentan anomalías magnéticas ya que al generarse el rompimiento y desplazamiento de la roca se generan discontinuidades donde se pueden alojar minerales ferromagnéticos, y más aún en el sector de Paipa donde existe flujos hidrotermales que pueden transportar dichos minerales desde los cuerpos ígneos y en su recorrido depositarlos en las discontinuidades que encuentre a su paso.

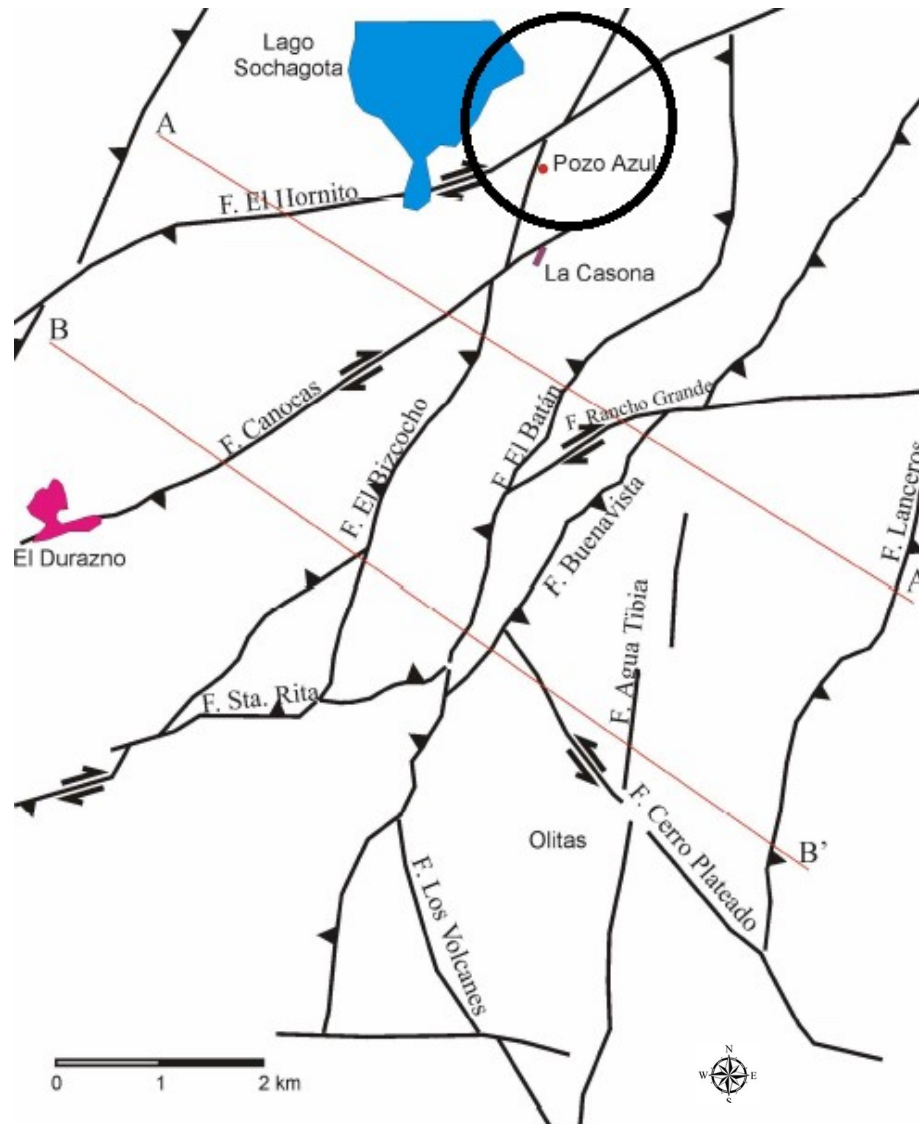


Figura 5. Esquema estructural con fallas longitudinales NNE, fallas transversales NW y NE. La circunferencia en color negro muestra el área de estudio. Fuente: Ingeominas hoy Servicio Geológico Colombiano.

6. Materiales y métodos

6.1 Metodología

El proceso metodológico tenido en cuenta en la elaboración y ejecución del proyecto fue el siguiente:

6.1.1 Recolección de información existente. Recopilación de información de estudios realizados en la Universidad Nacional y el Servicio Geológico Colombiano, sobre características de las aguas, prospección geotérmica y geofísica realizadas en el municipio de Paipa.

6.1.2 Etapa de campo. Geología, recopilación de muestras de aguas para análisis de laboratorio, prospección geofísica mediante Geoeléctrica y Magnetometría. Realización de 2 perforaciones mediante barreno manual de 10 y 15 metros de profundidad respectivamente.

6.1.3 Etapa de laboratorio. Análisis de muestra de agua para su posterior clasificación (conductividad eléctrica, potencial de Hidrogeno, determinación de metales, determinación de carbonato, cloruro sulfato, isotopos, nitrito, nitrato, fosfato y amonio, caracterización de núcleos extraídos en la perforación (descripción mineralógica, clasificación petrográfica para armado de columna estratigráfica)

6.1.4 Etapa de oficina. Análisis de datos recopilados, construcción de perfil geológico, Columna litoestratigráfica, realización del modelo Hidrogeológico.

6.1.5 Informe final. En esta etapa, se plasman los resultados alcanzados durante las distintas etapas de la investigación, en un documento sintetizado, y con la ayuda de tablas, figuras y mapas.

7. Prospección directa e indirecta

7.1 Prospección Geoeléctrica

En la prospección geoeléctrica, se utilizaron los equipos de resistividad, marca ABEM Terrameter de la serie LS (Foto 1), consistente en un amperímetro y un voltímetro digitales, así como una unidad generadora, que permite introducir la corriente en el subsuelo, todo integrado en un solo dispositivo con la adición de un monitor para la configuración y programación del equipo, y para obtener con posterioridad la curva de SEV en tiempo real. El equipo permite la introducción de los factores geométricos exclusivos para cada arreglo, por lo que la obtención de la resistividad aparente es automática, de manera similar obtiene la relación entre la diferencia de Potencial y la Intensidad de Corriente ($\Delta V/I$), y después la multiplica por la constante geométrica, la cual depende de la distancia entre electrodos de Corriente (A y B) y de Potencial (M y N) exclusivos para cada arreglo, Al terminar el equipo muestra en la pantalla, un gráfico de resistividad aparente en función de $AB/2$ (Figura 6).



Figura 6. ABEM Terrameter LS. El dispositivo utilizado fue el Schlumberger, con variación de electrodos de potencial desde 0.5 hasta 200 metros. La distancia $AB/2$, varió desde 1.5 hasta 300 metros. La figura 5, es una representación del arreglo de Schlumberger.

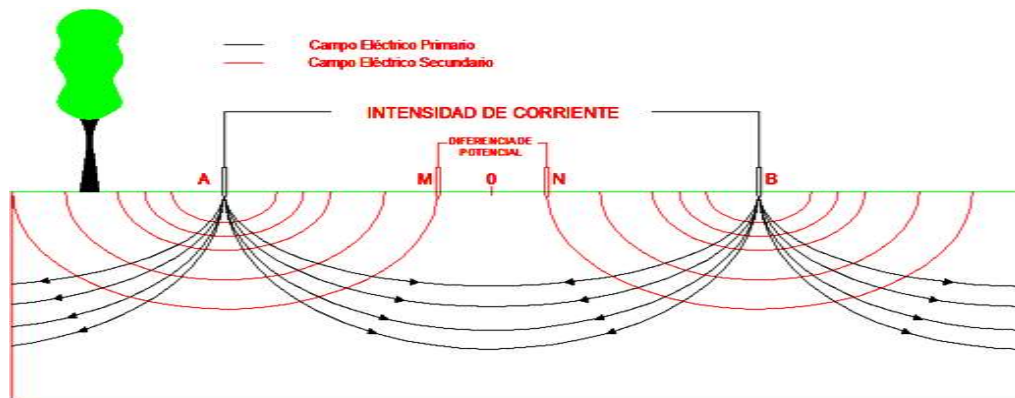


Figura 7. Dispositivo Schlumberger. Fuente.

http://revistas.upte.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/3441

El cálculo y la determinación de las resistividades aparentes y las profundidades se realizó mediante el programa de uso libre, IPI2WIN, desarrollado por la universidad de Moscú, ingresando los datos de $AB/2(m)$ y las resistividades aparentes ($ohm \cdot m$) suministradas por el equipo. Posteriormente el programa busca el modelo teórico que más se acerque al experimental. Arrojando las resistividades y espesores correspondientes obteniendo de esta forma modelos de capas geo eléctricas para cada SEV.

7.1.1 Leyes que limitan la geoelectrica. Como todas las ciencias físicas la geoelectrica, tienen una serie de leyes que, en un momento determinado, pueden ser contraproducentes al resultado final de interpretación sino se tienen en cuenta. Estas leyes a grosso modo dicen lo siguiente:

✓ **Ley de la Equivalencia.** Una capa de espesor pequeño y alta resistividad, puede ser equivalente a una capa de espesor moderado y resistividad moderada. Estos efectos se minimizan, teniendo datos de litología, que permitan conocer el espesor real de las capas. (Arias, 1999)

✓ **Ley de la Supresión de Capas.** Se presentan dos clases de supresiones: la más importante dice: si la resistividad inicial es muy alta y de espesor importante, muchas capas

delgadas pueden quedar suprimidas mientras la resistividad baja. Así mismo dice que a ciertas profundidades, cuando los espaciamientos aumentan, capas delgadas pueden quedar suprimidas o promediadas. Para minimizar estos efectos se utilizan registros eléctricos de pozo. (Parasnis, 2012).

✓ **Efectos de la Inclinación del Basamento.** Cuando capas inclinadas, se encuentran cubiertas por capas horizontales, como depósitos aluviales; si la dirección del sondeo eléctrico no coincide con la dirección de los estratos, se pueden presentar errores en los parámetros geofísicos obtenidos. (Parasnis, 2012)

7.1.2 Sondeos eléctricos verticales y su interpretación. Se realizaron un total de cinco (5) Sondeos Eléctricos Verticales (Figura 8 y Tabla 1), en el municipio de Paipa.



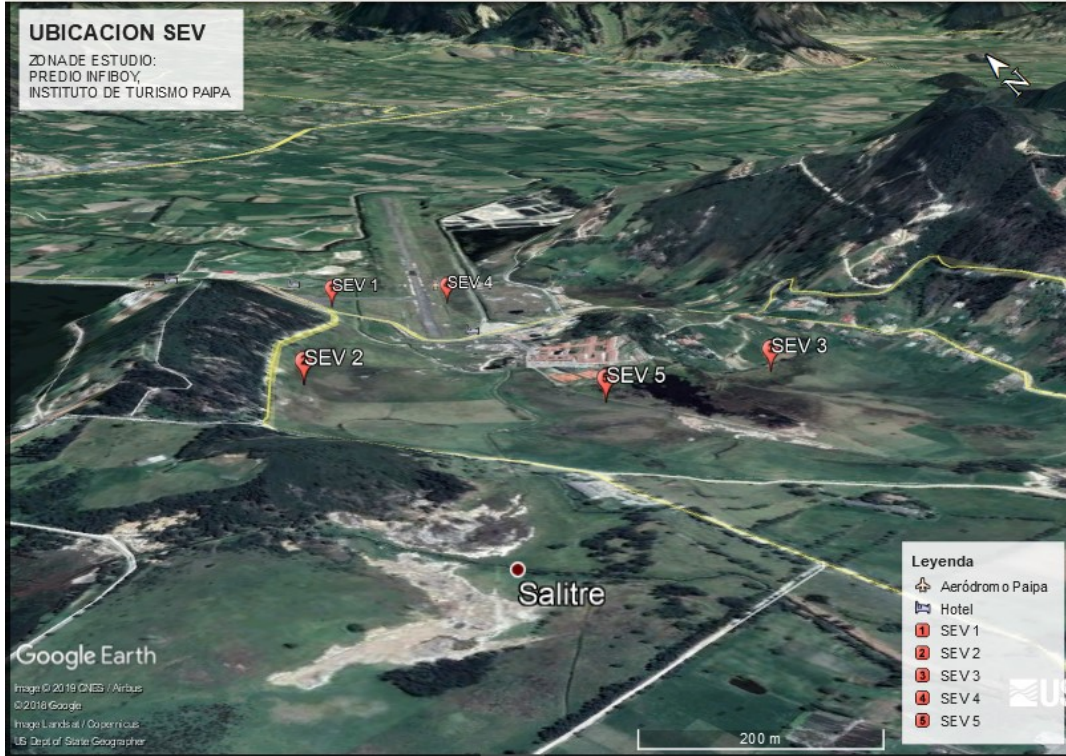


Figura 8. Ubicación de SEV, vista en planta y vista SW-NE. Fuente. Google Earth.

Tabla 1

Datos de campo de Sondeo Eléctrico Vertical

	pa (ohm-m)				
AB/2 (m)	SEV 1	SEV 2	SEV 3	SEV 4	SEV 5
1.5	28	20.5	247.8	41.22	249.27
2.5	20.1	20.5	302	31.47	312.13
4	15.5	18.2	340	24.49	326.49
6	14.8	17.5	249.8	22.68	285.28
8	15.5	16.3	196.5	22.68	254.94
10	15.5	15.6	218.8	22.68	227.82
12	16.8	15.3	234.3	23.8	217.8

15	17.1	14.1	256.6	23.8	217.8
15	16.8	15.9	209.6	24.03	233
20	18	14.3	243.5	24.73	249.27
25	19	13.4	268.7	24.26	272.73
30	18	12.9	284.3	21.82	312.13
30	17.7	12.5	279.7	21.82	339.2
40	18.1	11.5	314.3	22.46	349.28
50	18.8	11.5	324.2	22.68	341.51
60	19.2	11.8	340.2	22.46	341.51
75	19.6	13	303	20.2	298.4
75	19.4	12.6	303.1	20.4	260.74
100	20.2	13.9	267.6	20.99	212.96
125	20.9	14.8	233.3	24.73	170.07
150	21.3	16.6	150	23.12	142.06
150	21	16.2	158.8	25.7	118.67
175	21.8	17.2	130.2	26.46	88.59
200	22.7	19.9	105.6	25.21	70.74
225	23.4	20.6	86.1	26.97	88.59
225	23.5		84.2	26.97	64.66
250	24.4		62.1		52.81
275			49.6		52
300			33.1		

Tabla 2

Rangos de resistividad asociados a las unidades geológicas presentes en el área

UNIDAD GEOLOGICA	CARACTERIZACION GEOELECTRICA
Formación Une (Ku)	Presenta capas de alta resistividad (mayores a 8000 Ω.m) intercaladas con otras de menor valor (100-200 Ω.m) relacionables con la alternancia de areniscas y shales descrita en la columna litológica
Formación Conejo (Kc)	Resistividad menor a 25Ω.m llegando hasta 4 Ω.m en profundidad, concordante con la predominancia de shales y posibilidad de saturación con agua salobre en profundidad, SEV realizado en el sector de "La Playa" cerca a la piscina "El Delfin".
Formación Plaeners (Kpl)	Resistividad baja a media (10 a 250 Ω.m)
Formación Los Pinos (Klp)	Predominancia de resistividad baja (10-50 Ω.m) relacionada con shales y media (150-270Ω.m) con areniscas.
Formación Labor y Tierna (Kit)	Resistividad media-alta (400-600 Ω.m) relacionada con areniscas, llegando a ser muy alta en superficie (más de 2000 Ω.m) por disminución en la saturación de agua.
Formación Guaduas (KPgg)	Resistividad baja predominante (menor a 50 Ω.m) para las arcillolitas y media (100-400 Ω.m) para niveles más arenosos
Formación Bogotá (Pgb)	Resistividad muy alta (mayor a 1500 Ω.m) correspondiente con areniscas con baja saturación.
Formación Tilatá (NgQt)	Resistividad predominante de 20 a 100 Ω.m (arenas-limos), puede presentar valores hasta más de 1000 Ω.m por presencia de conglomerados.
Ignimbritas cristaló-vitreas	Resistividad baja predominante (menor a 20 Ω.m) con algunas capas de resistividad media-baja (100 a 200 Ω.m)
Miembro Vulcano sedimentario I.4	Presenta valores menores a 100 Ω.m (arenitas-limolitas) y entre 300 a 600 Ω.m (areniscas-conglomerados)
Caldas de ceniza	Presenta variaciones desde menos de 60 Ω.m (ceniza), hasta 100-300 Ω.m (lapilli)
Cuatenario	Rangos de resistividad menores a 100 Ω.m (arcilla-arena) con ocasionales capas de 100-300 Ω.m (arena-conglomerado).

Fuente. (Moyano, 2015)

A continuación, se presentan las curvas de SEV obtenidas, así como sus respectivas interpretaciones.

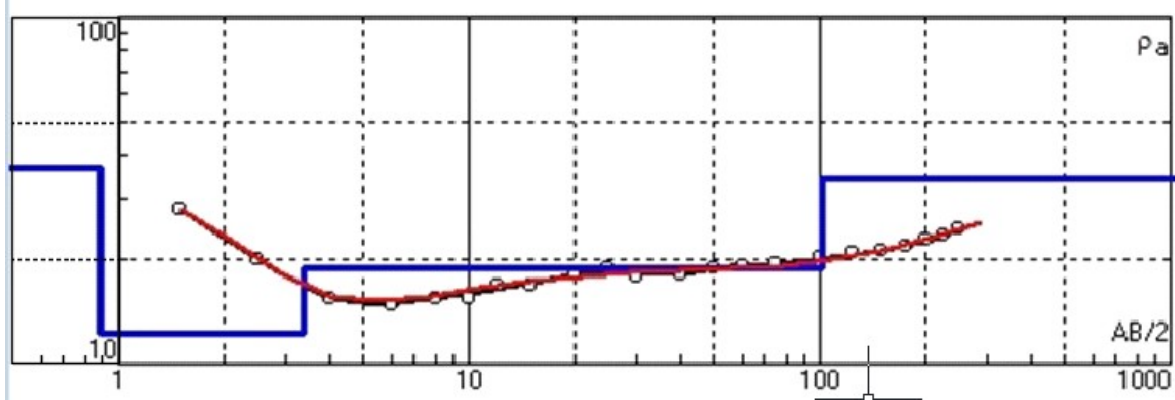
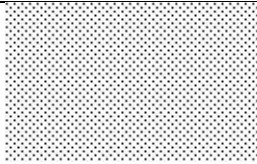
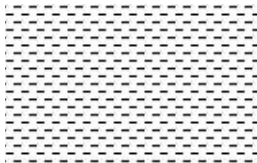
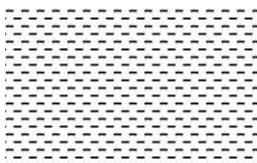



Figura 9. Curva pa vs. AB/2 (m) S.E.V. 1. Fuente. Elaboración propia

Tabla 3

S. E. V. - 1. Coordenadas: E:1107127; N:1128957. Error: 1.77%

Capa	Profundidad (Metros)	Espesor (Metros)	Resistividad aparente (Ω -m)	Perfil Litológico	
				Litología	Descripción
1	0	0.89	36.95		Limo arcilloso
2	0.89	2.45	12.23		Arcillas limosas parcialmente saturadas
	3.34				Arcillas limosas parcialmente saturadas
3	3.34	97.96	18.84		Arcillas limosas parcialmente saturadas
4	101.3	∞	34.11		Niveles limo arcillosos

Fuente. Elaboración propia

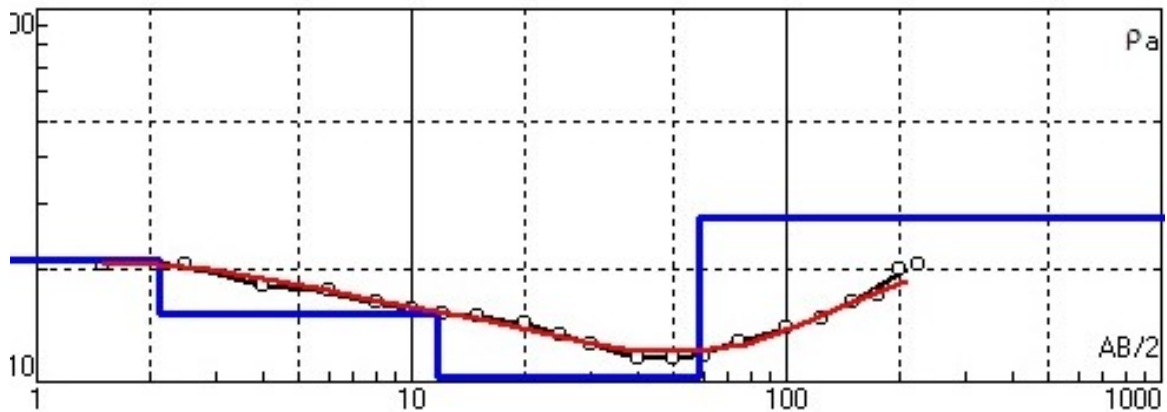
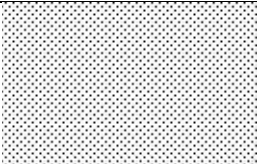
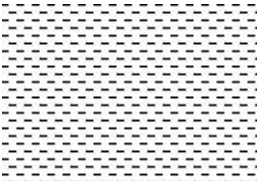
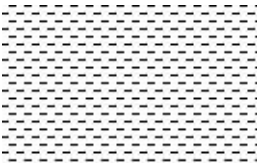
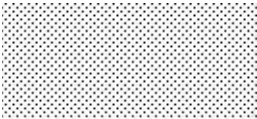


Figura 10. Curva ρ_a vs. $AB/2$ (m) S.E.V. 2.Fuente. Elaboración propia.

Tabla 4

S. E. V. - 2. Coordenadas: E: 1106729; N: 1128440. Error: 2.84%

Capa	Profundidad (Metros)	Espesor (Metros)	Resistividad aparente (Ω -m)	Perfil Litológico	
				Litología	Descripción
0	0				
1	2.14	2.14	21.30		Limo arcilloso
2	9.66	7.52	15.10		Arcillosa limosas parcialmente saturadas
3	46.7	34.9	10.30		Arcillas limosas parcialmente saturadas
4	∞	∞	27.70		Niveles limo arcillosos

Fuente. Elaboración propia

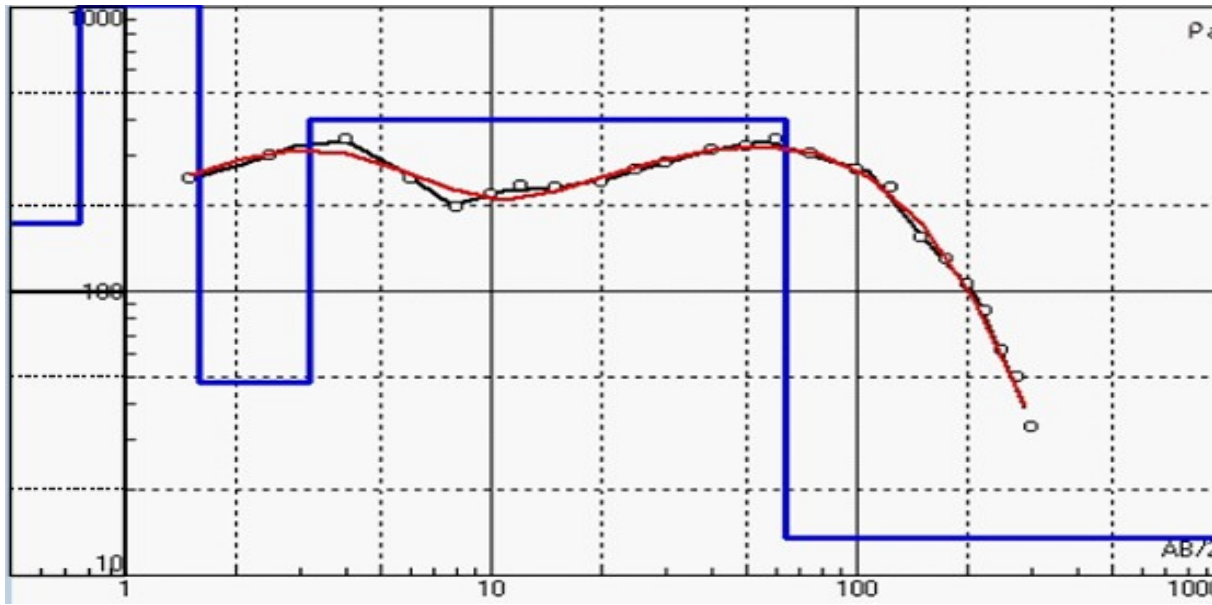

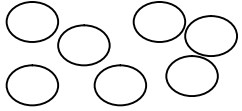





Figura 11. Curva pa vs. AB/2 (m) S.E.V. 3. Fuente. Elaboración propia

Tabla 5

S. E. V. - 3. Coordenadas: E: 1107291; N: 1128036. Error: 4.9%

Capa	Profundidad (Metros)	Espesor (Metros)	Resistividad aparente (Ω -m)	Litología	Perfil Litológico Descripción
0	0				arenas
1	0.75	0.75	173		arenas
2	0,75	0.84	1020		Gravas embebidas en matriz areno arcillosa.
3	1.59	1.62	47.80		Arenasarcillosas
4	3.21	60.59	403		Arenas compactas con alto contenido de arcillas
5	63.8	∞	13.70		arcillas saturadas

Fuente. Elaboración propia

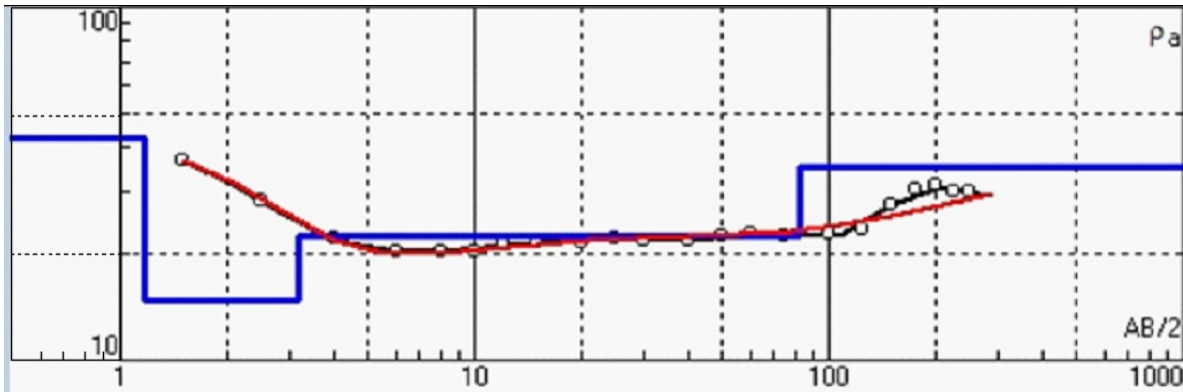


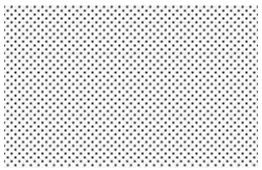



Figura 12. Curva pa vs. AB/2 (m) S.E.V. 4. Fuente. Elaboración propia

Tabla 6

S. E. V. - 4. Coordenadas: E: 1107314; N: 1128916. Error: 3.9%

Capa	Profundidad (Metros)	Espesor (Metros)	Resistividad aparente (Ω -m)	Perfil Litológico	
				Litología	Descripción
1	0	1.17	42.50		arenas
2	1.17	2.02	14.90		Arcillas limosas parcialmente saturadas
3	3.18	79.62	22.50		Niveles limo Arcillosos
4	82.80	∞	35		Arenas

Fuente. Elaboración propia

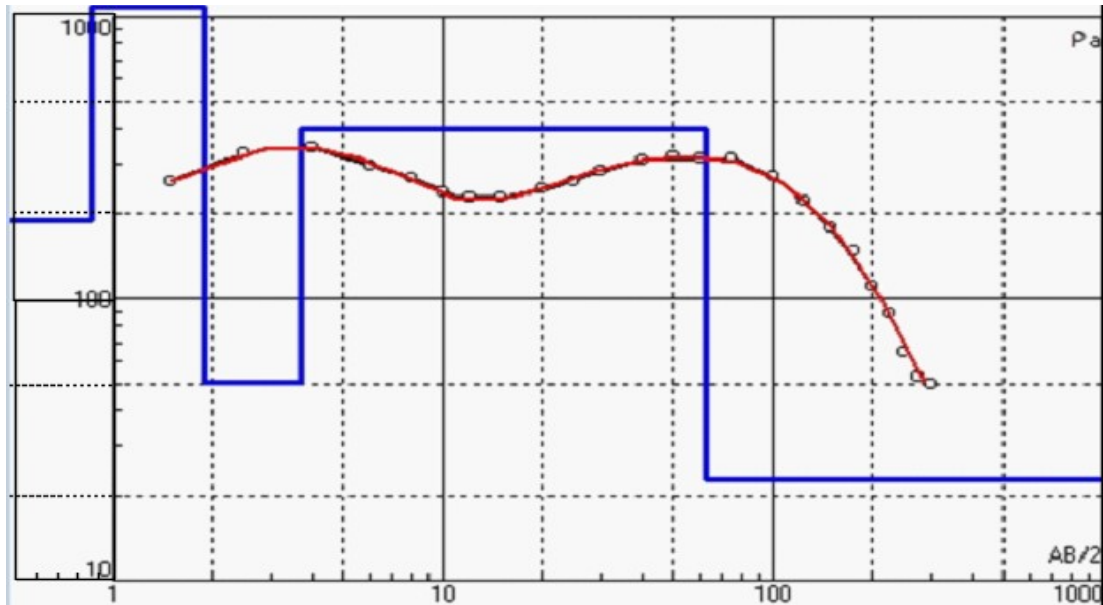

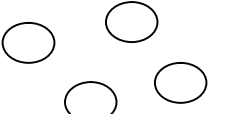

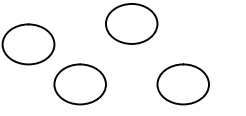



Figura 13. Curva pa vs. AB/2 (m) S.E.V. 5.Fuente. Elaboración propia

Tabla 7

S. E. V. - 5. Coordenadas: E: 1107038; N: 1128104. Error: 1.2%

Capa	Profundidad		Resistividad		Perfil Litológico	
	(Metros)	Espesor	aparente(Ω -m)	Litología	Descripción	
1	0	0.87	190		arenas	
2	0.87	1.03	1069		Gravas embebidas en matriz areno arcillosa	
3	1.9	1.85	50.80		Arenas arcillosas	
4	3.75	59.55	404.4		Arenas compactas con intercalaciones de gravas.	
5	63.3	∞	22.85		Niveles arenosos	

Fuente. Elaboración propia

Para hacer más claros los resultados obtenidos, se realizaron dos pseudosecciones de resistividad aparente, considerando la mayor cantidad de SEVS posibles, asegurando de su alineación (2, 5, 3 y 1,4) en dos (2) secciones, cuyos resultados son los siguientes.

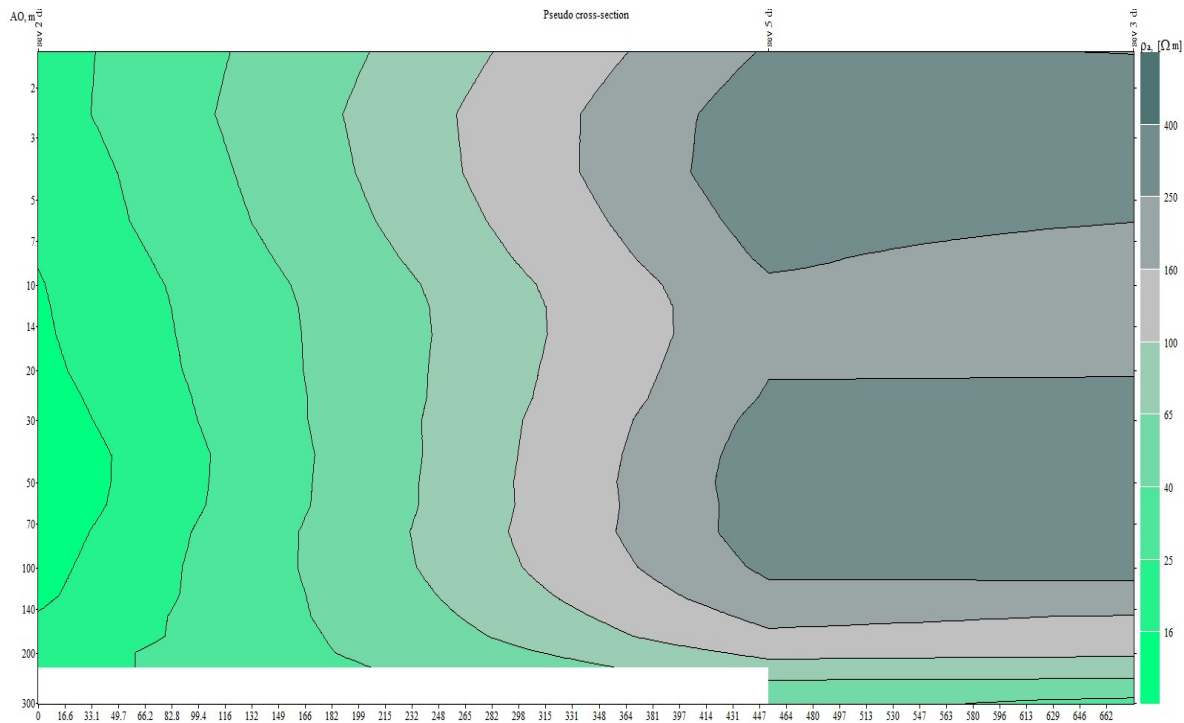


Figura 14. Pseudosección de ρ_a vs. $AB/2$ (m) S.E.V. 2, 5 y 3. Fuente. Elaboración propia

Elaborada una sección con los perfiles de los sondeos 2, 5 y 3 en dirección $N 43^\circ W$, se puede observar que los valores bajos de resistividad pueden corresponder a los niveles arenosos de la formación Tilatá y se encuentran casi en superficie en el SEV 2 (colores verdes claros). En los SEV 5 y 3, por su parte las resistividades son más elevadas en comparación al SEV 2, que pueden corresponder al depósito cuaternario.

Probablemente lo que se detalla en la Pseudosección es el contacto entre la Formación Tilatá con el depósito cuaternario, las resistividades entre 100 y 400 $\Omega\cdot m$ se deben a que dicho cuaternario está compuesto por arenas arcillosas que se caracterizan por su baja conductividad eléctrica, en algunos niveles pueden alcanzar hasta a los 1000 $\Omega\cdot m$ debido a la existencia de depósitos de gravas muy compactos.

Las resistividades más bajas entre 10 y 30 Ω -m son los niveles arenosos con intercalaciones de limolitas y arcillolitas de la formación Tilatá, esta resistividad baja puede generarse ya que contiene óxidos de hierro que permiten mayor fluidez de la corriente eléctrica en los estratos rocosos.

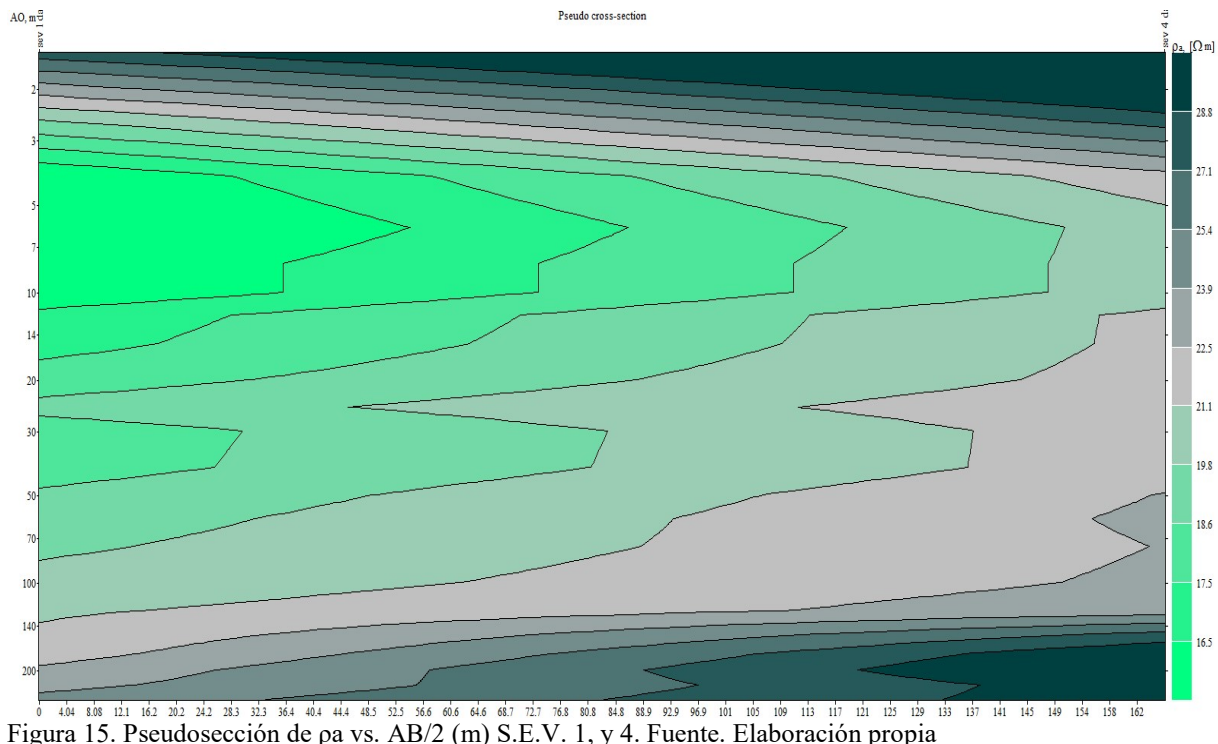


Figura 15. Pseudosección de ρ_a vs. $AB/2$ (m) S.E.V. 1, y 4. Fuente. Elaboración propia

Construyendo una sección con los perfiles producto de los sondeos 1 y 4 en dirección N 43° W y se puede ver que los valores bajos de resistividad que podrían corresponder a los niveles arenosos de la formación Tilatá que se encuentran por debajo del depósito, cerca de la superficie en el SEV 1 (colores verdes claros). En el SEV 4 son más elevadas en comparación al SEV 1, resistividad característica de los depósitos cuaternarios.

7.2 Prospección mediante magnetometría

El método geofísico de magnetometría busca anomalías provocadas por la variación de las propiedades magnéticas de las rocas. Las rocas ígneas y metamórficas presentan efectos magnéticos similares. Este método es uno de los más antiguos y el más ampliamente usado. El

método magnético tiene aplicaciones en distintos campos, en pequeñas escalas, estudios ingenieriles o arqueológicos con el fin de detectar objetos metálicos. Por otra parte, en escalas regionales para investigar estructuras geológicas regionales.

El contenido alto en minerales de hierro produce anomalías positivas y su defecto anomalías negativas. Las anomalías magnéticas detectadas a través de estudios magnéticos en el terreno se explican con variaciones en las propiedades físicas de las rocas como la susceptibilidad magnética y/o la imantación remanente de las rocas. Estas propiedades físicas sólo existen a temperaturas debajo de la Temperatura de Curie. En consecuencia, los generadores de las anomalías magnéticas pueden hallarse hasta una profundidad máxima de 30 a 40 km, dependiendo del gradiente geotérmico, esto es esencialmente, como quedó dicho, dentro de la corteza terrestre.

El método magnético puede ser aplicado de forma pedestre, en el mar o de manera aerotransportada. En la aeromagnetometría es importante, la velocidad con la que se desplaza la aeronave y la altura de vuelo. Este método es ampliamente utilizado en la búsqueda de yacimientos que contienen minerales magnéticos.

7.2.1 Fundamentos teóricos. A continuación, se plasman los fundamentos teóricos más relevantes utilizados en la magnetometría.

7.2.1.1 Magnetismo de rocas y minerales. Comúnmente las rocas poseen baja susceptibilidad magnética, las propiedades magnéticas de las rocas se debe al contenido de minerales magnéticos, los principales minerales que producen esta magnetización y las anomalías magnéticas son la magnetita y la pirrotina. Las rocas básicas y ultra básicas tienen altas susceptibilidades, las rocas ígneas ácidas tienen valores intermedios debido a que el contenido de magnetita tiende a disminuir con el aumento de la acidez; las rocas metamórficas

tienen una susceptibilidad intermedia pero también depende de la composición de la roca original. Las rocas sedimentarias son relativamente no magnéticas, a menos que contengan una significativa cantidad de magnetita en su fracción mineral. (Parasnis, 2012)

7.2.1.2 Magnetismo remanente. Algunas rocas y minerales muestran magnetización remanente o permanente cuando el campo aplicado es nulo. Con frecuencia el magnetismo remanente que exhiben las rocas no ha sido generado por el campo terrestre actual, porque la dirección contrasta con la del campo magnético de la tierra. Se deduce que las rocas ígneas adquirieron el magnetismo remanente sometidas al campo magnético existente en aquella época, una vez que se enfriaron por debajo del punto de Curie. (Parasnis, 2012)

7.2.1.3 Correcciones temporales. En estudios magnéticos, se debe eliminar la variación diurna del campo magnético, mediante la toma de datos con un magnetómetro fijo, este proceso provee datos para la corrección diurna; si el área de estudio es muy grande se puede utilizar observatorios magnéticos pero que no se encuentren alejados más de 100km del área de estudio. Los datos tomados con el magnetómetro fijo deben ser analizados cuidadosamente, si existen variaciones aparentemente muy grandes, altas frecuencias, el estudio debe ser descartado. Para realizar la corrección diurna se debe tomar el valor de la primera lectura realizada con el magnetómetro fijo, en base al cual se irá corrigiendo los valores del campo magnético total medidos con el magnetómetro móvil. (Parasnis, 2012)

7.2.2 Levantamiento Magnético

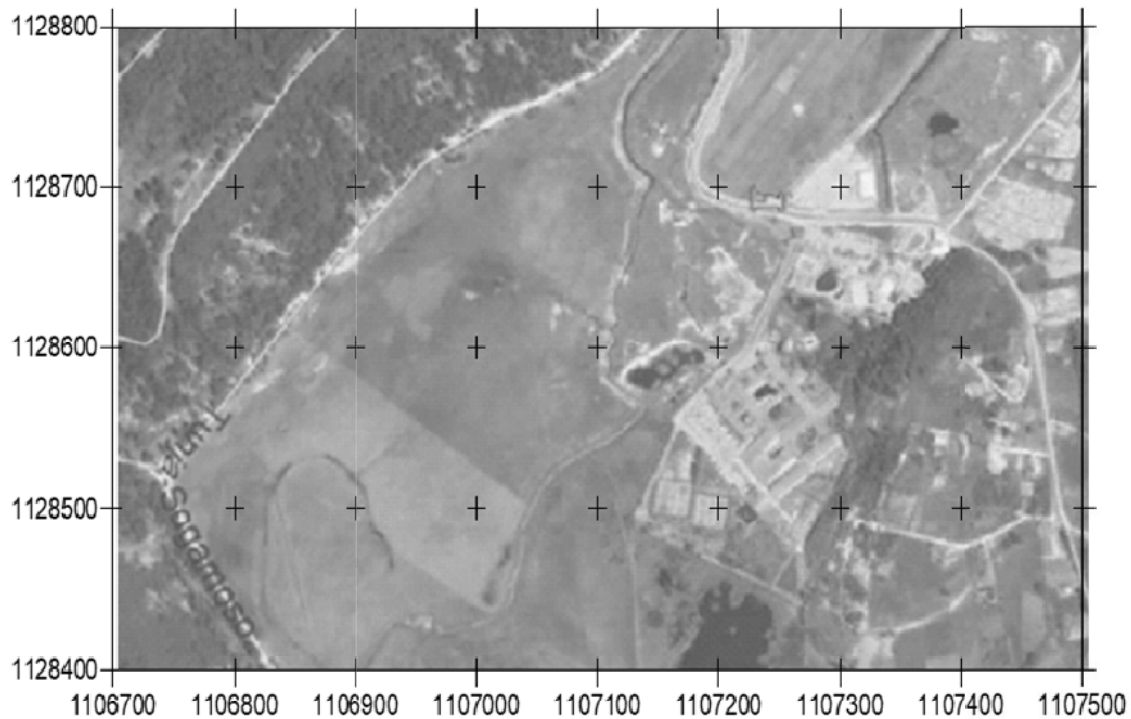


Figura 16. Grilla de puntos de medición utilizada para la magnetometría. Fuente. Google earth.

El trabajo de campo consistió en una adecuada planeación y en el posterior análisis de datos en oficina, a partir de la definición de que la distancia entre puntos (100 metros), en perfiles de dirección E – W, con una distancia entre ellos de 100m, y teniendo especial cuidado en no tomar datos en áreas en las cuales los agentes externos (construcciones, redes eléctricas o vehículos) afectaran el valor medido. Previa a la adquisición de datos, se calibraron los magnetómetros en el observatorio magnético de Fúquene, tomando lecturas con dos magnetómetros simultáneamente, con el fin de establecer una relación y minimiza los errores instrumentales.

Al inicio del levantamiento se escogió una estación base, teniendo en cuenta que la variación diurna puede considerarse pues tiene un comportamiento similar en toda el área.

La estación base (Foto 4) se ubicó en un punto fuera del área de trabajo en las coordenadas; E:1107532 y N:1128816. En el municipio de Paipa, Boyacá. Se ubicó contigua a un potrero, sin cercanía de cercas, redes eléctricas, ni paso vehicular. Los datos fueron adquiridos con un intervalo de 40 segundos. El sensor se ubicó con dirección al norte geográfico.

La descarga de los datos se realizó una vez realizado el levantamiento, utilizando el programa de la casa fabricante del equipo (Figura 17). Los trabajos de adquisición en campo se inician el 15 de abril a las 8:00 a.m. y fueron terminados el mismo día a las 2:55 p.m. Para la ubicación de los puntos de medición se utilizó un GPS Garmin de serie 64s (Figura 18). Por su parte para el direccionamiento de los perfiles y las mediciones en el punto de control se utilizó una brújula Brunton de la serie F5006lm. Se emplearon dos magnetómetros con sensor de protones, marca SCINTREX (Figura 19).



Figura17. Magnetómetro Scintrex y computadora con el programa para descarga de datos. Fuente. Elaboración propia



Figura 18. Geoposicionador Satelital Garmin 64s.Fuente. Elaboración propia



Figura19. Magnetómetro Scintrex (Estación base).Fuente. Elaboración propia

7.2.3 Procesamiento. Para iniciar el procesamiento de los datos, se toma la información descargada por medio del programa empleado para descargar la información. Posteriormente, se hace una base de datos que contiene información como: el número de perfil y estaca, las coordenadas de ubicación de los puntos, hora en que se tomó el dato y el valor tomado en nano teslas (nT).

Tabla 8

Datos de campo levantamiento magnético.

Perfil/Estaca	X (E)	Y (N)	Hora	$\Delta Z(nT)$
1/1	1106700	1128400	08:08	31954
1/2	1106800	1128400	08:15	32017
1/3	1106900	1128400	08:22	32039
1/4	1107000	1128400	08:30	32047
1/5	1107100	1128400	08:40	32041
1/6	1107200	1128400	08:47	32024
1/7	1107300	1128400	08:58	32000
1/8	1107400	1128400	09:05	31988
1/9	1107500	1128400	09:13	31986
2/1	1106700	1128500	09:20	31972
2/2	1106800	1128500	09:27	31986
2/3	1106900	1128500	09:35	32032
2/4	1107000	1128500	09:45	32049
2/5	1107100	1128500	09:54	32042
2/6	1107200	1128500	09:51	32022
2/7	1107300	1128500	10:02	31985
2/8	1107400	1128500	10:12	31975
2/9	1107500	1128500	10:21	31983
3/1	1106700	1128600	10:32	31993
3/2	1106800	1128600	10:38	32009
3/3	1106900	1128600	10:45	32005
3/4	1107000	1128600	10:56	31998
3/5	1107100	1128600	11:05	32009
3/6	1107200	1128600	11:14	32019

3/7	1107300	1128600	11:21	31971
3/8	1107400	1128600	11:30	32001
3/9	1107500	1128600	11:40	31986
4/1	1106700	1128700	11:50	31994
4/2	1106800	1128700	12:01	32004
4/3	1106900	1128700	12:10	31979
4/4	1107000	1128700	12:20	31948
4/5	1107100	1128700	12:28	32034
4/6	1107200	1128700	12:37	32025
4/7	1107300	1128700	12:46	32009
4/8	1107400	1128700	12:58	31990
4/9	1107500	1128700	13:10	31964
5/1	1106700	1128800	13:25	31989
5/2	1106800	1128800	13:34	31988
5/3	1106900	1128800	13:43	31975
5/4	1107000	1128800	13:55	31983
5/5	1107100	1128800	14:04	32017
5/6	1107200	1128800	14:21	32022
5/7	1107300	1128800	14:32	32019
5/8	1107400	1128800	14:41	32025
5/9	1107500	1128800	14:50	31992
Pt. Control	1107532	1128816	08:00	31992
Pt. Control	1107532	1128816	14:55	31992

Fuente. Elaboración propia

7.2.3.1 Corrección por drift. A la información adquirida se le realizó la corrección por drift, hallando la diferencia entre el primer y último dato tomado, el valor obtenido es dividido en

el número de datos adquiridos. El valor de corrección por drift es sumado o restado según su valor positivo o negativo. Si el valor resultante es negativo se suma a los datos obtenidos arrojados por el equipo.

7.2.3.2 Corrección por campo normal. El valor neto a partir del cual fluctúan los datos positiva o negativamente es llamado valor del campo normal.

$$\text{Corrección del Campo normal} = \text{Valor corregido por el drift} - \text{Campo normal}$$

El campo normal puede ser leído en cartas o mapas, y para la zona de trabajo es de aproximadamente 32000 nT.

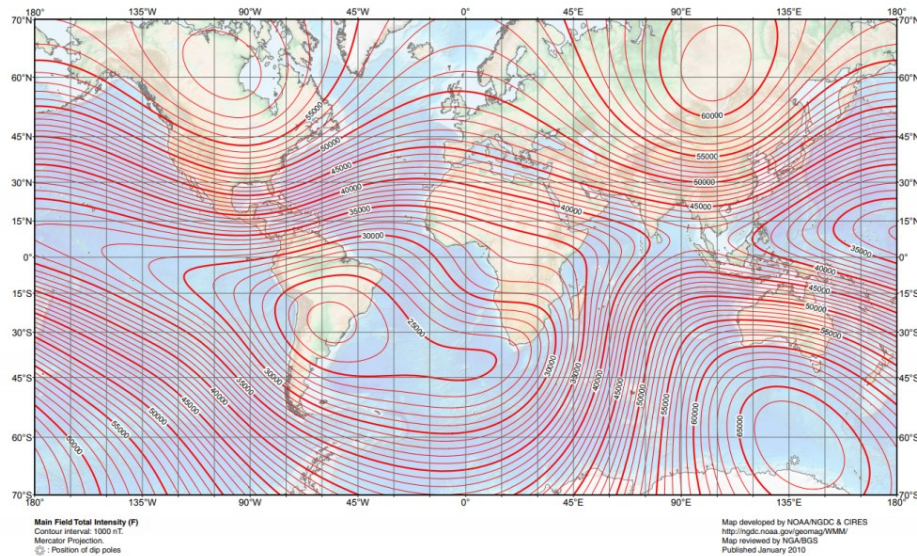


Figura 20. Mapa de la intensidad total del campo geomagnético en nT. Fuente. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/index.html>

A continuación, se presenta una tabla con los datos corregidos por la deriva instrumental (drift) y por campo normal.

Tabla 9

Datos corregidos por la deriva instrumental y campo normal.

Perfil/Estaca	X (E)	Y (N)	Hora	$\Delta Z(\text{nT})$	$\Delta Z(\text{nT})$	$\Delta Z(\text{nT})$	corr
---------------	-------	-------	------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	------

					corrdrift	drift y CN
1/1	1106700	1128400	08:08	31954	31955	-45
1/2	1106800	1128400	08:15	32017	32017	17
1/3	1106900	1128400	08:22	32039	32039	39
1/4	1107000	1128400	08:30	32047	32047	47
1/5	1107100	1128400	08:40	32041	32041	41
1/6	1107200	1128400	08:47	32024	32024	24
1/7	1107300	1128400	08:58	32000	32000	0
1/8	1107400	1128400	09:05	31988	31988	-12
1/9	1107500	1128400	09:13	31986	31986	-14
2/1	1106700	1128500	09:20	31972	31972	-28
2/2	1106800	1128500	09:27	31986	31986	-14
2/3	1106900	1128500	09:35	32032	32032	32
2/4	1107000	1128500	09:45	32049	32049	49
2/5	1107100	1128500	09:54	32042	32042	42
2/6	1107200	1128500	09:51	32022	32022	22
2/7	1107300	1128500	10:02	31985	31985	-15
2/8	1107400	1128500	10:12	31975	31975	-25
2/9	1107500	1128500	10:21	31983	31983	-17
3/1	1106700	1128600	10:32	31993	31993	-7
3/2	1106800	1128600	10:38	32009	32009	9
3/3	1106900	1128600	10:45	32005	32005	5
3/4	1107000	1128600	10:56	31998	31998	-2
3/5	1107100	1128600	11:05	32009	32009	9
3/6	1107200	1128600	11:14	32019	32019	19

3/7	1107300	1128600	11:21	31971	31971	-29
3/8	1107400	1128600	11:30	32001	32001	1
3/9	1107500	1128600	11:40	31986	31986	-14
4/1	1106700	1128700	11:50	31994	31994	-6
4/2	1106800	1128700	12:01	32004	32004	4
4/3	1106900	1128700	12:10	31979	31979	-21
4/4	1107000	1128700	12:20	31948	31948	-52
4/5	1107100	1128700	12:28	32034	32034	34
4/6	1107200	1128700	12:37	32025	32025	25
4/7	1107300	1128700	12:46	32009	32009	9
4/8	1107400	1128700	12:58	31990	31990	-10
4/9	1107500	1128700	13:10	31964	31964	-36
5/1	1106700	1128800	13:25	31989	31989	-11
5/2	1106800	1128800	13:34	31988	31988	-12
5/3	1106900	1128800	13:43	31975	31975	-25
5/4	1107000	1128800	13:55	31983	31983	-17
5/5	1107100	1128800	14:04	32017	32017	17
5/6	1107200	1128800	14:21	32022	32022	22
5/7	1107300	1128800	14:32	32019	32019	19
5/8	1107400	1128800	14:41	32025	32025	25
5/9	1107500	1128800	14:50	31992	31992	-8
Pt. Control	1107532	1128816	08:00	31992		
Pt. Control	1107532	1128816	14:55	31992		

Fuente. Elaboración propia

7.2.4 Interpretación. Se observó la relación entre la variación del campo magnético y la topografía, por medio de la construcción y superposición de los modelos correspondientes, que

se muestran en las figuras 21 y 22. En ellos se puede evidenciar que las anomalías no están influenciadas por el relieve, lo cual indica que la variación en la componente vertical del campo magnético es debida al medio geológico. Las zonas con altogradiente magnético nos muestran el posible trazado de fallas (Figura 22).

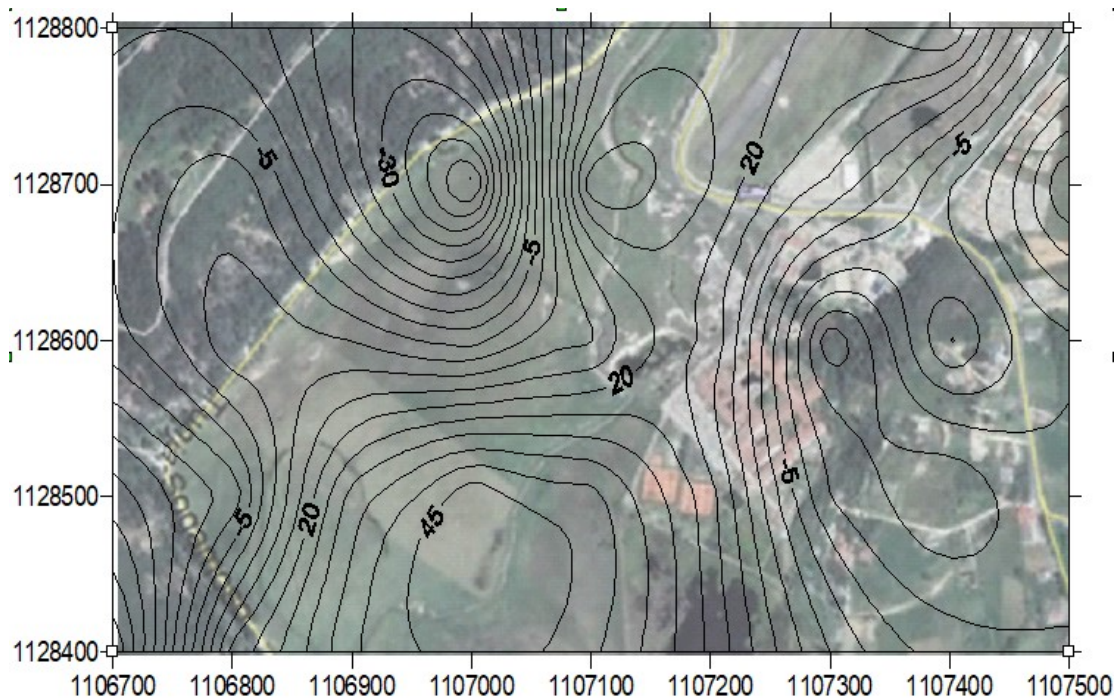


Figura 21. Curvas de nivel de valores nT sobrepuestas en imagen satelital de Google earth. Fuente. Elaboración propia

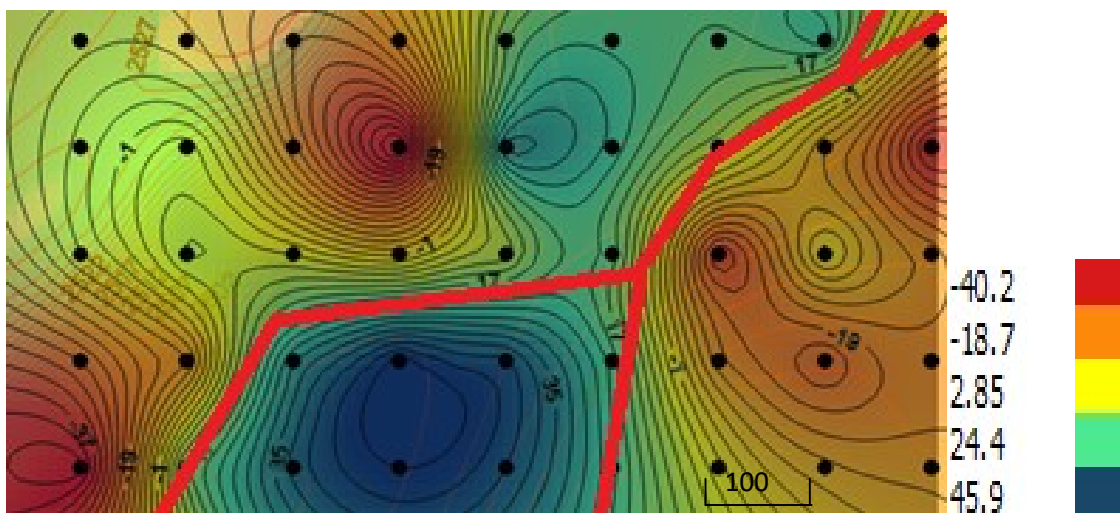


Figura 22. Mapa magnético corregido por deriva instrumental y campo normal y la posible ubicación de las fallas, Escala de Colores de ΔZ con los valores en nT (Derecha). Fuente. Elaboración propia.

7.3 Prospección Directa

A continuación, se plasman los sondeos realizados en la zona de estudio mediante perforación del subsuelo.

7.3.1 Perforación. Para corroborar y conocer las características de los materiales encontrados en la exploración indirecta (Geoeléctrica y Magnetometría) del subsuelo, y establecer su espesor y distribución espacial, así como para posicionar el nivel freático, se realizó dos sondeos hasta una profundidad de 10.0m y 15.0 m respectivamente con equipo de perforación manual.

7.3.1.1 Primer sondeo. Se tomaron muestras inalteradas para la ejecución de ensayos de clasificación y corte simple.

La perforación se realizó al Noroeste del área de estudio (Figura 23), ubicada con respecto al SEV 4 a una distancia de 189 m en dirección Sur.



Figura 23. Muestras de la perforación directa y ubicación del sondeo 1. Fuente. Google earth.

En la siguiente tabla se muestra la caracterización geomecanica obtenida del muestreo de suelos del primer sondeo.

Tabla 10

Resultados de la caracterización geomecanica del primer sondeo

PROFUNDIDAD	DESCRIPCION DEL SUELO	CLASIFICACION USCS	MUESTRA ALTERADA	MUESTRA INALTERADA	Wn(%)	LL(%)	LP(%)	IP(%)	GRAVA(%)	ARENA(%)	ARCILLA(%)	PESO ESPECIFICO (KN/m3)	COMPRESION INCONFINADA (Kpa)	GRAVEDAD ESPECIFICA
0 0,6	Relleno limo arenoso con material de construcción													
0,6 2,6	Arcilla baja plasticidad marrón con tonos grises, raices y trazas de arena	CL			37,8	40,9	24,2	16,7	0	14,3	85,7	17,64	53,9	2,458
2,6 3,5	Arcilla media plasticidad habana con tonos negros y rastros de arena media a fina.	CL			32,7	44,2	24	20,2	0	8,2	91,8	18,2574	34,3	2,635
3,5 5,7	Arcilla de alta plasticidad gris oscura	CH			34,9	52,1	27,9	24,2	0	13,2	86,8	17,248	28,42	2,643
5,7 6,6	Arcilla de alta plasticidad gris oscura	CH			41,7	57,6	20,5	37,1	0	9,8	90,2	15,974	23,52	2,543
6,6 7,4	Arcilla de alta plasticidad gris oscura	CH			51,5	51,3	23,5	27,8	0	11,6	88,4	18,2182	21,56	2,557
7,4 10	Arcilla de alta plasticidad gris oscura	CH			47	58,2	24,5	33,7	0	15,5	84,5	17,9732	31,36	2,646

Fuente. Elaboración propia

En la figura 24, Se evidencia el perfil del subsuelo obtenido del sondeo 1

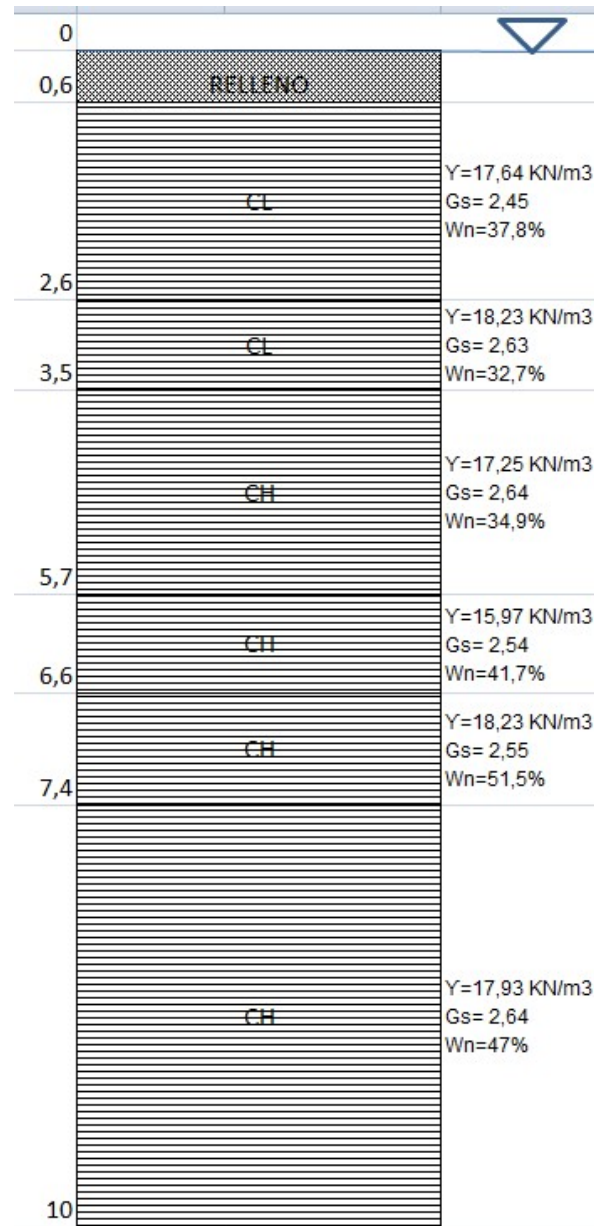


Figura 24. Perfil del subsuelo sondeo 1. Fuente. Elaboración propia

A continuación se presenta figuras de tercio de saturación eléctrica y parámetros geotécnicos.

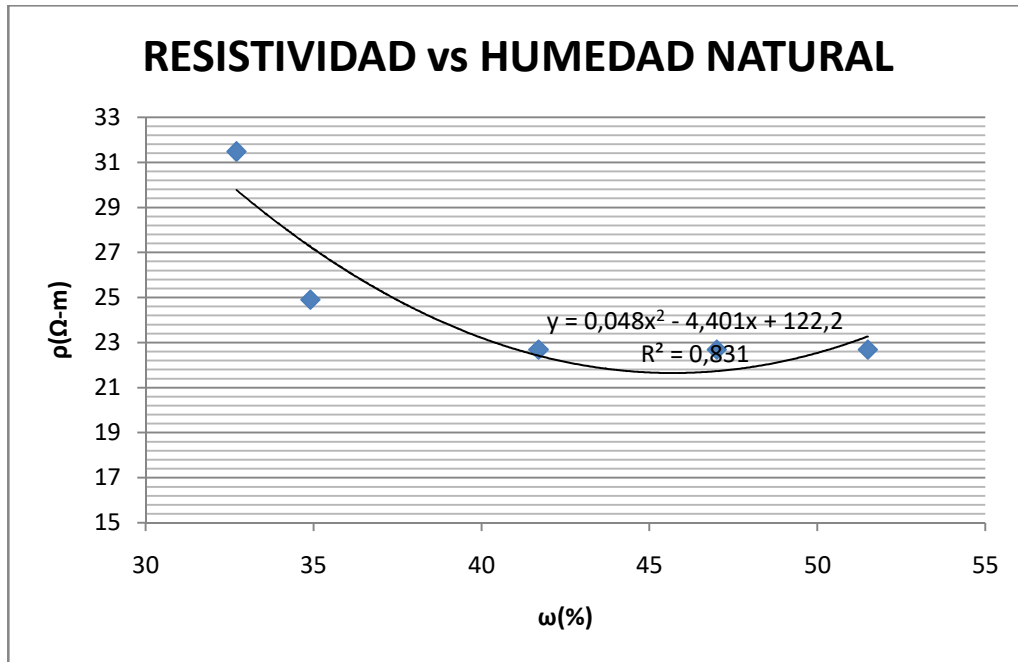


Figura 25. Resistividad aparente vs Humedad Natural. Fuente. Elaboración propia

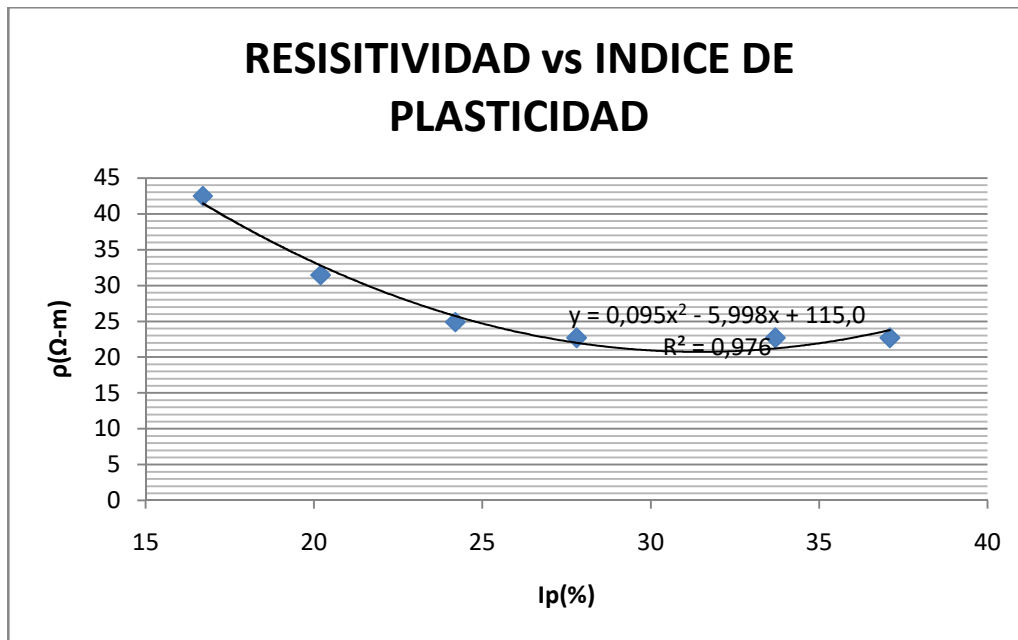


Figura 26. Resistividad aparente vs Índice de plasticidad. Fuente. Elaboración propia

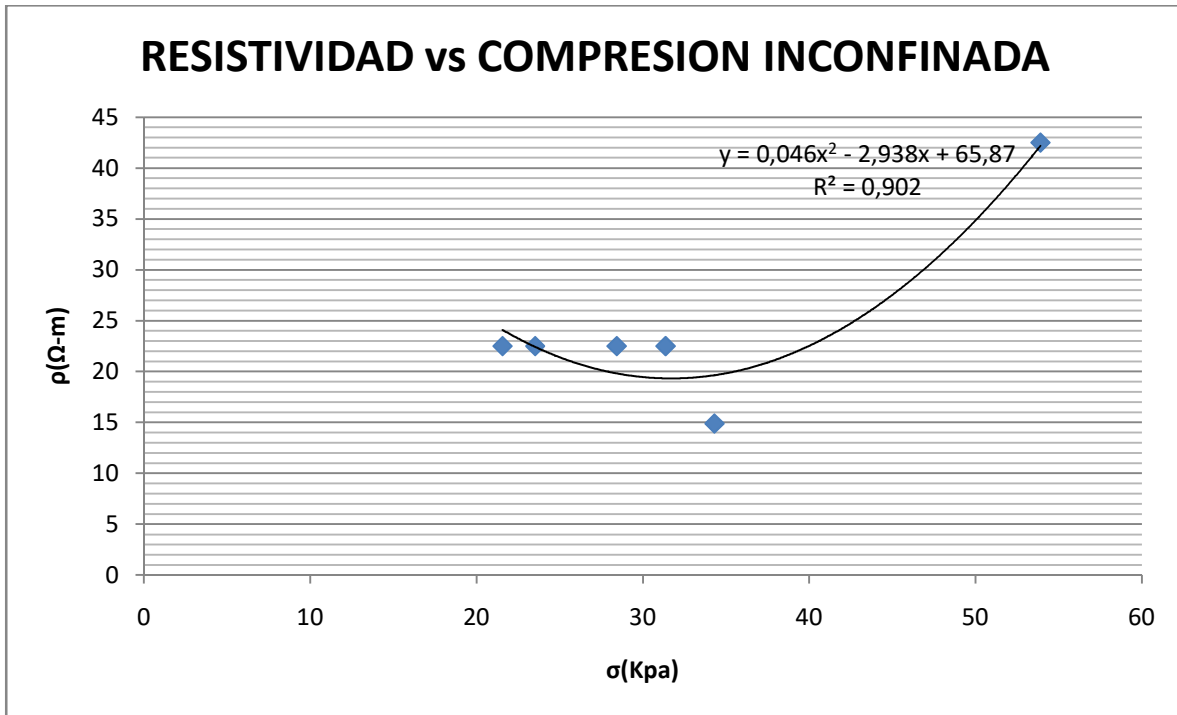


Figura 27. Resistividad aparente vs resistencia a la compresión simple. Fuente. Elaboración propia

Al igual se realizó ensayo de corte directo para hallar los parámetros geotécnicos de cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 11

Resultados del ensayo de corte directo de la muestra 3.

CELDA DE CARGA : 25 kN 50 kN

Deformación		Área Corregida cm2	Celda Carga kN	Carga kg.	Esfuerzo Secante kg/cm2	Celda Carga kN	Carga kg.	Esfuerzo Secante kg/cm2	Celda Carga kN	Carga kg.	Esfuerzo Secante kg/cm2
Horiz. mm	%										
0,0025	0,05	20,34	0,046	4,691	0,231	0,069	7,036	0,346	0,086	8,769	0,431
0,0051	0,10	20,32	0,058	5,914	0,291	0,089	9,075	0,447	0,116	11,829	0,582
0,0076	0,15	20,31	0,065	6,628	0,326	0,107	10,911	0,537	0,134	13,664	0,673
0,0102	0,20	20,30	0,072	7,342	0,362	0,117	11,930	0,588	0,143	14,582	0,718
0,0127	0,25	20,28	0,078	7,954	0,392	0,120	12,236	0,603	0,154	15,703	0,774
0,0152	0,30	20,27	0,080	8,158	0,402	0,125	12,746	0,629	0,162	16,519	0,815
0,0203	0,40	20,24	0,074	7,546	0,373	0,129	13,154	0,650	0,178	18,151	0,897
0,0254	0,50	20,22	0,064	6,526	0,323	0,131	13,358	0,661	0,189	19,272	0,953
0,0305	0,60	20,19	0,060	6,118	0,303	0,129	13,154	0,651	0,197	20,088	0,995
0,0356	0,70	20,17	0,054	5,506	0,273	0,125	12,746	0,632	0,201	20,496	1,016
0,0406	0,80	20,14	0,053	5,404	0,268	0,120	12,236	0,608	0,203	20,700	1,028
0,0457	0,90	20,12	0,052	5,302	0,264	0,118	12,032	0,598	0,200	20,394	1,014
0,0508	1,00	20,09	0,053	5,404	0,269	0,116	11,829	0,589	0,196	19,986	0,995
0,0559	1,10	20,06	0,054	5,506	0,274	0,115	11,727	0,584	0,192	19,578	0,976
0,0610	1,20	20,04	0,053	5,404	0,270	0,113	11,523	0,575	0,190	19,374	0,967
0,0660	1,30	20,01	0,054	5,506	0,275	0,112	11,421	0,571	0,188	19,170	0,958
0,0711	1,40	19,99	0,053	5,404	0,270	0,111	11,319	0,566	0,186	18,966	0,949
0,0762	1,50	19,96	0,052	5,302	0,266	0,110	11,217	0,562	0,184	18,762	0,940
0,0813	1,60	19,93	0,051	5,200	0,261	0,109	11,115	0,558	0,180	18,355	0,921
0,0864	1,70	19,91	0,050	5,099	0,256	0,108	11,013	0,553	0,176	17,947	0,901
0,0914	1,80	19,88	0,051	5,200	0,262	0,106	10,809	0,544	0,174	17,743	0,892
0,0965	1,90	19,86	0,052	5,302	0,267	0,105	10,707	0,539	0,170	17,335	0,873
0,1016	2,00	19,83	0,054	5,506	0,278	0,104	10,605	0,535	0,166	16,927	0,854
0,1067	2,10	19,81	0,055	5,608	0,283	0,103	10,503	0,530	0,160	16,315	0,824
0,1118	2,20	19,78	0,053	5,404	0,273	0,102	10,401	0,526	0,158	16,111	0,815
0,1168	2,30	19,75	0,055	5,608	0,284	0,101	10,299	0,521	0,156	15,907	0,805
0,1219	2,40	19,73	0,056	5,710	0,289	0,100	10,197	0,517	0,157	16,009	0,812
0,1270	2,50	19,70	0,054	5,506	0,279	0,099	10,095	0,512	0,155	15,805	0,802
Carga Normal		kg	5,34			10,67			21,37		
Presión Normal		kg/cm²	0,26			0,53			1,06		
Area Inicial		cm²	20,35			20,35			20,35		
Volumen		cm³	47,21			47,21			47,21		
Peso Muestra		gr	88,3			88,3			88,3		
Densidad Total		gr/cm³	1,870			1,870			1,870		
Humedad Inicial		%	32,7			32,7			32,7		
Humedad Final		%	29,1			27,5			24,2		
Esfuerzo Secante		kg/cm²	0,40			0,66			1,03		

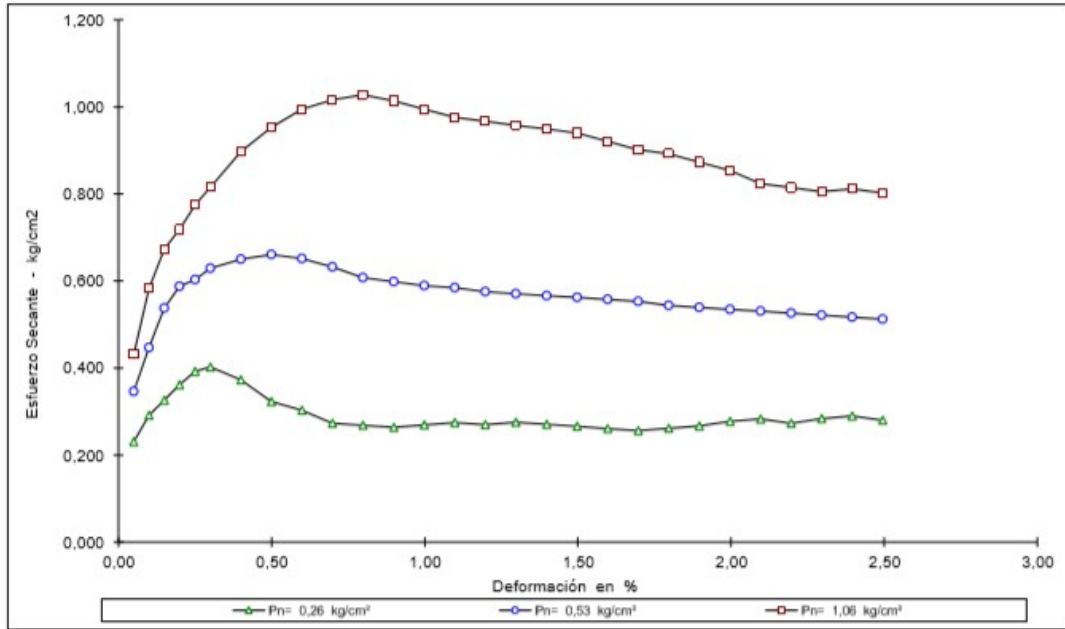


Figura 28. Esfuerzo cortante a diferentes cargas vs Deformación. Fuente. Elaboración propia

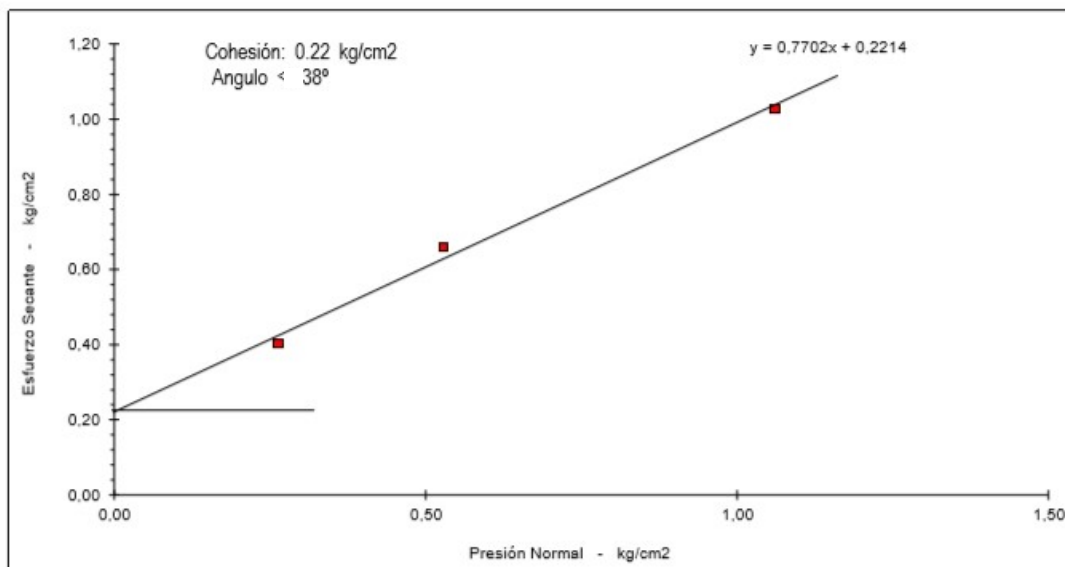


Figura 29. Esfuerzo cortante último vs Esfuerzo normal. Fuente. Elaboración propia

Como resultado de la exploración directa y la caracterización geotécnica del primer sondeo se concluyó lo siguiente:

- El nivel freático se encontró en superficie.
- Los valores de gravedad específica están en el rango de 2.45 a 2.64, característicos de las arcillas.
- El valor obtenido de ángulo de fricción del ensayo de corte directo es de 38 grados y cohesión es de 21.56 Kpa, mostrando que es un suelo cohesivo y friccionante.
- La tendencia de la figura Resistividad aparente vs Esfuerzo a compresión simple indica que entre más competente es el material su resistividad es mayor.
- La tendencia de la figura Resistividad aparente vs Humedad Natural concluye que la resistividad disminuye al aumentar el porcentaje de humedad.
- La tendencia de la figura Resistividad aparente vs Índice de plasticidad concluye que al aumentar el índice de plasticidad la resistividad disminuye.
- El material predominante del subsuelo en el primer sondeo son unas arcillas limosas
- El perfil del suelo encontrado en el primer sondeo es característico de un depósito cuaternario tipo aluvial el cual se compone principalmente de unas arcillas limosas de alta plasticidad y alto contenido de humedad.

7.3.1.2 Segundo Sondeo. Se llevó a cabo ensayos de penetración estándar SPT y toma de muestras alteradas para la ejecución de ensayos de clasificación por parte de estudiantes de pregrado vinculados al proyecto. La perforación se realizó al sur oeste del área de estudio (Figura 42), ubicada con respecto al SEV 5, 459 m, en una dirección S17°W.



Figura 30. Lugar de perforación directa sondeo 2. Fuente. Elaboración propia y GoogleEarth

A continuación se muestra en la tabla 10, el perfil del subsuelo y caracterización geomecánica, obtenido de la perforación realizada en la zona de estudio.

Tabla 12

Clasificación de las muestras obtenidas en el sondeo 2.

PROFUNDIDAD		DESCRIPCION DEL SUELO	CLASIFICACION USCS	MUESTRA ALTERADA	MUESTRA INALTERADA	W _n (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	GRAVA (%)	ARENA (%)	FINOS (%)	PESO ESPECIFICO (KN/m ³)	GRAVEDAD ESPECIFICA	ANGULO DE FRICCIÓN
0	0,4	Arcilla de baja plasticidad	CL		0,2	17,80	33,00	22,00	11,00	15,00	31,00	54,00	18,42	2,62	-
0,4	0,9	limo de baja plasticidad	ML		0,65	19,20	44,20	24,00	20,20	2,00	39,00	59,00	18,26	2,71	30
0,9	1,5	Arena limosa	SM		1,2	8,41	32,00	28,00	32,00	3,00	53,00	44,00	19,50	2,66	40
1,5	2,1	Arena arcillosa	SC		1,8	7,12	18,00	-	-	2,00	77,00	21,00	18,42	2,63	34
2,1	2,8	Arcilla de baja compresibilidad	CL		2,45	16,89	29,00	19,00	10,00	1,00	38,00	61,00	18,91	2,64	34
2,8	4	Arena arcillosa	SC		3,4	20,08	16,60	-	-	0,00	80,00	20,00	18,33	2,61	30
4	4,5	Arena arcillosa	SC		4,25	18,01	16,60	-	-	1,00	83,00	16,00	18,82	2,68	30
4,5	5,5	Arena arcillosa	SC		5	37,90	16,60	-	-	0,00	80,00	20,00	18,33	2,62	28
5,5	6,2	Arena arcillosa	SC		5,85	18,78	16,60	-	-	1,00	82,00	17,00	18,72	2,67	28

6,2	7,4	Arena arcillosa	SC		6,8	32,84	17,00	-	-	2,00	57,00	41,00	17,54	2,65	29
7,4	8	Arena arcillosa	SC		7,7	24,02	16,00	-	-	3,00	70,00	27,00	18,62	2,67	32
8	8,5	Arena arcillosa	SC		8,25	17,89	21,00	14,00	-	0,00	58,00	42,00	19,40	2,61	32
8,5	8,9	Arena arcillosa	SC		8,7	13,30	18,00	-	-	2,00	51,00	47,00	18,03	2,57	32
8,9	10,6	Arena arcillosa	SC		9,75	21,49	17,00	-	-	1,00	59,00	40,00	18,52	2,72	30
10,6	12	Arena arcillosa	SC		11,3	21,22	17,00	-	-	0,00	69,00	31,00	19,31	2,76	29
12	13	Arena arcillosa	SC		12,5	22,21	30,00	21,00	-	5,00	62,00	33,00	18,42	2,77	28
13	13,7	Arena arcillosa	SC		13,35	27,43	23,00	-	-	3,00	60,00	37,00	19,21	2,74	27
13,7	15	Arena arcillosa	SC		14,35	16,52	19,00	-	-	5,00	59,00	36,00	19,31	2,73	28

Fuente. Tesis de pregrado titulada modelo geotécnico basado en propiedades índice sector piscinas termales públicas municipio de Paipa.

En la figura 31, evidenciamos el perfil del subsuelo obtenido del sondeo 1

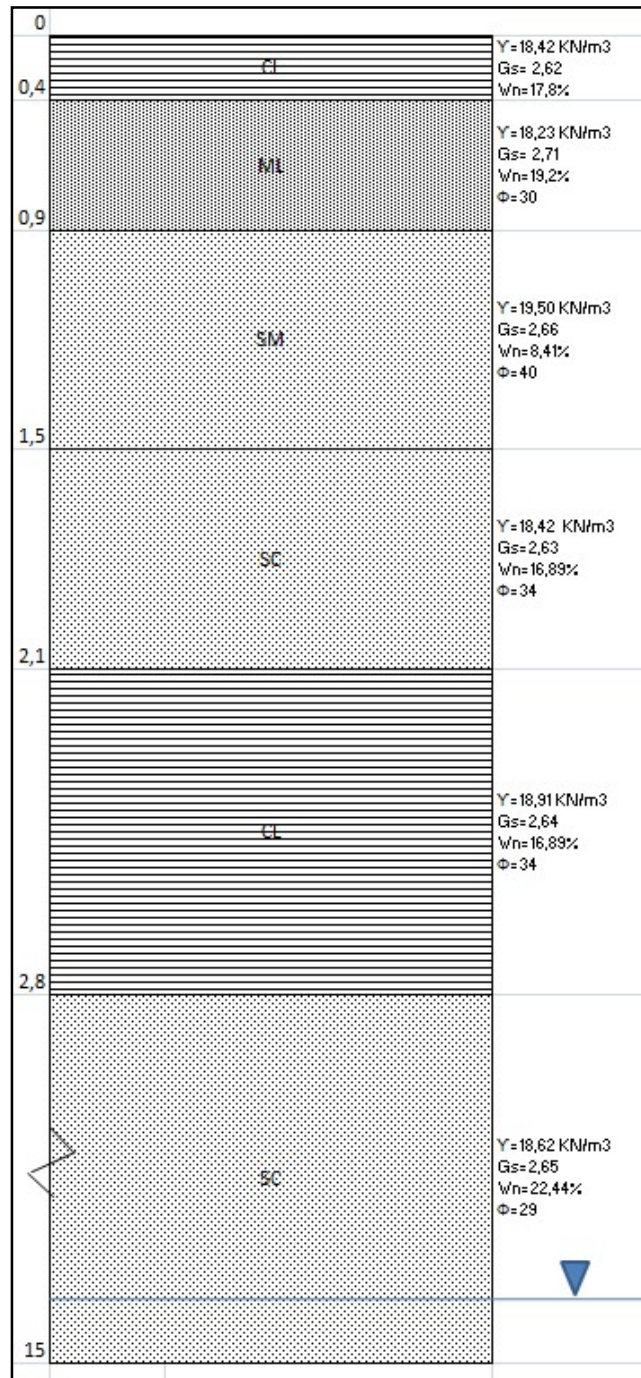


Figura 31. Perfil del subsuelo sondeo 2. Fuente. Elaboración propia

A continuación se presenta figuras para realizar comparación entre resistividad electrica aparente y Humedad Natural.

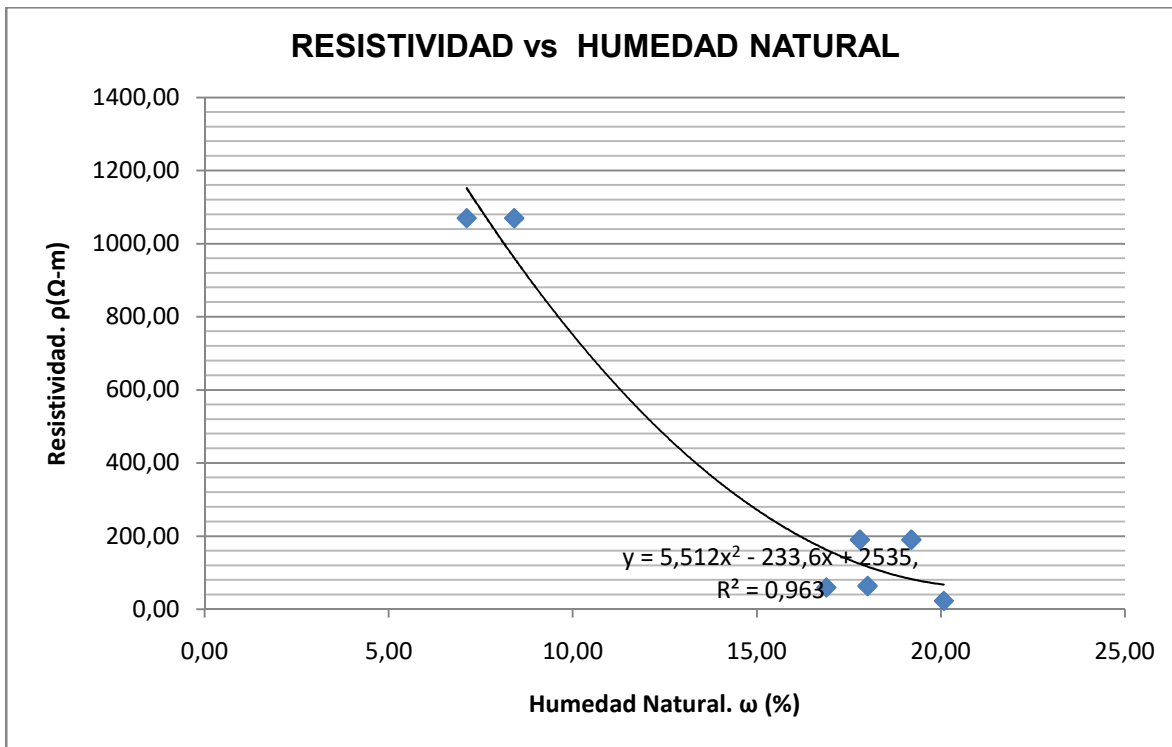


Figura 32. Figura de Resistividad aparente vs Humedad Natural. Fuente. Elaboración propia

La regresión indica que al aumentar la humedad natural en el suelo del depósito disminuye su resistividad eléctrica.

Teniendo en cuenta que se realizó perforación manual con toma de muestras y el ensayo SPT, al número de golpes obtenido del ensayo SPT se le realiza la corrección para energía $E = 45\%$ (González, 1999), con el fin de hallar el ángulo de fricción efectivo por la ecuación de Kishida y el esfuerzo cortante para posteriormente realizar un gráfico esfuerzo efectivo vs esfuerzo cortante como se muestra en la tabla 19.

Tabla 13

Resultados de los ensayos de SPT

De	a	PROF	N _{SPT}	η ₁	η ₂	η ₃	η ₄	γ	σ _v	u	σ _v '	Rs	C _N	N ₄₅	φ'	τ	Perfil del Suelo
(m)	(m)	(m)	Golpes	Corr. por ef. del equipo al 45%	Corr. Por long varillaje	Corr. por muestrador	Corr. Por diametro hueco	(kN/m ³)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	Corr. Por presión atmosférica	Seed Idriss	Golpes Corr.	Kishida (grados)	(kPa)	Descripción
0,00	1,30	0,65	24	1,80	0,75	1,00	1,00	19,9	12,94	0,0	12,94	0,17	2,08	67	44	12,50	ARENA LIMOSA DE COLOR CAFÉ DE CONSISTENCIA DURA CON ALTO CONTENIDO DE ÓXIDOS Y MATERIA
1,30	2,30	1,80	30	1,80	0,75	1,00	1,00	18,8	35,27	0,0	35,27	0,47	1,46	59	42	32,00	ARENA DE COLOR GRIS DE CONSISTENCIA DURA
2,30	4,00	3,15	19	1,80	0,75	1,00	1,00	19,3	61,08	0,0	61,08	0,81	1,13	29	34	41,21	ARENA DE COLOR GRIS DE CONSISTENCIA MEDIA, CON ALTO CONTENIDO DE GRAVAS Y ALTO
4,00	4,50	4,25	48	1,80	0,85	1,00	1,00	18,0	81,98	0,0	81,98	1,09	0,97	71	45	81,33	PRESENCIA DE GRAVAS
4,50	5,40	4,95	16	1,80	0,85	1,00	1,00	18,7	94,90	0,5	94,40	1,26	0,91	22	32	58,25	ARENA DE COLOR GRIS, DE CONSISTENCIA MEDIA, CON PRESENCIA DE GRAVAS
5,40	6,20	5,80	20	1,80	0,85	1,00	1,00	19,2	110,99	9,0	101,99	1,36	0,88	27	33	67,07	ARENA DE COLOR GRIS, DE CONSISTENCIA MEDIA, CON PRESENCIA DE GRAVAS
6,20	7,50	6,85	24	1,80	0,95	1,00	1,00	18,7	130,83	19,5	111,33	1,48	0,84	35	36	80,29	ARENA DE COLOR GRIS, DE CONSISTENCIA MEDIA, CON PRESENCIA DE GRAVAS
7,50	8,50	8,00	26	1,80	0,95	1,00	1,00	19,1	152,53	31,0	121,53	1,62	0,81	36	36	88,92	ARENA DE COLOR GRIS, DE CONSISTENCIA MEDIA, CON ALTO CONTENIDO DE GRAVAS E INTERCALACIONES
8,50	9,40	8,95	49	1,80	0,95	1,00	1,00	17,9	170,14	40,5	129,64	1,72	0,78	66	44	123,56	ARENA DE COLOR GRIS DE CONSISTENCIA DURA CON PRESENCIA DE GRAVAS
9,40	13,30	11,35	27	1,80	1,00	1,00	1,00	19,0	215,24	64,5	150,74	2,00	0,72	35	36	109,30	ARENA DE COLOR GRIS DE CONSISTENCIA MEDIA
13,30	13,50	13,40	22	1,80	1,00	1,00	1,00	19,8	254,27	85,0	169,27	2,25	0,68	27	33	111,15	ARENA DE COLOR GRIS DE CONSISTENCIA MEDIA
13,50	14,50	14,00	20	1,89	1,00	1,00	1,00	18,4	265,45	91,0	174,45	2,32	0,66	25	33	112,01	ARENA DE COLOR GRIS DE CONSISTENCIA MEDIA Y PRESENCIA DE GRAVAS
14,50	15,00	14,75	24	1,89	1,00	1,00	1,00	19,7	279,58	98,5	181,08	2,41	0,65	29	34	122,94	ARENA DE COLOR GRIS, DE CONSISTENCIA MEDIA

Fuente. Elaboración propia

En la figura 33 se muestra el grafico gráfico esfuerzo efectivo vs esfuerzo cortante.

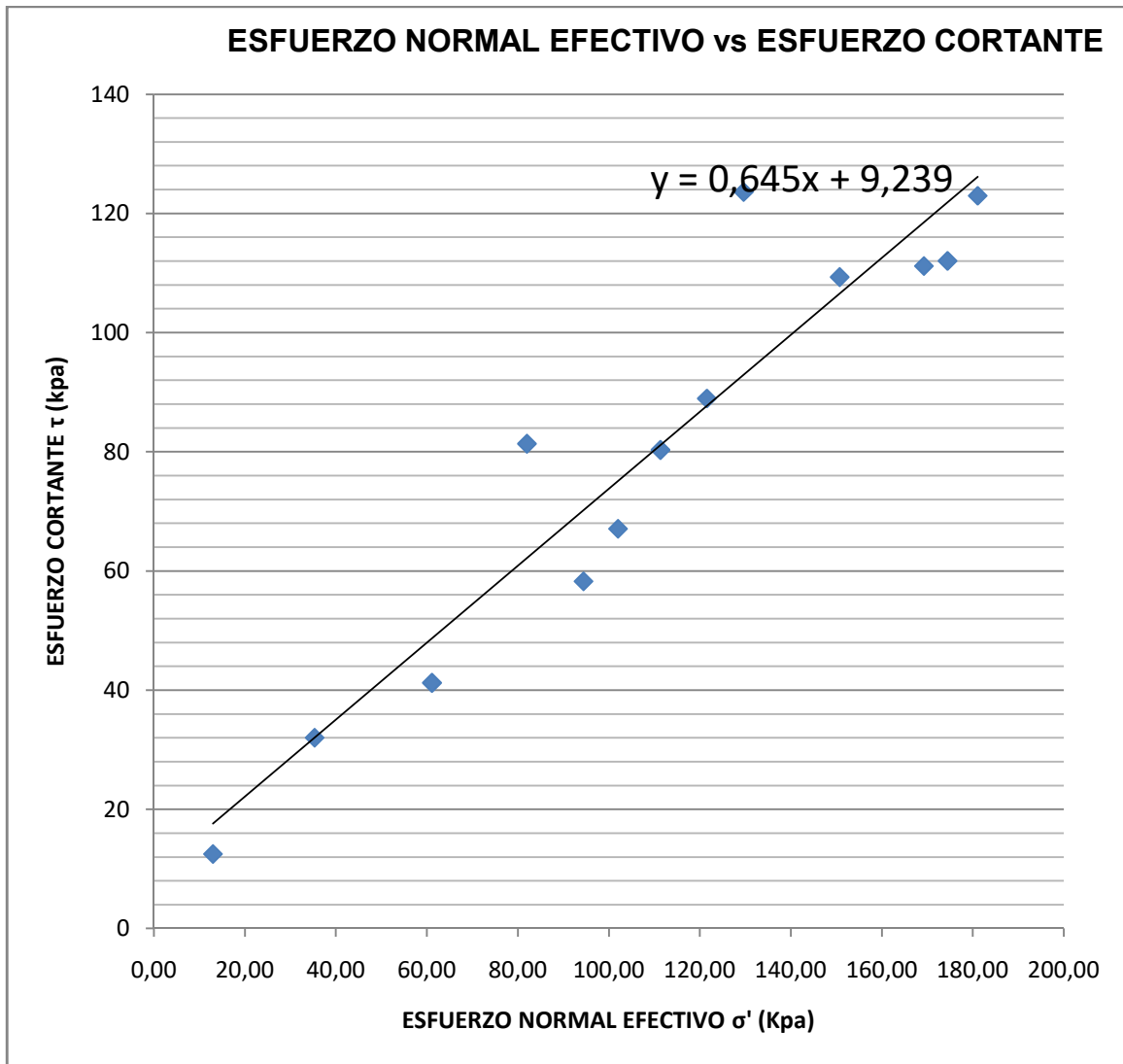


Figura 33. Figura esfuerzo efectivo vs esfuerzo cortante y regresión para obtener C' y $\text{tang } \Phi'$. Fuente. Elaboración propia

Como resultado de la exploración directa y la caracterización geotécnica del segundo sondeo se concluyó lo siguiente:

- El nivel freático se encontró a los 4.5 metros de profundidad.
- Los valores de gravedad específica están en el rango de 2.62 a 2.66, característicos de las arenas.

las arenas.

- Los valores obtenidos de ángulo de fricción en el laboratorio están en el rango de 30 a 40 grados, característico de las arenas.
- Del ensayo del SPT se hallan parámetros estimativos de resistencia de acuerdo con la propuesta del doctor Álvaro González, dando como resultado que el ángulo de fricción efectiva es de 33 grados y la cohesión efectiva es de 9.24 KPa- (González, 1999)
- Los valores del peso específico están en el rango de 18.33 a 19.3 KN/m³, características de unas arenas arcillosas.
- La clasificación USC Sindica que las muestras obtenidas en su mayoría son unas arenas arcillosas.
- La distribución del tamaño de grano varia a profundidad, los 3 primeros metros predominan las arcillas, del metro 3 al 6 las arenas y luego predominan las arenas con contenido de arcillas, en general contenido de gravas es bajo en las muestras.
- La tendencia del gráfico de humedad natural y resistividad eléctrica, se concluye que la resistividad disminuye al aumentar el porcentaje de humedad.
- Es un perfil característico de un depósito cuaternario aluvial el cual se compone inicialmente una capa de suelo inorgánico seguido de arenas arcillosas a profundidad.

8. Análisis físico químico de aguas termales

Las muestras se tomaron en el sitio de afloramiento de cada una de las fuentes termales seleccionadas, específicamente, el Pozo azul. Cada muestra de agua se ubicó individualmente en un envase de polietileno.

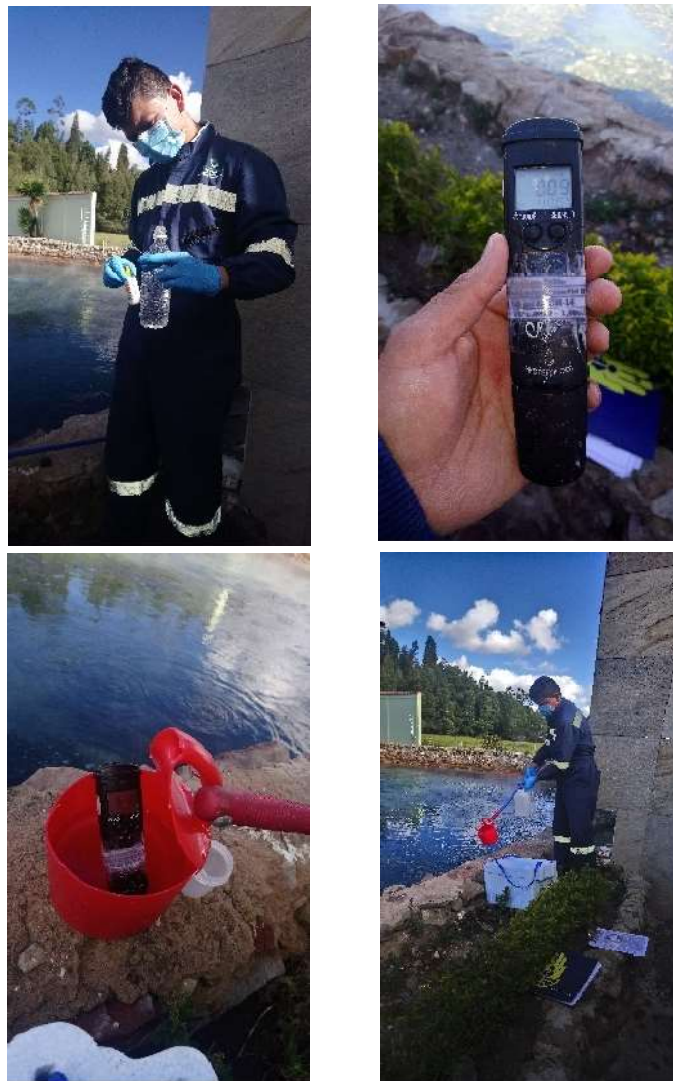


Figura 34. Muestreo de agua pozo azul. Fuente. Elaboración propia

A continuación, en la tabla 14, se muestran los resultados del análisis de laboratorio de aguas de muestra recogida en pozo azul.

Tabla 14

Resultados de laboratorio análisis de agua.

DESCRIPCION	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX. ACEPTABLE	METODO
ANÁLISIS EN CAMPO (A)				
Temperatura (A)	°C	45,3	N.E.	SM 2550 B
Conductividad (A)	microsiemens/cm	43000	N.E.	SM 2510 B
pH (A)	Unidades de pH	6,44	N.E.	SM 4500-H* B
ANÁLISIS EN LABORATORIO				
Sólidos disueltos totales (A)	mg SDT/L	39960	N.E.	SM 2540 C / Cálculo
* Sodio (A)	mg Na/L	12600	N.E.	SM 3111 B
* Potasio (A)	mg/L K	1539	N.E.	SM 3111 B
Calcio	mg Ca/L	78,56	N.E.	SM 3500-Ca B
Magnesio	mg Mg/L	74,64	N.E.	SM 3500 – Mg B
* Zinc (A)	mg Zn/L	0,054	N.E.	SM 3111 B
* Plomo (A)	mg Pb/L	0,237	N.E.	SM 3111 B
Hierro Total	mg Fe/L	0,07	N.E.	SM 3500-Fe
Cobre	mg/L	<0,1	N.E.	SM 3111 B
* Niquel (A)	mg Ni/L	0,204	N.E.	SM 3111 B
Carbonatos	mg CaCO ₃ /L	0	N.E.	SM 2320 B - Cálculo
Bicarbonatos	mg CaCO ₃ /L	1102	N.E.	SM 2320 B - Cálculo
Cloruros (A)	mg Cl/L	5828	N.E.	SM 4500-Cl -B
Sulfatos (A)	mg SO ₄ ²⁻ /L	17355	N.E.	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
Nitritos - N (A)	mg NO ₂ ⁻ -N/L	0,10	N.E.	SM 4500-NO ₂ ⁻ -B
Nitratos - N (A)	mg NO ₃ ⁻ -N/L	<0,38	N.E.	Salicilato Sódico/Rodier
Fosfatos (A)	mg PO ₄ ³⁻ /L	2,58	N.E.	SM 4500 P-D
Nitrógeno Amoniacal (A)	mg NH ₃ -N/L	2,00	N.E.	SM 4500 NH ₃ B, C

Fuente. Analizar Laboratorio Físico Químico LTDA

Las aguas termales son aguas minerales que salen del suelo a una temperatura mayor en por lo menos 5°C a la temperatura media anual del lugar de donde emanan. Estas aguas proceden de capas subterráneas que se encuentran a mayor temperatura, las cuales son ricas en diferentes componentes minerales y permiten su utilización en tratamientos terapéuticos como: baños, inhalaciones, irrigaciones, y calefacción. Por lo general se encuentran a lo largo de líneas de fallas ya que a lo largo del plano de falla pueden introducirse las aguas subterráneas que se calientan al llegar a cierta profundidad y suben después en forma de vapor (que puede condensarse al llegar a la superficie, formando un geiser) o de agua caliente.

La clasificación de las aguas termales, no está estandarizada y varía dependiendo del país y del investigador. Las aguas termales se clasificaron de acuerdo a su temperatura, su mineralización, su composición, su pH y su origen. (Balderrama & Flores, 2009)

8.1 Clasificación de las aguas termales de acuerdo con su temperatura.

Las aguas termales pueden ser clasificadas en:

- ✓ Aguas Hipotermiales: Aguas con temperaturas menores a 35°C.
- ✓ Aguas Mesotermiales: Aguas con temperaturas entre 35 y 37°C.
- ✓ Aguas Hipertermiales: Aguas con temperaturas mayores a 37°C.

La temperatura medida en la muestra de agua tomada de la fuente de agua termal del ITP fue de 45.3°C, clasificándose como Hipertermal, es de aclarar que la temperatura medida directamente de la fuente alcanza los 72 grados.

8.2 Clasificación de las aguas termales de acuerdo con su mineralización global.

Considerando su mineralización global, es decir el total de sólidos disueltos en las aguas termales, estas se pueden clasificar en:

- ✓ Oligominerales: contienen sólidos disueltos no superiores a 100 mg/L.
- ✓ Mineralización muy débil: contienen sólidos disueltos entre 100 y 250 mg/L.
- ✓ Mineralización débil: contienen sólidos disueltos entre 250 y 500 mg/L.
- ✓ Mineralización media: contienen sólidos disueltos entre 500 y 1000 mg/L.
- ✓ Mineralización fuerte: contienen sólidos disueltos superior a 1000 mg/L.

La concentración de sólidos disueltos de las muestras tomadas (SDT), es de 39960 mg/L clasificándose como agua termal con mineralización fuerte.

8.3 Clasificación de las aguas termales de acuerdo con su composición

Cuando las aguas termales tienen más de un gramo por litro de mineralización global, la clasificación de las aguas, según su composición, se hace de acuerdo a su contenido aniónico y catiónico predominante. Las aguas termales se consideran como bicarbonatadas, cloruradas, sulfatadas, sódicas, cálcicas o magnésicas cuando el ion correspondiente supera el 20 por ciento del contenido aniónico o catiónico expresado en equivalentes. Cuando la mineralización no supera el gramo de residuo por litro se indica solo como iones predominantes, con el mismo criterio que en el caso anterior.

Los datos del laboratorio indican que predominan los sulfatos y el sodio, clasificando el agua como sulfatada sódica.

8.4 Clasificación de las aguas termales de acuerdo con su potencial de hidrogeno (PH).

De acuerdo a su pH, las aguas termales se pueden clasificar en:

- ✓ Ácidas: cuando el pH es menor a 6.8.
- ✓ Neutras: cuando el pH está entre 6.8 a 7.2.
- ✓ Alcalinas: cuando el pH es mayor a 7.2.

El valor de PH de las muestras de agua termal obtenida es de 6.44 pudiéndose clasificar como Ácida.

En el año 2012 la UPTC en convenio con CORPOBOYACA realizó inventario de puntos de agua, muestreo y caracterización de físico- química de aguas sector Paipa, de los cuales 11 puntos se encuentran en la zona de estudio.

Tabla 15

Inventario puntos de aguas termales en la zona de estudio.

COORDENADAS N.	COORDENADAS E.	ALTURA m.s.n.m.	NOMBRE MUNICIPIO.	MOBRE VEREDA.	LOCALIDAD.	CAPTACION.	MICROCUENCA.	PH.	TEMPERATURA °C	Conductividad (µs/cm)	SOLIDOS DISUELTOS (ppm).
1128482	1107259	2516	PAIPA	LA ESPERANZA.	ITP.	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	6,53	43	>4000	>2000
1128509	1107200	2520	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	7,75	30	>4000	>2000
1128384	1107133	2517	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	9,98	43	>4000	>2000
1128379	1107121	2515	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	9,54	60	>4000	>2000
1128382	1107043	2515	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	9,25	60	>4000	>2000
1128399	1107079	2515	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	9,3	31	>4000	>2000
1128428	1107087	2517	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	6,25	34	>4000	>2000
1128450	1107097	2518	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	8,61	42	>4000	>2000
1128459	1107109	2517	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	8,29	29	>4000	>2000
1128508	1107102	2519	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	8,32	48	>4000	>2000
1128513	1107143	2519	PAIPA	LA ESPERANZA.	INFIBOY	MANANTIAL	R. CHICAMOCHA.	7,95	37	>4000	>2000

Fuente. UPTC

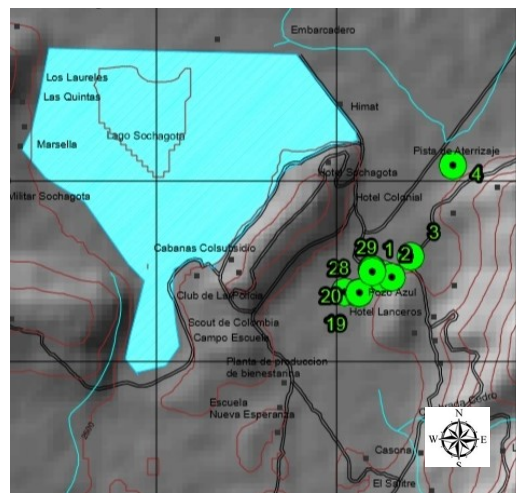


Figura 35. Ubicación de puntos de aguas termales. Fuente UPTC.

Analizados los resultados de la caracterización físico-química realizada por la UPTC, en general se pueden clasificar aguas Hipertermales, con mineralización fuerte y alcalinas, sin embargo, se observan 2 puntos donde el PH es más bajo clasificando como aguas Hipertermales, con mineralización fuerte y acidas.

Para evaluar la incidencia de las aguas en los cambios químicos de los materiales se realizó la medición del PH a los suelos extraídos mediante papel tornasol rojo y azul, como se muestra en la figura 36.



Figura 36. Medición de PHde los suelos mediante papel tornasol azul y rojo. Fuente. Elaboración propia

El papel tornasol azul reaccionó al contacto con la muestra, en el papel tornasol rojo no hubo reacción, evidenciando que los suelos son ácidos, con un PH de 3 aproximadamente.

Las aguas de Pozo azul al igual clasifican como acidas para lo cual la mezcla de esta agua con el suelo del depósito aluvial puede estar influenciando en el PH del terreno.

9. Resultados

A continuación, se muestra los resultados producto del estudio realizado en la zona.

9.1 Exploración del subsuelo

9.1.1 Indirecta. Esta fase consistió en los levantamientos geofísicos de geoelectrónica y magnetometría.

El estudio geoelectrónico reveló curvas de cuatro y cinco capas. En los SEV 1 y 4 se presentaron curvas de cuatro capas, de forma similar al SEV 2, por otro lado, los SEV 5 y 3, constan de cinco capas como se muestra en el ejemplo de la Figura 36.

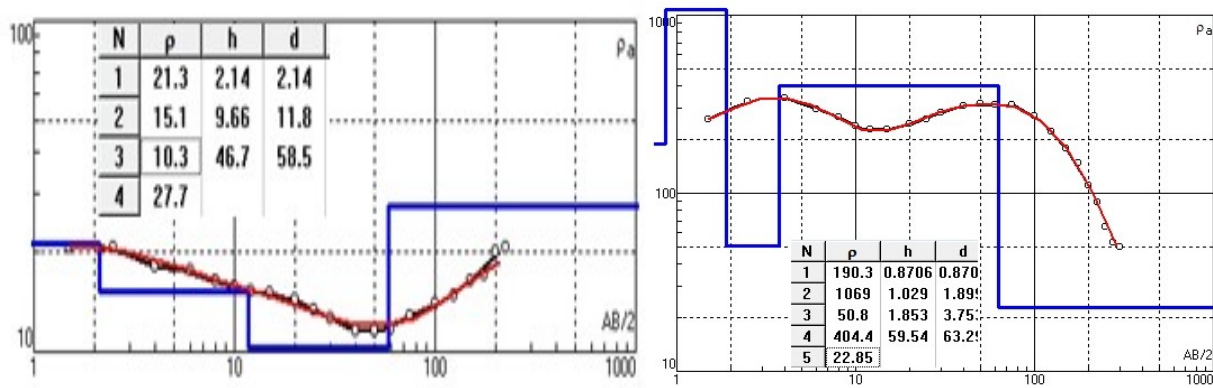


Figura 37. Curva de SEV 2 de cuatro y SEV 5 de cinco capas, cada una con tabla de resultados donde se observa resistividades y espesores de capa. Fuente. Elaboración propia

Considerando la alineación entre SEV, así como su cercanía, se realizaron secciones en falso color de resistividad aparente (Figura 38).

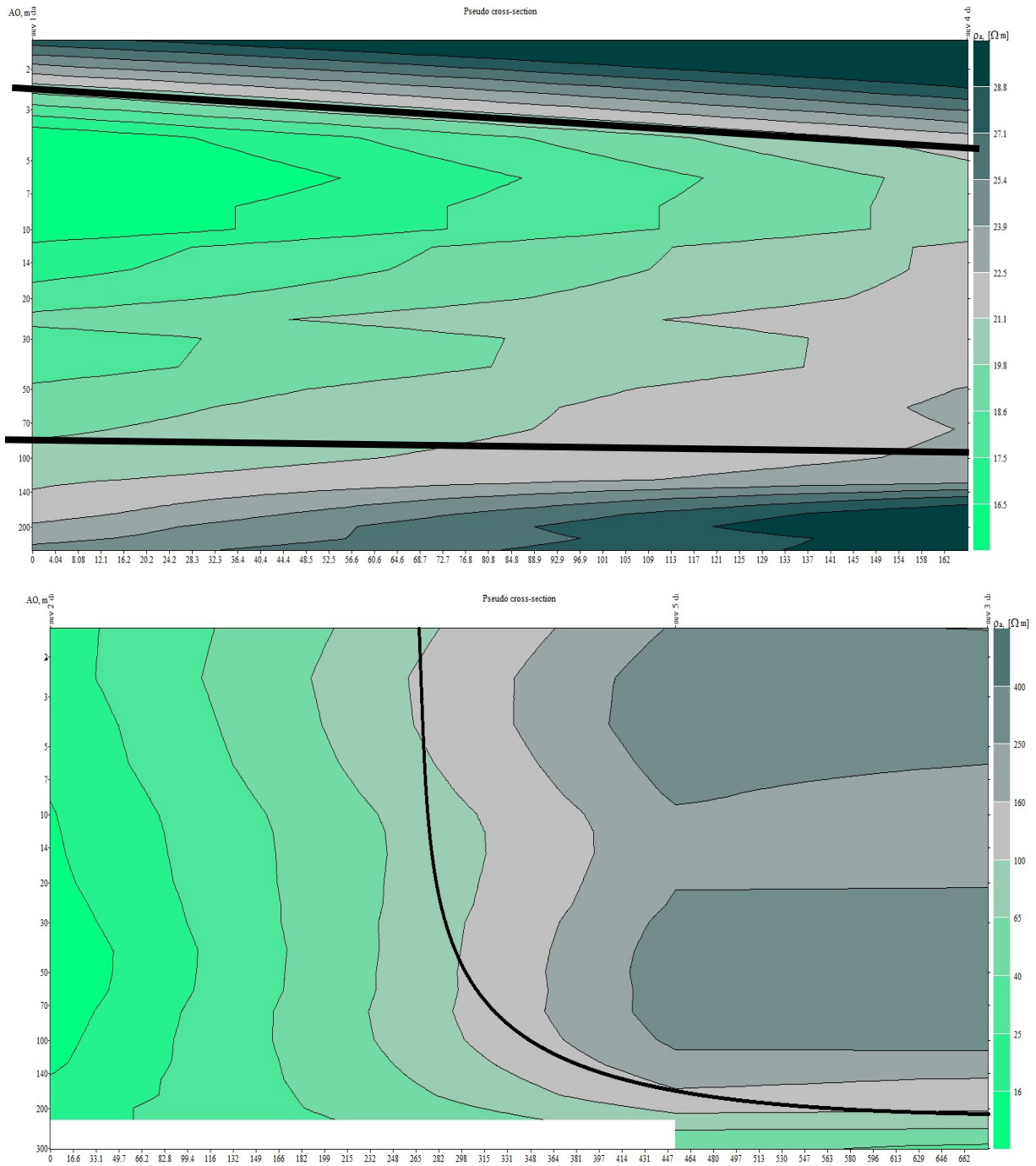


Figura 38. Secciones en falso color de resistividad aparente entre los S.E.V. 1, y 4 y S.E.V. 2,5,3. Fuente.

Elaboración propia

La sección de falso color de resistividad aparente entre los S.E.V. 1, y 4 muestra en sus primeros metros en escala de grises parte del depósito aluvial, luego en colores verdes a profundidad probablemente la formación arenosa e infrayaciendo la formación Tilatá.

La sección de falso color de resistividad aparente entre los S.E.V. 2, 5 y 3, probablemente muestra el contacto entre el depósito cuaternario aluvial y la formación Tilatá.

En el estudio magnético, se observó la relación entre la variación de la anomalía magnética y la topografía, por medio de la construcción y superposición de los mapas topográficos y de anomalía magnética (Figura 39). En ellos se puede evidenciar que las anomalías no están influenciadas por el relieve, lo cual indica que la variación de la anomalía magnética es generada por discontinuidades geológicas por debajo del depósito cuaternario.

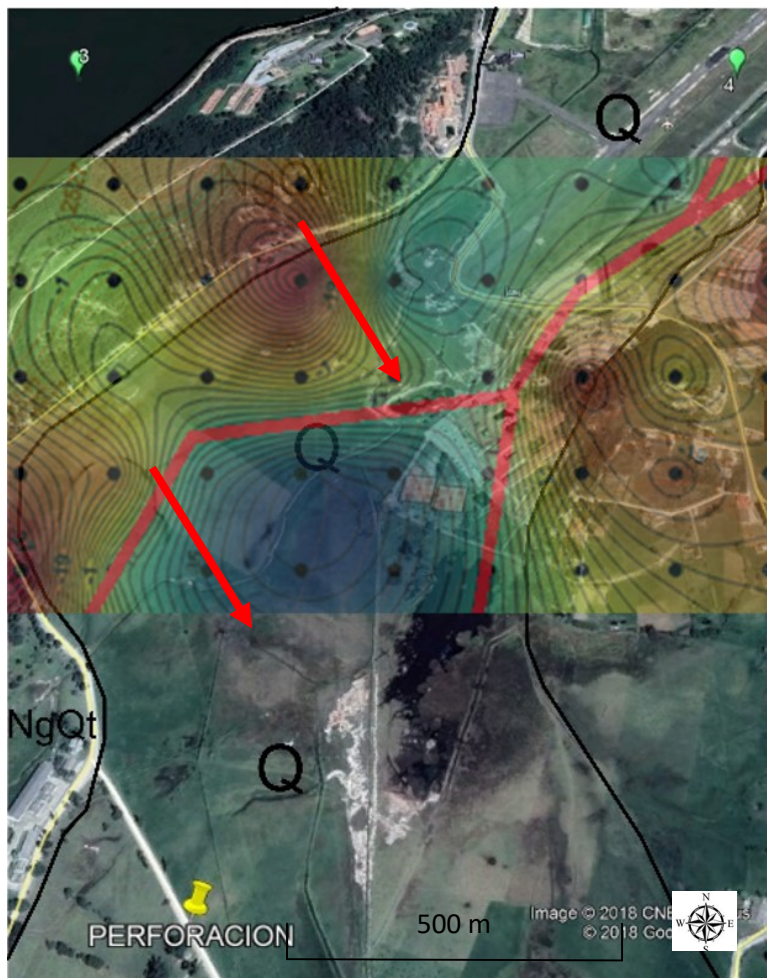


Figura 39. Mapa de anomalía magnética (nT) corregido por deriva instrumental y componente global del campo magnético, sobrepuesto en imagen satelital. Nótese que el alineamiento de las fallas interpretadas en la magnetometría coincide con los afloramientos de agua hidrotermal. Fuente. Google Earth

9.1.2 Directa. Teniendo en cuenta que se realizó 2 perforaciones manuales, una con toma de muestras inalteradas a 10 metros y la otra con toma de muestras alteradas y ensayo SPT, se elaboraron 2 perfiles del subsuelo, se obtuvo los siguientes resultados:

Del primer Sondeo podemos concluir que:

- Los valores de gravedad específica están en el rango de 2.62 a 2.71, característicos de las arcillas.
- El valor obtenido de ángulo de fricción del ensayo de corte directo es de 38 grados y cohesión es de 21.56Kpa, mostrando que es un suelo cohesivo y friccionante.
- La tendencia de la figura Resistividad aparente vs Esfuerzo a compresión simple indica que entre más competente es el material su resistividad eléctrica es mayor.
- La tendencia de la figura Resistividad aparente vs Humedad Natural concluye que la resistividad disminuye al aumentar el porcentaje de humedad.
- La tendencia de la figura Resistividad aparente vs Índice de plasticidad concluye que al aumentar el índice de plasticidad la resistividad disminuye.
- El material predominante del subsuelo en el primer sondeo son unas arcillas limosas
- El perfil del suelo encontrado en el primer sondeo es característico de un depósito cuaternario tipo aluvial el cual se compone principalmente de unas arcillas limosas de alta plasticidad y alto contenido de humedad como se muestra en la figura 40.

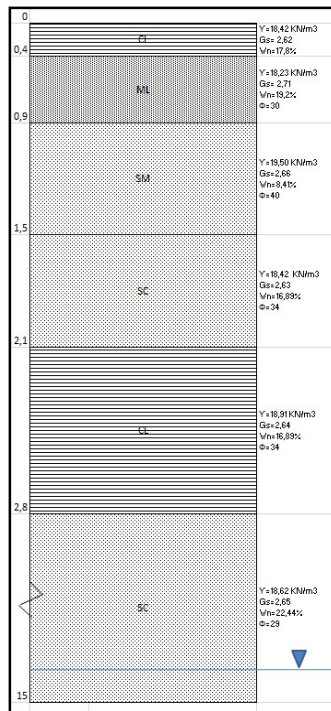


Figura 40. Perfil del subsuelo Sondeo1. Fuente. Elaboración propia

Del segundo sondeo podemos concluir que:

- Los valores de gravedad específica están en el rango de 2.62 a 2.65, característicos de las arenas.
- Los valores obtenidos de ángulo de fricción en el laboratorio están en el rango de 30 a 40 grados, característico de las arenas.
- Del ensayo del SPT se hallan parámetros estimativos de resistencia de acuerdo con la propuesta del doctor Álvaro González, dando como resultado que el ángulo de fricción efectiva es de 33 grados y la cohesión efectiva es de 9.23 Kpa
- Los valores del peso específico están en el rango de 18.33 a 19.3 KN/m³, características de unas arenas arcillosas.
- La clasificación USCS indica que las muestras obtenidas en su mayoría son unas arenas arcillosas.

- La distribución del tamaño de grano varia a profundidad, los 3 primeros metros predominan las arcillas, del metro 3 al 6 las arenas y luego predominan las arenas con contenido de arcillas, en general contenido de gravas es bajo en las muestras.
- La tendencia del gráfico de humedad natural y resistividad eléctrica, se concluye que la resistividad disminuye al aumentar el porcentaje de humedad.
- Es un perfil característico de un depósito cuaternario aluvial el cual se compone inicialmente una capa de suelo inorgánico seguido de arenas arcillosas a profundidad como se muestra en la figura 41.

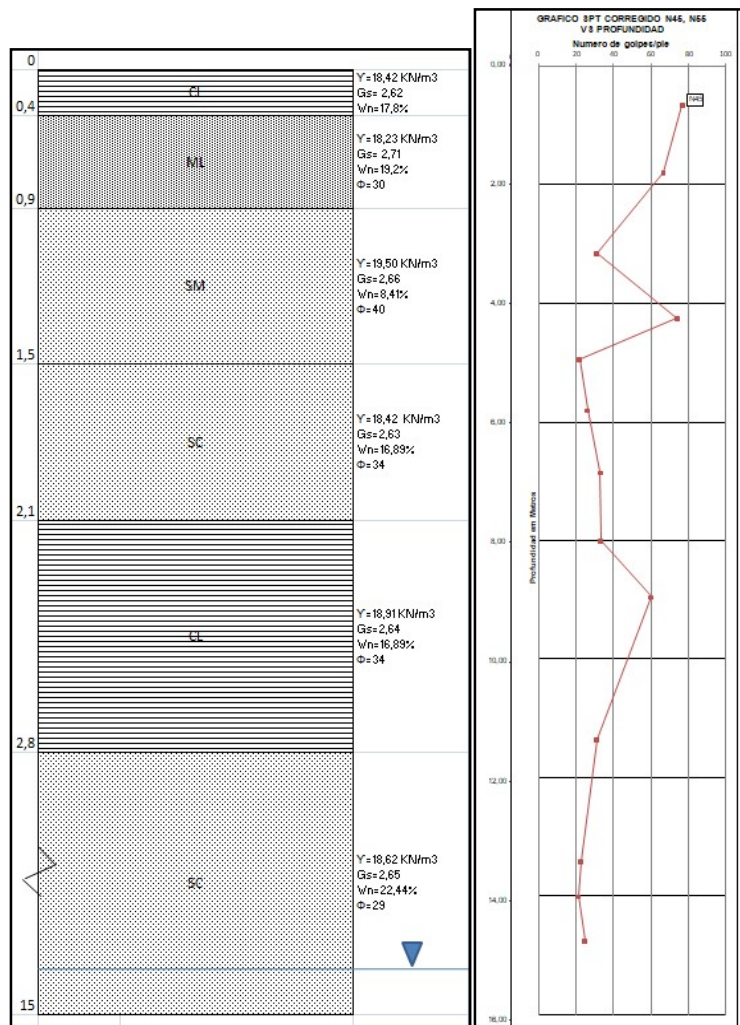


Figura 41. Perfil del subsuelo y Gráfico de SPT corregido N45. Fuente. Elaboración propia

En los gráficos se evidencia niveles muy competentes en el metro 1, 4.5 y 9 aproximadamente, evidenciando que hubo diferentes depositaciones de material de arrastre a través del tiempo geológico, característico de depósitos aluviales.

9.2 Análisis físico químico de aguas termales

En las muestras obtenidas del Pozo azul, se encontró temperatura de 45 ° C, con una concentración de sólidos disueltos totales (SDT) de >2000 ppm y un PH de 6.44, atribuido a la mezcla con una fuente salada sulfatada sódica cuya composición isotópica pesada ha sido relacionada con su origen evaporítico.

Lo anterior clasifica dichas aguas de la siguiente manera:

- De acuerdo a su temperatura como aguas hipertermales.
- De acuerdo su mineralización global como agua termal con mineralización fuerte.
- De acuerdo a su composición como agua termal sulfatada sódica.
- De acuerdo a potencial de hidrogeno como acida.
- Analizados los resultados de la caracterización fisico-química realizada por la UPTC,

en general se pueden clasificar aguas Hipertermales, con mineralización fuerte y alcalinas, sin embargo, se observan 2 puntos donde el PH es más bajo clasificando como aguas Hipertermales, con mineralización fuerte y acidas.

9.3 Modelo conceptual geológico – geotérmico

El flujo hidrotermal proviene de cuerpo magmático en enfriamiento ubicado al sur del municipio de Paipa donde se encuentra un volcán extinto, el reservorio hidrotermal está confinado por las rocas del neógeno, viaja por las rocas de cretácico y fallas regionales (Figura 42)(Alfaro, y otros, 2017, p. 113), en el área de estudio fluye por las fallas cubiertas y atraviesa el depósito cuaternario aflorando en los predios del INFIBOY e ITP (POZO AZUL)(Figura 43).

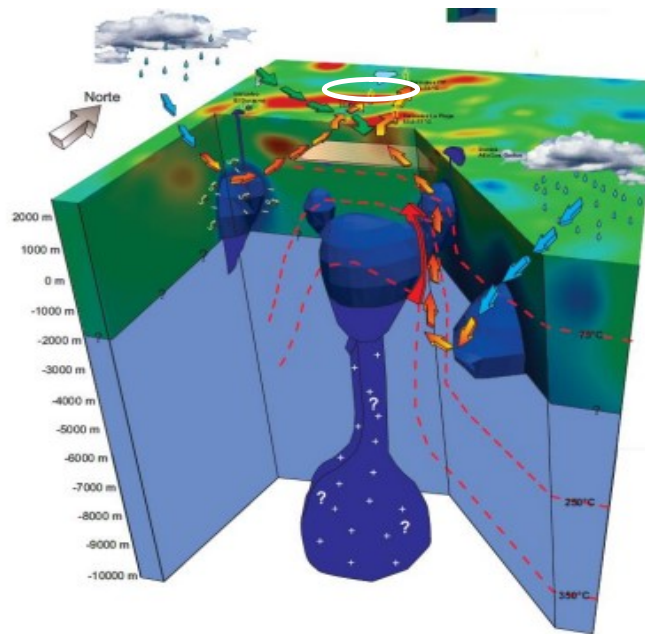


Figura 42. Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa. Las flechas indican el posible recorrido del agua desde las zonas de recarga hacia la zona de estudio (circunferencia blanca). Fuente. Servicio Geológico Colombiano.

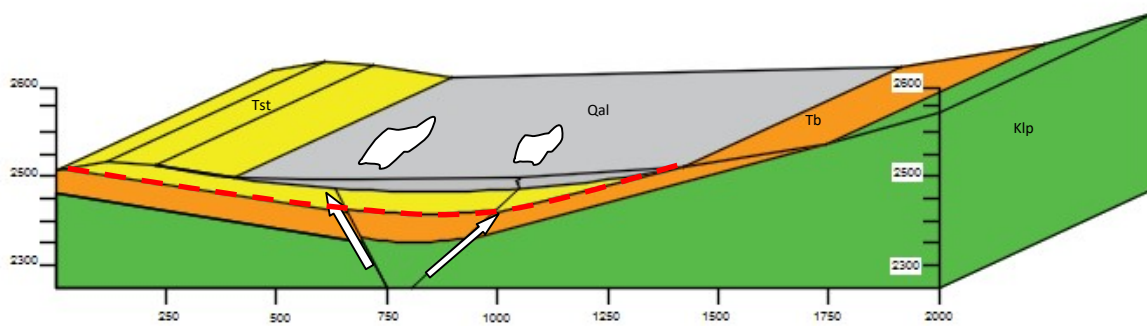



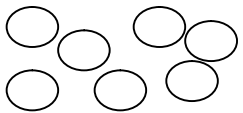


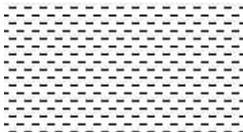
Figura 43. Modelo Geotérmico conceptual de la zona de estudio. Las flechas indican el flujo de agua hidrotermal por las fallas geológicas posteriormente aflorando en superficie creando encharcamientos de agua salobre. Fuente. Elaboración propia

10. Análisis y discusión de los resultados

Las curvas de SEV una vez interpretadas, y después de obtenidos los espesores y las resistividades aparentes de las capas es menester suministrar una explicación geológica considerando las resistividades y en concordancia con la geología local (Tabla 22).

Tabla 16

Resumen Interpretación SEV 5.

Capa	Profundidad (Metros)	Espesor (Metros)	Resistividad aparente (Ω-m)	Perfil Litológico	
				Litología	Descripción
1	0	0.75	173		arenas
2	0,75	0.84	1020		Gravas embebidas en matriz areno arcillosa.
3	1.59	1.62	47.80		Arenas arcillosas
4	3.21	60.59	403		Arenas compactas con alto contenido de arcillas
5	63.8	∞	13.70		arcillas saturadas Formación Tilata

Fuente. Elaboración propia

El SEV 5 muestra que, al parecer, en los primeros metros está presente un suelo arenoso, el cual se encuentra por encima de capas arenosas de variada consistencia. De forma similar

pareciera que después de los 63.3 m se encuentra los niveles arenosos parcialmente saturados
Formación Tilatá

Las secciones en falso color (Figura 38), integra los sondeos 1 y 4 donde se puede apreciar lo siguiente: los valores bajos de resistividad que corresponden a capas parcialmente saturadas de arenas probablemente de la formación Tilatá en el SEV 1 (Colores verdes claros). En el SEV 4, las resistividades son más elevadas en comparación al SEV 1, siendo menos frecuentes las resistividades bajas (Colores verdes claros), correspondiente a la secuencia de arenas y gravas del depósito cuaternario aluvial.

También se integra los sondeos 2,3 y 5 donde se puede apreciar lo siguiente: los valores bajos de resistividad que corresponden a capas parcialmente saturadas de areniscas probablemente de la formación Tilatá en el SEV 2 (Colores verdes claros).

En los SEV 3 y 5, las resistividades son más elevadas en comparación al SEV 2, siendo menos frecuentes las resistividades bajas (Colores verdes claros), correspondiente a la secuencia de arenas y gravas del depósito cuaternario aluvial.

El mapa de anomalía magnética en falso color (Figura 22). Se encuentran tres zonas, la primera, colores rojos, presenta valores anómalos de carácter negativo. La segunda, colores azules oscuros, posee valores anómalos de carácter positivo. Finalmente, la zona amarilla, con valores intermedios. Las zonas con alto gradiente en relación con el mapa de anomalía magnética evidencian el posible trazado de fallas como se muestra en la figura 44.

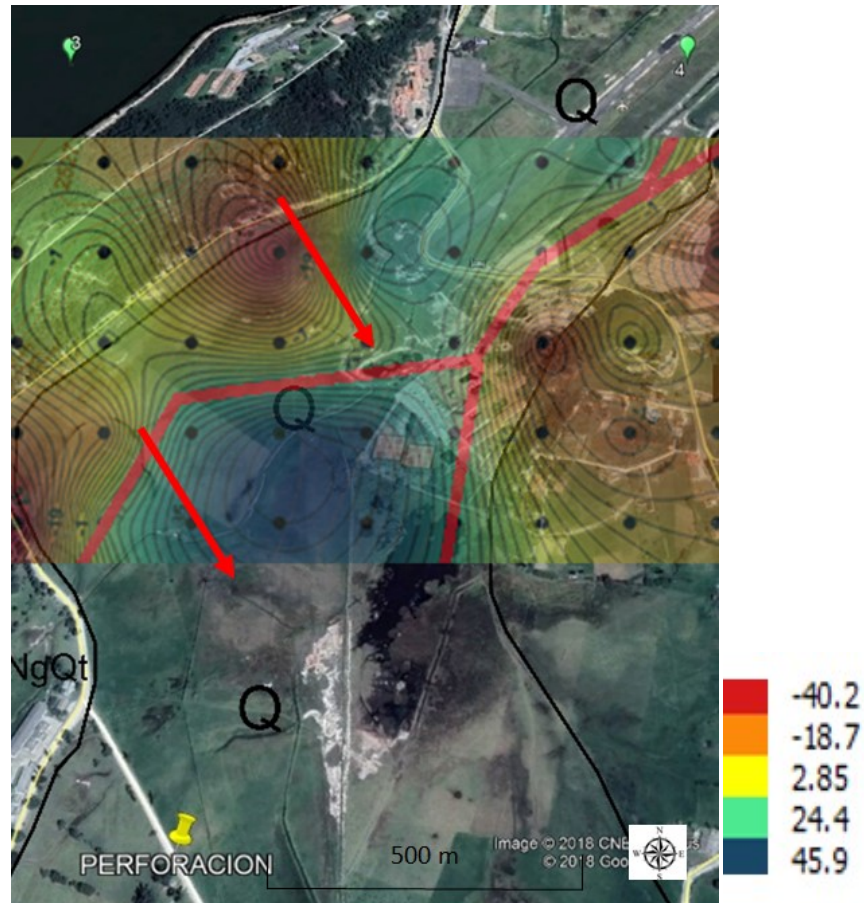


Figura 44. Mapa de anomalía magnética y la posible ubicación de las fallas (Línea roja).Fuente. Google Earth

Mediante las perforaciones se pudo establecer que, hacia la parte norte de la zona de estudio el depósito está conformado por arcillas limosas y hacia la parte sur los primeros metros del depósito están conformados por capas arenó arcillosas, con algunos niveles de gravas. El nivel freático en el norte está en superficie y hacia el sur se encontró a una profundidad de 4.9m.

Los resultados de los análisis de campo y laboratorio, de las propiedades físico químicas, de las muestras de agua termal recolectadas del Pozo azul, permite clasificarlas como aguas Hipertermales, con mineralización fuerte, acida y sulfatada sódica en concordancia con la composición química, evaluados los resultados del laboratorio de las muestras de puntos de afloramiento de agua identificados por la UPTC clasifican en su mayoría como aguas Hipertermales, con mineralización fuerte y alcalinas.

Los fluidos descargados por los manantiales de sistema geotérmico de Paipa, no son representativos del fluido del reservorio de agua termal, a causa de los procesos de mezcla que experimentan. La fase acuosa de los manantiales termales está dominada por una fuente salina sulfatada sódica de probable origen evaporítico, que enmascara su composición química e isotópica. (Alfaro, 2012)

La recarga regional del sistema geotérmico de Paipa proviene de los afloramientos de la formación Une localizadas en el flanco occidental del Anticlinal Tibasosa-Toledo, a una elevación entre 2900 y 3000 m.s.n.m.(Alfaro & Malo, 2017)

Luego de surtida la zona de recarga con las aguas meteóricas se infiltra a mayor profundidad por medio de fallas normales y cruces entre fallas posteriormente el agua subterránea se calienta al entrar en contacto con los cuerpos intrusivos en enfriamiento y finalmente la zona de descarga se ubica en la zona de estudio, al oriente del cruce entre las fallas El Bizcocho – El Hornito.

11. Conclusiones

La geoelectricidad, identificó las resistividades y los espesores de capa, hasta una profundidad de aproximadamente 160m.

Las resistividades varían en el depósito cuaternario dependiendo de la humedad natural.

El estudio magnético, permitió conocer la variación espacial de la anomalía magnética, e inferir la posible ubicación de las fallas geológicas a profundidad.

Las perforaciones mostraron que el depósito hacia la parte norte está conformado por arcillas limosas y hacia la parte sur por arenas arcillosas, ocasionalmente con algunos niveles de gravas, siendo un perfil característico de un depósito cuaternario aluvial.

La tendencia de la gráfica Resistividad aparente vs Esfuerzo a compresión simple indica que entre más competente es el material su resistividad eléctrica es mayor para el suelo de la primera perforación.

La tendencia de la gráfica Resistividad aparente vs Humedad Natural concluye que la resistividad disminuye al aumentar el porcentaje de humedad en los suelos de las dos perforaciones.

La tendencia de la gráfica Resistividad aparente vs Índice de plasticidad concluye que al aumentar el índice de plasticidad la resistividad disminuye para el suelo de la primera perforación.

Las aguas termales analizadas en Pozo Azul son; hipertermales, con mineralización fuerte, acidas y con composición sulfatada sódica.

Los fluidos descargados por los manantiales del sistema geotérmico, son poco representativos del fluido del reservorio, debido a los procesos de mezcla sufridos en su recorrido a superficie.

La descarga del sistema geotérmico tiene lugar en la zona de estudio, al oriente del cruce entre las fallas El Bizcocho – El Hornito, dichas estructuras y en especial sus cruces son de especial importancia en el flujo hidrotermal, como las fallas interpretadas por medio de la magnetometría.

El cuaternario aluvial está saturado de aguas termo minerales ya que en la zona de estudio se observan varios afloramientos de agua que saturan el subsuelo y a nivel superficial existen costras de mineralizaciones de sales producto de la evaporación del agua por efecto del sol, teniendo en cuenta el análisis fisicoquímico de las aguas termales, dichas aguas tienen una mineralización fuerte en especial alto contenido de Sodio, Potasio y Sulfatos que al momento de fluir y distribuirse en el depósito a través del tiempo geológico elevaron la proporción del contenido de estos elementos en el subsuelo y de acuerdo a la medición del PH del suelo puede existir una influencia de las aguas termo minerales específicamente en este parámetro, otro factor a destacar es la alta conductividad de las aguas termales que se refleja en la baja resistividad de los materiales componentes del subsuelo medida al momento de realizar la prospección indirecta mediante la geoelectrónica.

Evaluada la geología estructural encontrada en la zona de estudio y las altas temperaturas medidas en los afloramientos de agua termal, evidencia condiciones favorables para el aprovechamiento de la energía geotérmica en el sector.

12. Recomendaciones

Es necesario realizar una perforación exploratoria a profundidad para definir el verdadero potencial geotérmico y así poder pensar a futuro en la planeación, ejecución y puesta en marcha de una planta de aprovechamiento de energía geotérmica en el departamento de Boyacá.

Realizar otros métodos geofísicos como radiometría y gravimetría, con el fin de complementar la información del Estudio.

Referencias Bibliográficas

- Alcaldía Municipal de Paipa Boyacá. (2000). Plan de Ordenamiento Territorial Paipa Boyacá 2000 - 2010. 29.
- Alfaro, C. (2012). *Evaluación de la composición isotópica del agua de precipitación en el área geotérmica Paipa-Iza*. Bogotá: INGEOMINAS. Informe técnico.
- Alfaro, C., & Malo, J. (2017). *Estimación de la elevación de la recarga del Sistema Geotérmico de Paipa a partir de hidrología isotópica*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Alfaro, C., Matiz, J., Rueda, J., Rodríguez, G. F., González, C., Beltrán, M., . . . Malo, J. (2017). *Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa*. Informe. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Alfaro, C., Velandia, F., Cepeda, H., Pardo, N., Vásquez, A., & Espinosa, O. (2005). *Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa*. INGEOMINAS.
- Arias, M. E. (1999). *Les méthodes de sondages électriques et électromagnétiques: Exemples d'application en Hydrogéologie*. Diss. Thèse de Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées, (Proyecto de grado). Université Pierre et Marie Curie, Paris .
- Balderrama, M. S., & Flores, D.-I. G. (2009). Aguas termales subterráneas y su uso terapéutico medicinal en el departamento de Oruro-Bolivia.
- Baptiste, B. J., & François, D. R. (1849). *Viajes científicos a los Andes ecuatoriales*. . . Instituto Colombiano de Cultura Hispánica.
- Etayo, S. F. (1965). Sinopsis estratigráfica de la región de Villa de Leiva y zonas próximas. *Boletín de Geología*, 21, 32.

- Ferreira, P., & Hernández, R. (1988). *Evaluación Geotérmica en el Area de Paipa, Basada en Técnicas Isotópicas, Geoquímica y Aspectos Estructurales. (Proyecto de Grado)*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- Franco, J. (2016). *Actualización geoelectrica en el área geotérmica de Paipa – Boyacá*. Medellín: Servicio Geológico Colombiano.
- González, A. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT en X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. *Sociedad Colombiana de Ingenieros– Sociedad Colombiana de Geotecnia*.
- Moyano, I. (2015). *Modelamiento de estructuras geotérmicas ocultas a partir de la interpretación de anomalías magnetotélúricas de resistividad en la región de Paipa, Boyacá, Colombia*. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/49528/1/2969017.2015.pdf>
- Navia, A., & Barriga, A. (1929). *Informe sobre las aguas termominerales de Paipa, Colombia*. Bogotá: Gobernación de Boyacá. Imprenta Nacional.
- Olson, A., & Carter, E. (1934). Devonian fauna from Colombia, south america. *Proc.Geol.Soc.Am.,* 270.
- Ortiz, I., & Alfaro, C. (2010). *Inventario de puntos de agua y geoquímica de las áreas geotérmicas de Paipa e Iza: aguas, suelos y peloides*. Bogotá: INGEOMINAS. Informe técnico.
- Parasnis, D. S. (2012). *Principios de geofísica aplicada*. Springer Science & Business Media.
- Renzoni, G. (1981). Geología del cuadrángulo J-12 Tunja. *Boletín Geológico*, 24(2), 54.
- Renzoni, G., Rosas, H., & Etayo, F. (1983). Mapas Geológicos 171-Duitama y 191 Tunja escala 1: 100000.

Scheibe, E. A. (1937). Estudios geológicos y paleontológicos sobre la Cordillera Oriental de Colombia. *Druck: P. & G. Gärtner*.

Stutzer, O. e. (1942). Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia. *mprenta nacional*, 5(1).

Trumpy, D. (1943). Pre-Cretaceous of Colombia- *Bull. Geol. Soc. Am.*, 54, 1281.

Vásquez, L. (2012). *Aplicación geofísica de métodos potenciales en el área geotérmica de Paipa-Iza*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. Informe técnico.

Anexos

Anexo A. Resultados del ensayo de compresión simple muestra 1

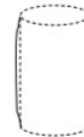
PROYECTO: PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA
 SITIO: SECTOR ITP
 SOLICITANTE: ING. DAIRO GÓMEZ
 DESCRIPCION: Arcilla limosa marrón con tonos grises, raíces y trazas de arena.

MUESTRA: S4 - M1
 PROFUND (m): 1,00 - 1,60
 FECHA DE TOMA: 21-jun-19
 FECHA ENTREGA: 25-jun-19

DIMENSION INICIAL		
Diámetro	6,00	cm
Altura	12,00	cm
Area	28,27	cm ²
Volumen	339,28	cm ³

HUMEDAD

Peso Vdr+Mtra.Hum 631,00 g
 Peso Vdr+Mtra.Seca 467,97 g
 Peso Vidrio g
 % de Humedad 37,8 %

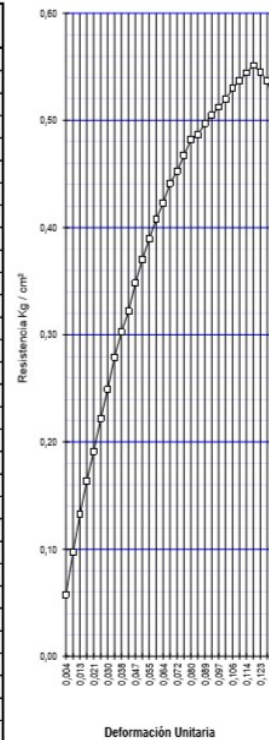


plano de falla

Celda de Carga 0,25 KN
 Factor K = Kg

PESO UNITARIO
 Húmedo 1,860 g/cm³

Lect. Carga kN	Carga en kilos	Lect. Def. 0,001"	Deform. Unitaria	1-Defor. Unitaria	Area Correg cm ²	Resistencia Kg/cm ²
0,016	1,6	0,020	0,0042	0,9958	28,39	0,06
0,027	2,8	0,040	0,0085	0,9915	28,52	0,10
0,037	3,8	0,060	0,0127	0,9873	28,64	0,13
0,046	4,7	0,080	0,0169	0,9831	28,76	0,16
0,054	5,5	0,100	0,0212	0,9788	28,89	0,19
0,063	6,4	0,120	0,0254	0,9746	29,01	0,22
0,071	7,3	0,140	0,0296	0,9704	29,14	0,25
0,080	8,2	0,160	0,0339	0,9661	29,26	0,28
0,087	8,9	0,180	0,0381	0,9619	29,39	0,30
0,093	9,5	0,200	0,0423	0,9577	29,52	0,32
0,101	10,3	0,220	0,0466	0,9534	29,65	0,35
0,108	11,0	0,240	0,0508	0,9492	29,79	0,37
0,114	11,6	0,260	0,0550	0,9450	29,92	0,39
0,120	12,3	0,280	0,0593	0,9407	30,05	0,41
0,126	12,8	0,300	0,0635	0,9365	30,19	0,42
0,131	13,4	0,320	0,0677	0,9323	30,33	0,44
0,136	13,8	0,340	0,0720	0,9280	30,47	0,45
0,140	14,3	0,360	0,0762	0,9238	30,61	0,47
0,145	14,8	0,380	0,0804	0,9196	30,75	0,48
0,147	15,0	0,400	0,0847	0,9153	30,89	0,49
0,151	15,4	0,420	0,0889	0,9111	31,03	0,50
0,154	15,7	0,440	0,0931	0,9069	31,18	0,50
0,157	16,0	0,460	0,0974	0,9026	31,32	0,51
0,160	16,4	0,480	0,1016	0,8984	31,47	0,52
0,164	16,8	0,500	0,1058	0,8942	31,62	0,53
0,167	17,1	0,520	0,1101	0,8899	31,77	0,54
0,170	17,4	0,540	0,1143	0,8857	31,92	0,54
0,173	17,7	0,560	0,1185	0,8815	32,08	0,55
0,172	17,6	0,580	0,1228	0,8772	32,23	0,55
0,170	17,4	0,600	0,1270	0,8730	32,39	0,54
0,166	17,0	0,620	0,1312	0,8688	32,54	0,52



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo B. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg muestra 1 y Tamizado, la gráfica muestra la obtención de límite líquido.

PROYECTO:	<u>PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA</u>	MUESTRA:	<u>S4 - M1</u>
SITIO:	<u>SECTOR ITP</u>	PROFUND (m):	<u>1,00 - 1,60</u>
SOLICITANTE:	<u>ING. DAIRO GÓMEZ</u>	FECHA ENSAYO:	<u>20-jun-19</u>
DESCRIPCION:	<u>Arcilla limosa marrón con tonos grises, raíces y trazas de arena</u>	FECHA ENTREGA:	<u>27-jun-19</u>

LIMITE LIQUIDO			
Número de Golpes	35	24	16
Vidrio No.	7A	33	76
P1 (grs)	28,92	25,75	30,18
P2 (grs)	22,16	19,80	22,78
P3 (grs)	5,22	5,28	5,23
% Humedad	39,9	41,0	42,2

GRADACION			
P1 (grs) =	88,34	P2=	
Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Pasa
3			
2			
1½			
1			
¾			
½			
3/8			
4			100,0
10	1,40	2,0	98,0
40	2,50	3,7	94,3
100	3,10	4,5	89,8
200	2,80	4,1	85,7

LIMITE PLASTICO		H. NATURAL	
Vidrio No.	44C	25C	38
P1 (grs)	18,71	23,47	135,56
P2 (grs)	17,45	22,28	109,74
P3 (grs)	12,28	17,31	41,40
% Humedad	24,4	23,9	37,8

RESULTADOS

Límite Líquido	<u>40,9</u>	%
Límite Plástico	<u>24,2</u>	%
Índice Plasticidad	<u>16,7</u>	%

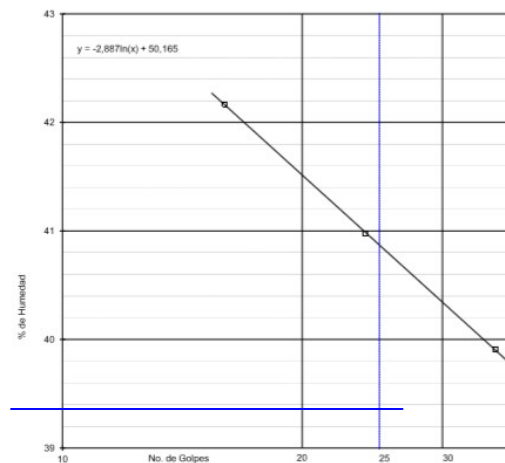
Índice de Grupo	_____
A.A.S.H.T.O.	_____
U.S.C.S.	<u>CL-ML</u>

OBSERVACIONES

ELABORO	<u>Ju/C CJ</u>
	<u>Laborante</u>

REVISO	<u>AJ GM</u>
	<u>Des. Técnico</u>

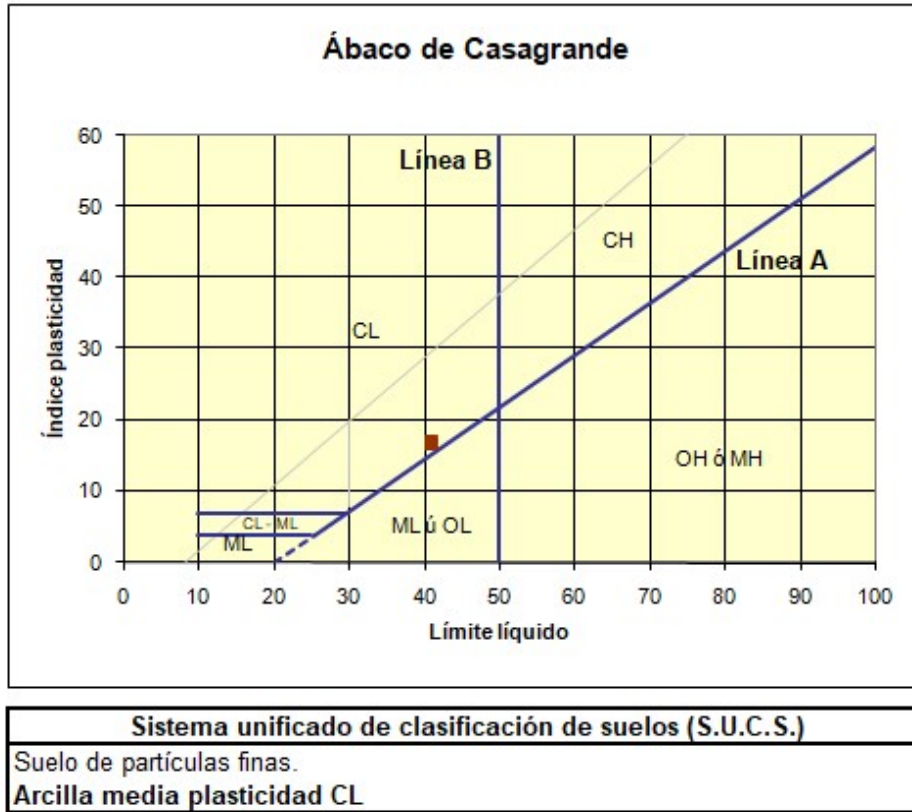
APROBO	<u>Misael Guerra A</u>
--------	------------------------



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo C. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS muestra

1



Fuente. Elaboración propia

Anexo D. Ensayo de compresión simple muestra 3.

PROYECTO:	<u>PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA</u>	MUESTRA:	<u>S4 - M3</u>
SITIO:	<u>SECTOR ITP</u>	PROFUND (m):	<u>3,00 - 3,60</u>
SOLICITANTE:	<u>ING. DAIRO GÓMEZ</u>	FECHA DE TOMA:	<u>21-jun-19</u>
DESCRIPCION:	<u>Arcilla limosa habano con tonos negros y rastros de arena media a fina.</u>	FECHA ENTREGA:	<u>25-jun-19</u>

PROBETA		
DIMENSION INICIAL		
Diámetro	6,00	cm
Altura	12,00	cm
Área	28,27	cm²
Volumen	339,28	cm³

HUMEDAD	
Peso Vdr+Mtra.Hum	632,00 g
Peso Vdr+Mtra.Seca	476,29 g
Peso Vidrio	g
% de Humedad	32,7 %

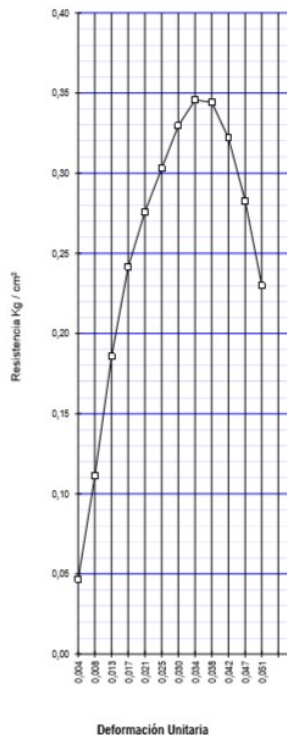


plano de falla

Celda de Carga 25,0 KN
Factor K = Kg

PESO UNITARIO
Húmedo 1,863 g/cm³

Lect. Carga kN	Carga en kilos	Lect. Def. 0,001"	Deform. Unitaria	1-Defor. Unitaria	Area Correg cm²	Resistencia Kg/cm²
0,013	1,3	0,020	0,0042	0,9958	28,39	0,05
0,031	3,2	0,040	0,0085	0,9915	28,52	0,11
0,052	5,3	0,060	0,0127	0,9873	28,64	0,19
0,068	6,9	0,080	0,0169	0,9831	28,76	0,24
0,078	8,0	0,100	0,0212	0,9788	28,89	0,28
0,086	8,8	0,120	0,0254	0,9746	29,01	0,30
0,094	9,6	0,140	0,0296	0,9704	29,14	0,33
0,099	10,1	0,160	0,0339	0,9661	29,26	0,35
0,099	10,1	0,180	0,0381	0,9619	29,39	0,34
0,093	9,5	0,200	0,0423	0,9577	29,52	0,32
0,082	8,4	0,220	0,0466	0,9534	29,65	0,28
0,067	6,8	0,240	0,0508	0,9492	29,79	0,23



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo E. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg muestra 3 y Tamizado, la gráfica muestra la obtención de límite líquido.

PROYECTO:	<u>PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA</u>	MUESTRA:	<u>S4 - M3</u>
SITIO:	<u>SECTOR ITP</u>	PROFUND (m):	<u>3,00 - 3,60</u>
SOLICITANTE	<u>ING. DAIRO GÓMEZ</u>	FECHA ENSAYO:	<u>20-jun-19</u>
DESCRIPCION	<u>Arrolla limosa habano con tonos negros y rastros de arena media a fina.</u>	FECHA ENTREGA:	<u>27-jun-19</u>

LIMITE LIQUIDO			
Número de Golpes	35	24	15
Vidrio No.	8A	31	58
P1 (grs)	27,85	26,46	30,22
P2 (grs)	21,05	19,87	22,22
P3 (grs)	5,10	3,08	4,95
% Humedad	42,6	44,6	46,3

GRADACION			
P1 (grs) =	112,87	P2=	
Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Pasa
3			
2			
1½			
1			
¾			
½			
¾			
4			100,0
10	1,30	1,2	98,8
40	3,50	3,1	95,7
100	2,70	2,4	93,4
200	1,80	1,6	91,8

LIMITE PLASTICO		H. NATURAL	
Vidrio No.	3C	2C	29
P1 (grs)	18,25	22,46	191,33
P2 (grs)	17,13	21,28	154,43
P3 (grs)	12,46	16,25	41,56
% Humedad	24,1	23,9	32,7

RESULTADOS	
Límite Líquido	<u>44,2</u> %
Límite Plástico	<u>24,0</u> %
Índice Plasticidad	<u>20,2</u> %

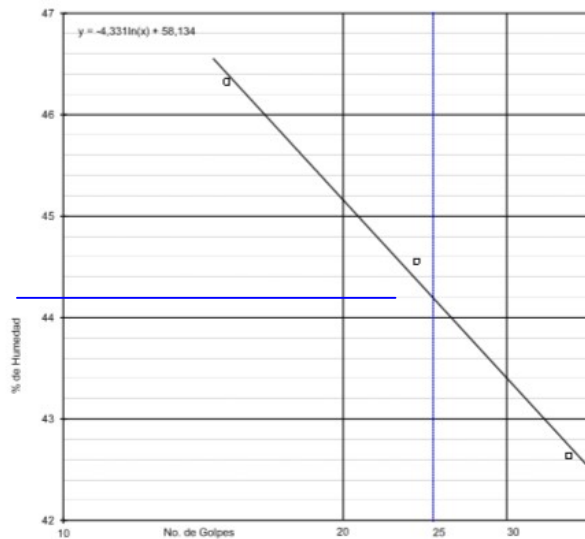
Índice de Grupo	<u> </u>
A.A.S.H.T.O.	<u> </u>
U.S.C.S.	<u>CL</u>

OBSERVACIONES

ELABORO Ju C CJ
Laborante

REVISO Ad GM
Des. Técnico

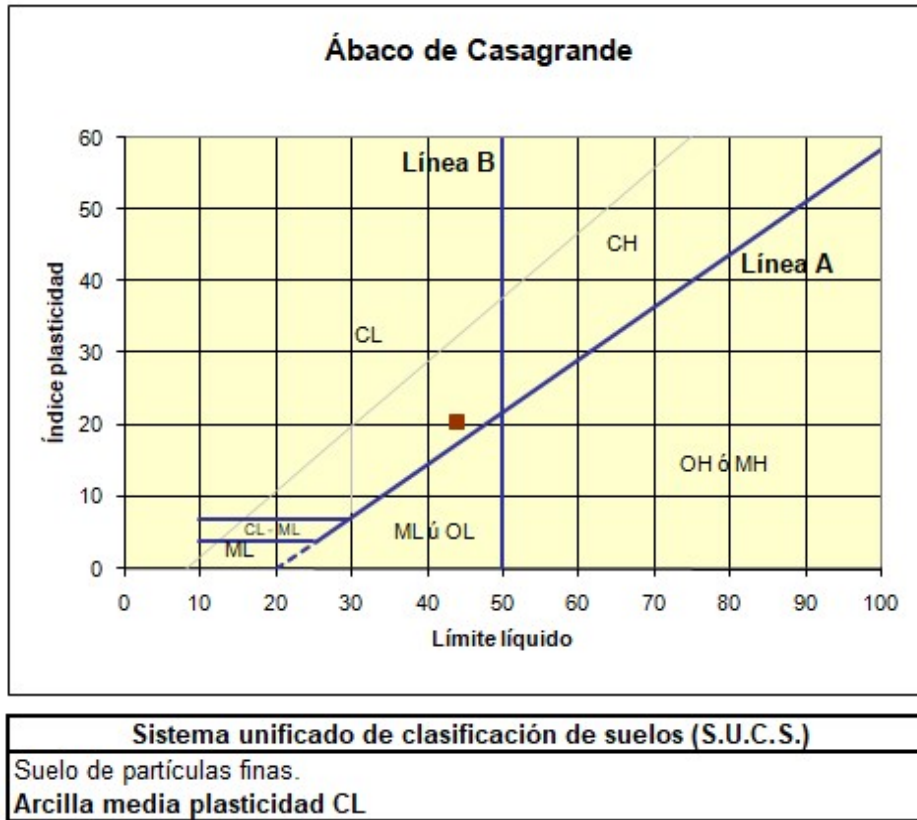
APROBO Misael Guerra A
Dir. General



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo F. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS, muestra

3



Fuente. Elaboración propia

Anexo G. Ensayo de compresión simple muestra 5

PROYECTO: PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA
 SITIO: SECTOR ITP
 SOLICITANTE: ING. DAIRO GÓMEZ
 DESCRIPCION: Arcilla limosa gris oscuro con trazas de arena fina.

MUESTRA: S4 - M5
 PROFUND (m): 5,00 - 5,60
 FECHA DE TOMA: 21-jun-19
 FECHA ENTREGA: 25-jun-19

PROBETA		
DIMENSION INICIAL		
Diámetro	6,00	cm
Altura	12,00	cm
Área	28,27	cm ²
Volumen	339,28	cm ³

HUMEDAD	
Peso Vdr+Mtra.Hum	597,00 g
Peso Vdr+Mtra.Seca	442,49 g
Peso Vidrio	g
% de Humedad	34,9 %

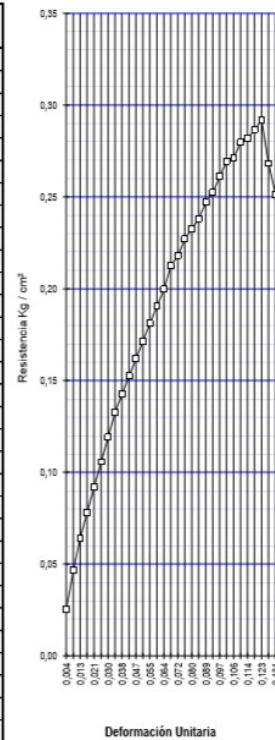


piano de falla

Celda de Carga 0,25 KN
 Factor K = Kg

PESO UNITARIO
 Húmedo 1,760 g/cm³

Lect. Carga kN	Carga en kilos	Lect. Def. 0,001"	Deform. Unitaria	1-Defor. Unitaria	Area Correg cm ²	Resistencia Kg/cm ²
0,007	0,7	0,020	0,0042	0,9958	28,39	0,03
0,013	1,3	0,040	0,0085	0,9915	28,52	0,05
0,018	1,8	0,060	0,0127	0,9873	28,64	0,06
0,022	2,2	0,080	0,0169	0,9831	28,76	0,08
0,026	2,7	0,100	0,0212	0,9788	28,89	0,09
0,030	3,1	0,120	0,0254	0,9746	29,01	0,11
0,034	3,5	0,140	0,0296	0,9704	29,14	0,12
0,038	3,9	0,160	0,0339	0,9661	29,26	0,13
0,041	4,2	0,180	0,0381	0,9619	29,39	0,14
0,044	4,5	0,200	0,0423	0,9577	29,52	0,15
0,047	4,8	0,220	0,0466	0,9534	29,65	0,16
0,050	5,1	0,240	0,0508	0,9492	29,79	0,17
0,053	5,4	0,260	0,0550	0,9450	29,92	0,18
0,056	5,7	0,280	0,0593	0,9407	30,05	0,19
0,059	6,0	0,300	0,0635	0,9365	30,19	0,20
0,063	6,4	0,320	0,0677	0,9323	30,33	0,21
0,065	6,6	0,340	0,0720	0,9280	30,47	0,22
0,068	6,9	0,360	0,0762	0,9238	30,61	0,23
0,070	7,2	0,380	0,0804	0,9196	30,75	0,23
0,072	7,4	0,400	0,0847	0,9153	30,89	0,24
0,075	7,7	0,420	0,0889	0,9111	31,03	0,25
0,077	7,9	0,440	0,0931	0,9069	31,18	0,25
0,080	8,2	0,460	0,0974	0,9026	31,32	0,26
0,083	8,5	0,480	0,1016	0,8984	31,47	0,27
0,084	8,6	0,500	0,1058	0,8942	31,62	0,27
0,087	8,9	0,520	0,1101	0,8899	31,77	0,28
0,088	9,0	0,540	0,1143	0,8857	31,92	0,28
0,090	9,2	0,560	0,1185	0,8815	32,08	0,29
0,092	9,4	0,580	0,1228	0,8772	32,23	0,29
0,085	8,7	0,600	0,1270	0,8730	32,39	0,27
0,080	8,2	0,620	0,1312	0,8688	32,54	0,25



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo H. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg y Tamizado de la muestra 5, la figura muestra la obtención de límite líquido.

PROYECTO:	<u>PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA</u>	MUESTRA:	<u>S4 - M5</u>
SITIO:	<u>SECTOR ITP</u>	PROFUND (m):	<u>5,00 - 5,60</u>
SOLICITANTE	<u>ING. DAIRO GÓMEZ</u>	FECHA ENSAYO:	<u>20-jun-19</u>
DESCRIPCION	<u>Arcilla limosa gris oscuro con trazos de arena fina.</u>	FECHA ENTREGA:	<u>27-jun-19</u>

Número de Golpes	35	24	15
Vidho No.	175	93	209
P1 (grs)	27,84	26,39	27,92
P2 (grs)	20,27	19,12	19,82
P3 (grs)	5,14	5,17	5,19
% Humedad	50,0	52,1	55,4

P1 (grs) =	51,98	P2=		
Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Pasa	
3				
2				
1½				
1				
¾				
½				
¾				
1/2				
3/8				
4			100,0	
10	0,92	1,8	98,2	
40	1,45	2,8	95,4	
100	2,70	5,2	90,2	
200	1,80	3,5	86,8	

Vidho No.	53C	33C	42
P1 (grs)	20,82	17,51	112,63
P2 (grs)	19,93	16,51	94,48
P3 (grs)	16,69	12,97	42,50
% Humedad	27,5	28,2	34,9

Límite Líquido	<u>52,1</u>	%
Límite Plástico	<u>27,9</u>	%
Indice Plasticidad	<u>24,2</u>	%

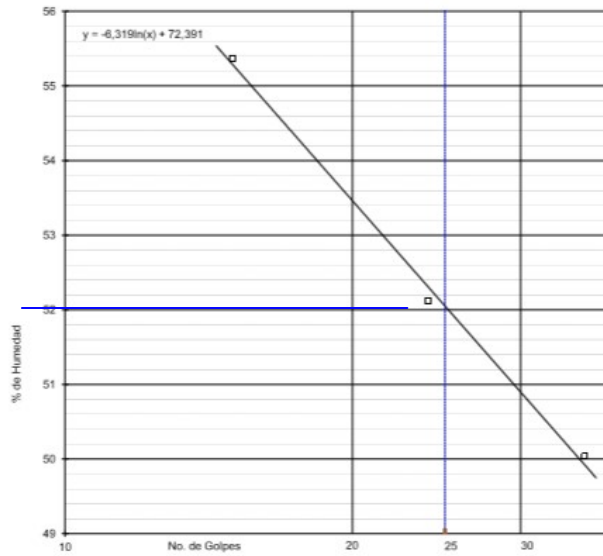
Indice de Grupo _____
 A.A.S.H.T.O. _____
 U.S.C.S. 4-MH

OBSERVACIONES _____

ELABORO Ju/C Cj
 Letorante

REVISO Ad GM
 Des. Técnico

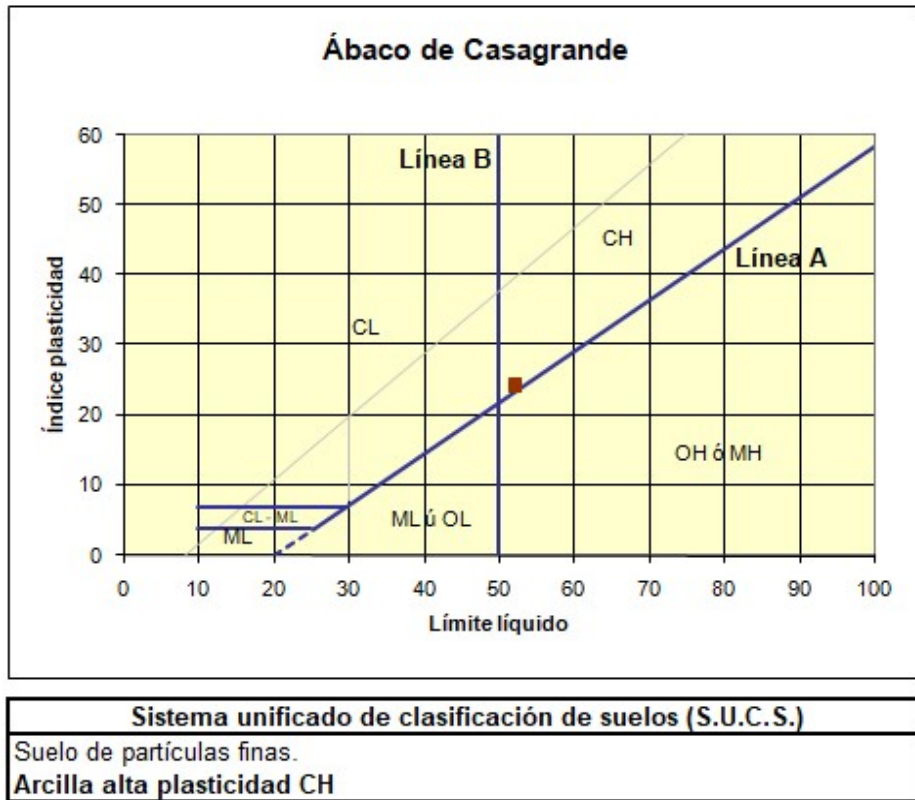
APROBADO Misael Guerra A



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo I. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS, muestra

5



Fuente. Elaboración propia

Anexo J. Ensayo de compresión simple muestra 6

PROYECTO: PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA
 SITIO: SECTOR ITP
 SOLICITANTE: ING. DAIRO GÓMEZ
 DESCRIPCION: Arcilla limosa gris oscuro con rastros de arena fina a media

MUESTRA: S4 - M6
 PROFUND (m): 6,00 - 6,60
 FECHA DE TOMA: 21-jun-19
 FECHA ENTREGA: 25-jun-19

PROBETA

DIMENSION INICIAL		
Diámetro	6,00	cm
Altura	12,00	cm
Area	28,27	cm ²
Volumen	339,28	cm ³

HUMEDAD

Peso Vdr+Mtra.Hum	553,00	g
Peso Vdr+Mtra.Seca	390,39	g
Peso Vidrio		g
% de Humedad	41,7	%

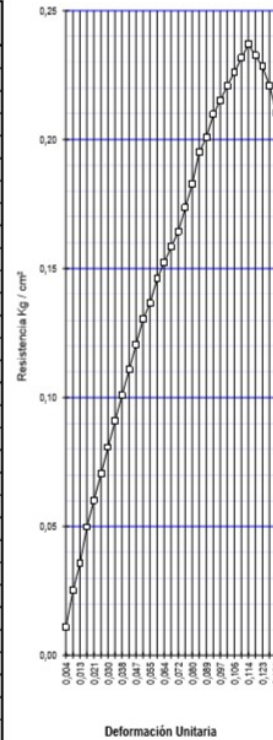


plano de falla

Celda de Carga 0,25 KN
 Factor K = Kg

PESO UNITARIO
 Húmedo 1,630 g/cm³

Lect. Carga kN	Carga en kilos	Lect. Def. 0,001"	Deform. Unitaria	1-Defor. Unitaria	Area Correg cm ²	Resistencia Kg/cm ²
0,003	0,3	0,020	0,0042	0,9958	28,39	0,01
0,007	0,7	0,040	0,0085	0,9915	28,52	0,03
0,010	1,0	0,060	0,0127	0,9873	28,64	0,04
0,014	1,4	0,080	0,0169	0,9831	28,76	0,05
0,017	1,7	0,100	0,0212	0,9788	28,89	0,06
0,020	2,0	0,120	0,0254	0,9746	29,01	0,07
0,023	2,4	0,140	0,0296	0,9704	29,14	0,08
0,026	2,7	0,160	0,0339	0,9661	29,26	0,09
0,029	3,0	0,180	0,0381	0,9619	29,39	0,10
0,032	3,3	0,200	0,0423	0,9577	29,52	0,11
0,035	3,6	0,220	0,0466	0,9534	29,65	0,12
0,038	3,9	0,240	0,0508	0,9492	29,79	0,13
0,040	4,1	0,260	0,0550	0,9450	29,92	0,14
0,043	4,4	0,280	0,0593	0,9407	30,05	0,15
0,045	4,6	0,300	0,0635	0,9365	30,19	0,15
0,047	4,8	0,320	0,0677	0,9323	30,33	0,16
0,049	5,0	0,340	0,0720	0,9280	30,47	0,16
0,052	5,3	0,360	0,0762	0,9238	30,61	0,17
0,055	5,6	0,380	0,0804	0,9196	30,75	0,18
0,059	6,0	0,400	0,0847	0,9153	30,89	0,20
0,061	6,2	0,420	0,0889	0,9111	31,03	0,20
0,064	6,5	0,440	0,0931	0,9069	31,18	0,21
0,066	6,7	0,460	0,0974	0,9026	31,32	0,22
0,068	6,9	0,480	0,1016	0,8984	31,47	0,22
0,070	7,2	0,500	0,1058	0,8942	31,62	0,23
0,072	7,4	0,520	0,1101	0,8899	31,77	0,23
0,074	7,6	0,540	0,1143	0,8857	31,92	0,24
0,073	7,5	0,560	0,1185	0,8815	32,08	0,23
0,072	7,4	0,580	0,1228	0,8772	32,23	0,23
0,070	7,2	0,600	0,1270	0,8730	32,39	0,22
0,067	6,8	0,620	0,1312	0,8688	32,54	0,21



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo K. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg y Tamizado de la muestra 6, la figura muestra la obtención de límite líquido.

PROYECTO:	<u>PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA</u>	MUESTRA:	<u>G4 - M6</u>
SITIO:	<u>SECTOR ITP</u>	PROFUND (m):	<u>6,00 - 6,60</u>
SOLICITANTE:	<u>ING. DAIRO GÓMEZ</u>	FECHA ENSAYO:	<u>20-jun-19</u>
DESCRIPCION:	<u>Arcilla limosa gris oscuro con rastros de arena fina a media.</u>	FECHA ENTREGA:	<u>27-jun-19</u>

LÍMITE LÍQUIDO				GRADACION			
Número de Golpes	35	23	15	P1 (grs) =	59,85	P2=	
Vidrio No.	181	206	178	Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Pasa
P1 (grs)	30,24	24,37	24,42	3			
P2 (grs)	21,29	17,27	17,17	2			
P3 (grs)	5,11	5,07	5,32	1½			
% Humedad	55,3	58,2	61,2	1			
				¾			
				1/2			
				3/8			
				4			100,0
				10	1,01	1,7	98,3
				40	1,48	2,5	95,8
				100	2,25	3,8	92,1
				200	1,10	1,8	90,2

LÍMITE PLÁSTICO		H. NATURAL	
Vidrio No.	5C	45C	36
P1 (grs)	18,58	22,30	126,41
P2 (grs)	17,52	21,35	101,48
P3 (grs)	12,41	16,68	41,63
% Humedad	20,7	20,3	41,7

RESULTADOS

Límite Líquido 57,6 %
 Límite Plástico 20,5 %
 Índice Plasticidad 37,1 %

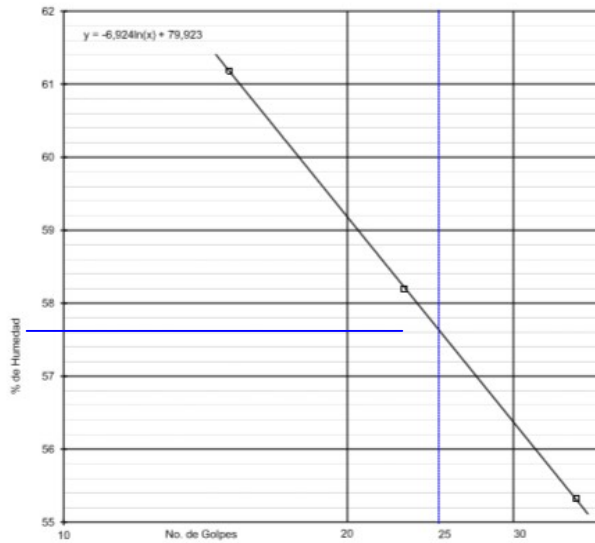
Índice de Grupo _____
 A.A.S.H.T.O. _____
 U.S.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

ELABORO Ju/C CJ
 Laboratorio

REVISO Ad GM
 Des. Técnico

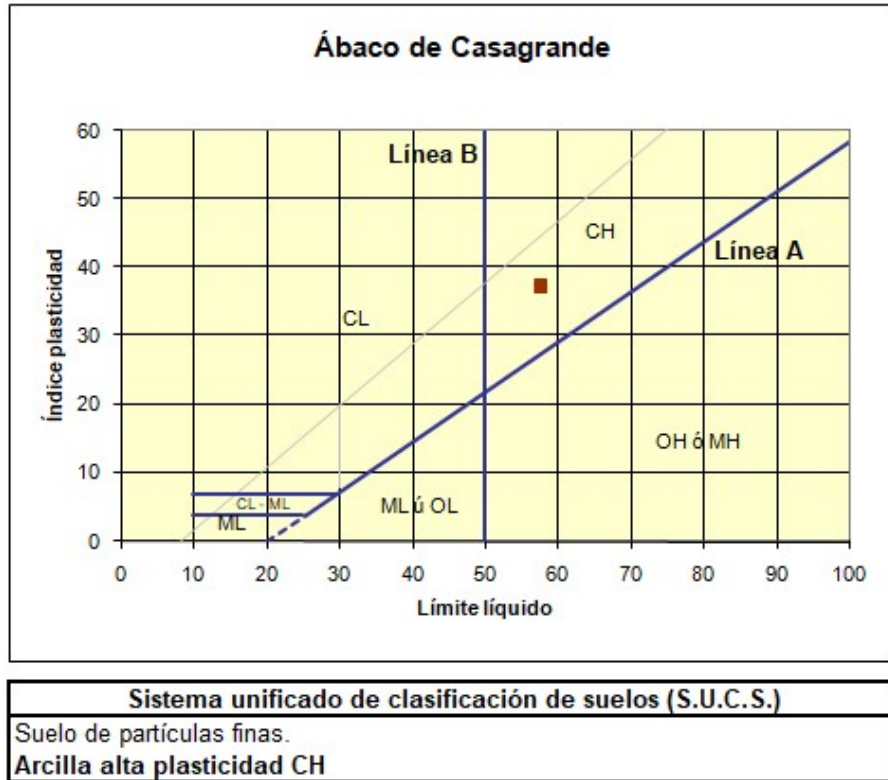
APROBO Misael Guerra A.
 Dr. General



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo L. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS muestra

6



Fuente. Elaboración propia

Anexo M. Ensayo de compresión simple muestra 7

PROYECTO: PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA
 SITIO: SECTOR ITP
 SOLICITANTE: ING. DAIRO GÓMEZ
 DESCRIPCION: Arcilla limosa gris oscuro con trazas de arena fina.

MUESTRA: S4 - M7
 PROFUND (m): 7,00 - 7,60
 FECHA DE TOMA: 21-jun-19
 FECHA ENTREGA: 25-jun-19

PROBETA

DIMENSION INICIAL		
Diámetro	6,00	cm
Altura	11,70	cm
Area	28,27	cm ²
Volumen	330,80	cm ³

HUMEDAD

Peso Vdr+Mtra.Hum	615,00	g
Peso Vdr+Mtra.Seca	406,03	g
Peso Vidrio		g
% de Humedad	51,5	%

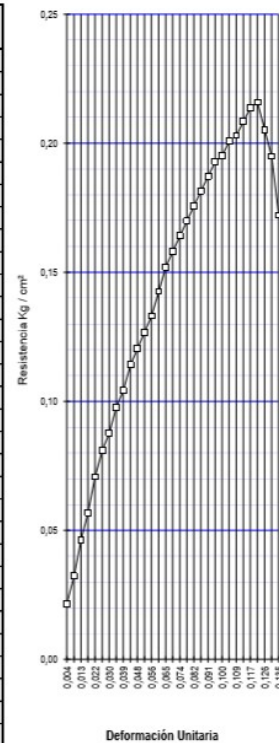


plano de falla

Celda de Carga 0,25 **KN**
 Factor K = **Kg**

Húmedo 1,859 **g/cm²**

Lect. Carga kN	Carga en kilos	Lect. Def. 0,001"	Deform. Unitaria	1-Defor. Unitaria	Area Correg cm ²	Resistencia Kg/cm ²
0,006	0,6	0,020	0,0043	0,9957	28,40	0,02
0,009	0,9	0,040	0,0087	0,9913	28,52	0,03
0,013	1,3	0,060	0,0130	0,9870	28,65	0,05
0,016	1,6	0,080	0,0174	0,9826	28,77	0,06
0,020	2,0	0,100	0,0217	0,9783	28,90	0,07
0,023	2,4	0,120	0,0261	0,9739	29,03	0,08
0,026	2,6	0,140	0,0304	0,9696	29,16	0,09
0,028	2,9	0,160	0,0347	0,9653	29,29	0,10
0,030	3,1	0,180	0,0391	0,9609	29,42	0,10
0,033	3,4	0,200	0,0434	0,9566	29,56	0,11
0,036	3,6	0,220	0,0478	0,9522	29,69	0,12
0,037	3,8	0,240	0,0521	0,9479	29,83	0,13
0,039	4,0	0,260	0,0564	0,9436	29,97	0,13
0,042	4,3	0,280	0,0608	0,9392	30,10	0,14
0,046	4,6	0,300	0,0651	0,9349	30,24	0,15
0,047	4,8	0,320	0,0695	0,9305	30,38	0,16
0,049	5,0	0,340	0,0738	0,9262	30,53	0,16
0,051	5,2	0,360	0,0782	0,9218	30,67	0,17
0,053	5,4	0,380	0,0825	0,9175	30,82	0,18
0,056	5,6	0,400	0,0868	0,9132	30,96	0,18
0,057	5,8	0,420	0,0912	0,9088	31,11	0,19
0,059	6,0	0,440	0,0955	0,9045	31,26	0,19
0,060	6,1	0,460	0,0999	0,9001	31,41	0,20
0,062	6,3	0,480	0,1042	0,8958	31,56	0,20
0,063	6,4	0,500	0,1085	0,8915	31,72	0,20
0,066	6,6	0,520	0,1129	0,8871	31,87	0,21
0,067	6,8	0,540	0,1172	0,8828	32,03	0,21
0,068	6,9	0,560	0,1216	0,8784	32,19	0,22
0,066	6,6	0,580	0,1259	0,8741	32,35	0,21
0,062	6,3	0,600	0,1303	0,8697	32,51	0,19
0,066	6,6	0,620	0,1346	0,8654	32,67	0,17



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo N. Resultados del ensayo de Límites de Atterberg y Tamizado de la muestra 7, la figura muestra la obtención de límite líquido.

PROYECTO: PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA MUESTRA: S4 - M7
 SITIO: SECTOR ITP PROFUND (m): 7,00 - 7,60
 SOLICITANTE: ING. DAIRO GÓMEZ FECHA ENSAYO: 20-jun-19
 DESCRIPCION: Arcilla limosa gris oscuro con trazas de arena fina. FECHA ENTREGA: 27-jun-19

LIMITE LIQUIDO

Número de Golpes	35	24	16
Vidrio No.	189	88	187
P1 (grs)	28,86	31,37	22,07
P2 (grs)	20,96	22,46	16,15
P3 (grs)	5,14	5,19	5,03
% Humedad	49,9	51,4	53,2

GRADACION

P1 (grs) =	86,52	P2=	
Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Pasa
3			
2			
1½			
1			
¾			
½			
¾			
4			100,0
10	1,48	1,7	98,3
40	2,52	2,9	95,4
100	3,25	3,8	91,6
200	2,60	3,2	88,4

	LIMITE PLASTICO	H. NATURAL	
Vidrio No.	42C	18C	22
P1 (grs)	24,06	19,16	175,05
P2 (grs)	22,81	18,06	130,52
P3 (grs)	17,57	13,30	44,00
% Humedad	23,9	23,1	51,5

RESULTADOS

Límite Líquido 51,3 %
 Límite Plástico 23,5 %
 Índice Plasticidad 27,8 %

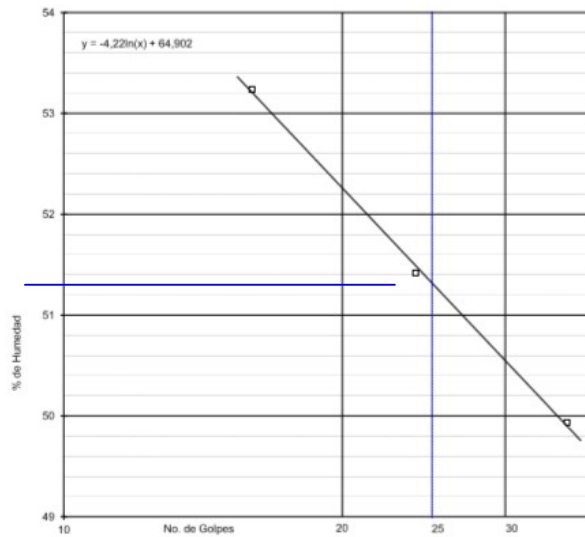
Índice de Grupo _____
 A.A.S.H.T.O. _____
 U.S.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

ELABORO Ju/C CJ
Laborante

REVISO Ad GM
Des. Técnico

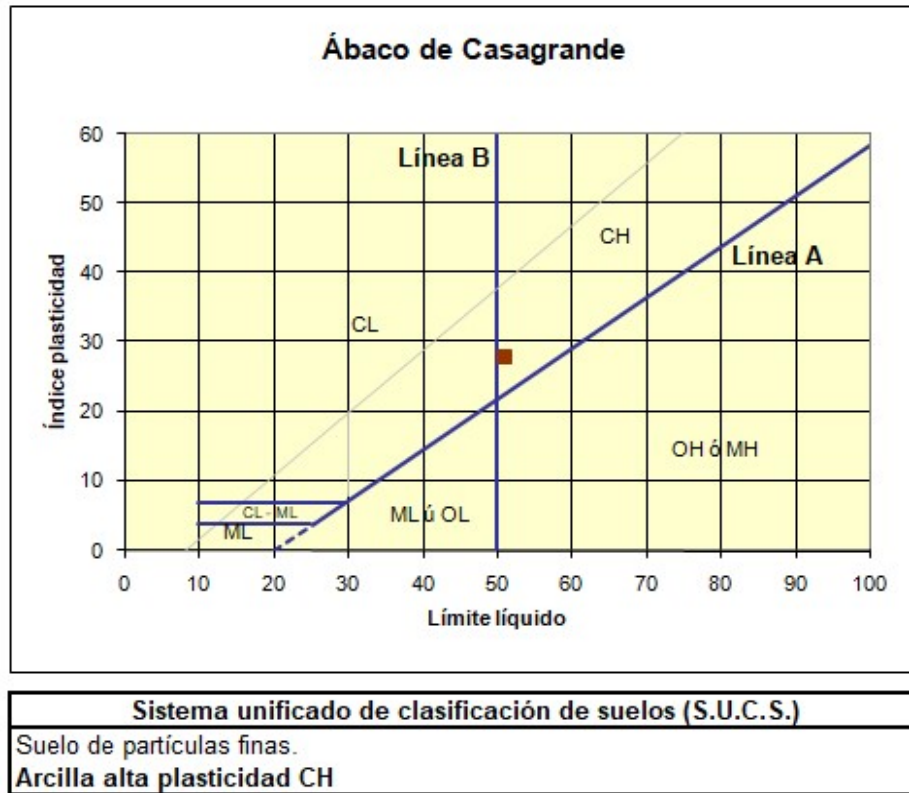
APROBO Misael Guerra A
Dr. General



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo O. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS, muestra

7.



Fuente. Elaboración propia

Anexo P. Ensayo de compresión simple muestra 9.

PROYECTO: PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA
 SITIO: SECTOR ITP
 SOLICITANTE: ING. DAIRO GÓMEZ
 DESCRIPCION: Arcilla limosa gris oscuro con trazas de arena media a fina.

MUESTRA: S4 - M9
 PROFUND (m): 9,00 - 9,60
 FECHA DE TOMA: 21-jun-19
 FECHA ENTREGA: 25-jun-19

PROBETA

DIMENSION INICIAL		
Diámetro	6,00	cm
Altura	11,90	cm
Área	28,27	cm ²
Volumen	333,63	cm ³

HUMEDAD

Peso Vdr+Mtra.Hum 612,00 g
 Peso Vdr+Mtra.Seca 416,22 g
 Peso Vidrio g
 % de Humedad 47,0 %



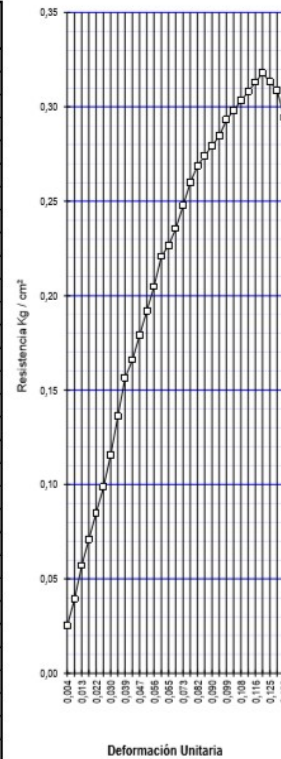
plano de falla

Celda de Carga 0,25 KN
 Factor K = Kg

PESO UNITARIO

Húmedo 1,834 g/cm²

Lect. Carga kN	Carga en kilos	Lect. Def. 0,001"	Deform. Unitaria	1-Defor. Unitaria	Area Correg cm ²	Resistencia Kg/cm ²
0,007	0,7	0,020	0,0043	0,9957	28,40	0,03
0,011	1,1	0,040	0,0086	0,9914	28,52	0,04
0,016	1,6	0,060	0,0129	0,9871	28,64	0,06
0,020	2,0	0,080	0,0172	0,9828	28,77	0,07
0,024	2,5	0,100	0,0215	0,9785	28,90	0,08
0,028	2,9	0,120	0,0258	0,9742	29,02	0,10
0,033	3,4	0,140	0,0301	0,9699	29,15	0,12
0,039	4,0	0,160	0,0344	0,9656	29,28	0,14
0,045	4,6	0,180	0,0387	0,9613	29,41	0,16
0,048	4,9	0,200	0,0431	0,9569	29,55	0,17
0,052	5,3	0,220	0,0474	0,9526	29,68	0,18
0,056	5,7	0,240	0,0517	0,9483	29,81	0,19
0,060	6,1	0,260	0,0560	0,9440	29,95	0,20
0,065	6,6	0,280	0,0603	0,9397	30,09	0,22
0,067	6,8	0,300	0,0646	0,9354	30,23	0,23
0,070	7,2	0,320	0,0689	0,9311	30,37	0,24
0,074	7,6	0,340	0,0732	0,9268	30,51	0,25
0,078	8,0	0,360	0,0775	0,9225	30,65	0,26
0,081	8,3	0,380	0,0818	0,9182	30,79	0,27
0,083	8,5	0,400	0,0861	0,9139	30,94	0,27
0,085	8,7	0,420	0,0904	0,9096	31,08	0,28
0,087	8,9	0,440	0,0947	0,9053	31,23	0,28
0,090	9,2	0,460	0,0990	0,9010	31,38	0,29
0,092	9,4	0,480	0,1033	0,8967	31,53	0,30
0,094	9,6	0,500	0,1076	0,8924	31,68	0,30
0,096	9,8	0,520	0,1119	0,8881	31,84	0,31
0,098	10,0	0,540	0,1162	0,8838	31,99	0,31
0,100	10,2	0,560	0,1205	0,8795	32,15	0,32
0,099	10,1	0,580	0,1248	0,8752	32,31	0,31
0,098	10,0	0,600	0,1292	0,8708	32,47	0,31
0,094	9,6	0,620	0,1335	0,8665	32,63	0,29



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo Q. Resultados del ensayo de Limites de Atterberg y Tamizado de la muestra 9, la figura muestra la obtención de límite líquido.

PROYECTO:	<u>PERFORACION EXPLORATORIA TESIS MAESTRIA PAIPA</u>	MUESTRA:	<u>S4 - M9</u>
SITIO:	<u>SECTOR ITP</u>	PROFUND (m):	<u>9,00 - 9,60</u>
SOLICITANTE	<u>ING. DAIRO GÓMEZ</u>	FECHA ENSAYO:	<u>20-jun-19</u>
DESCRIPCION	<u>Arolla limosa gris oscuro con trazas de arena media a fina.</u>	FECHA ENTREGA:	<u>27-jun-19</u>

LIMITE LIQUIDO

Número de Golpes	35	25	16
Vidrio No.	179	191	23
P1 (grs)	25,72	22,39	23,88
P2 (grs)	18,30	15,91	16,64
P3 (grs)	5,33	4,78	5,00
% Humedad	57,2	58,2	59,5

GRADACION

P1 (grs) =	39,33	P2=	
Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Pasa
3			
2			
1½			
1			
¾			
½			
¾			
4			100,0
10	0,94	2,4	97,6
40	1,25	3,2	96,4
100	2,10	5,3	89,1
200	1,80	4,6	84,5

	LIMITE PLASTICO	H. NATURAL	
Vidrio No.	4C	34C	4
P1 (grs)	17,94	23,88	100,62
P2 (grs)	16,90	22,53	82,12
P3 (grs)	12,56	17,90	42,79
% Humedad	24,1	24,8	47,0

RESULTADOS

Límite Líquido	<u>58,2</u>	%
Límite Plástico	<u>24,5</u>	%
Índice Plasticidad	<u>33,8</u>	%

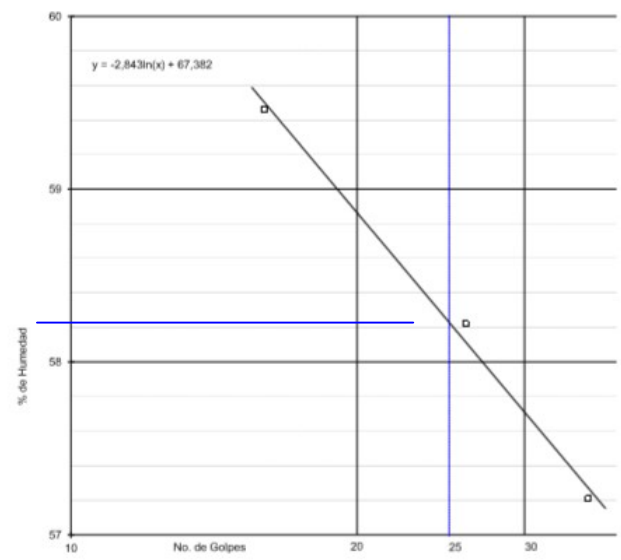
Índice de Grupo	_____
A.A.S.H.T.O.	_____
U.S.C.S.	<u>CH</u>

OBSERVACIONES

ELABORO Ju/C CJ
Laboratorio

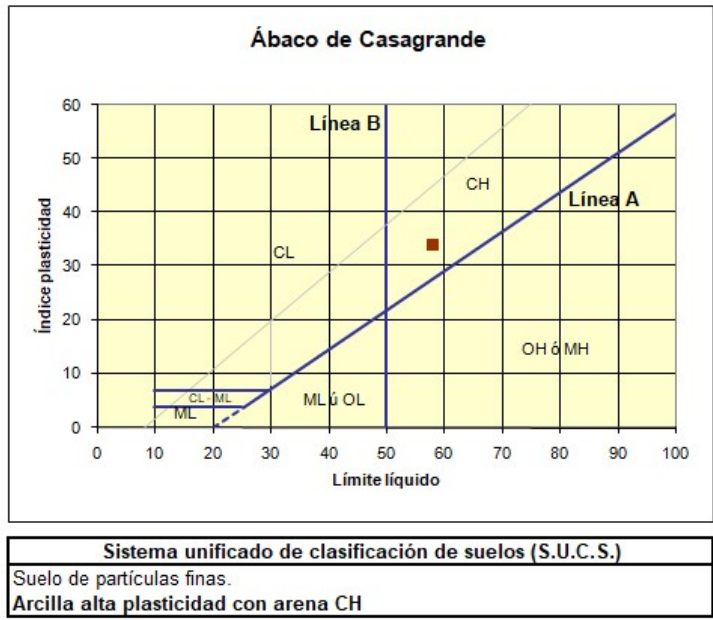
REVISO Ad GM
Des. Técnico

APROBO Misael Guerra A.
Dr. General



Fuente. Laboratorio Misael Guerra SAS

Anexo R. Carta de Plasticidad de Casagrande y Clasificación de suelos unificado USCS,
muestra 9.



Fuente. Elaboración propia

Anexo S. Laboratorio de aguas



ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA
MONITOREO Y CONSULTORIA
 NIT. 826.000.346-1



Duitama, 2018/08/30

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS
AG24704 - 18

IDENTIFICACIÓN				
Solicitante:	DAIRO ALEXANDER GOMEZ ROMERO			
Dirección:	Cr 2 Este 71 34 Ap 502 Bl 6 Con Altos Del Capitolio 1 Tunja			
Ensayo Realizado:	Fisicoquímico			
Tipo de Agua:	Termal			
Sitio de Muestreo:	Pozo Azul - ITP Paipa			
Punto de Toma:	N: 5° 45' 25,8" ; W: 73° 6' 33,5" - A: 2522 m.s.n.m.			
Tipo de Muestreo:	Simple			
Fecha y Hora de Muestreo:	2018/08/06 15:30			
Recolectada por:	Analizar Ltda.			
Fecha y Hora de Recepción:	2018/08/06 16:10			
Objeto:	Control de Calidad			
Condición de Recepción:	Refrigerada			
Período de Análisis:	De 2018/08/06 a 2018/08/30			
DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX. ACCEPTABLE	METODO
ANÁLISIS EN CAMPO (A)				
Temperatura (A)	°C	45,3	N.E.	SM 2550 B
Conductividad (A)	microsiemens/cm	43000	N.E.	SM 2510 B
pH (A)	Unidades de pH	6,44	N.E.	SM 4500-H ⁺ B
ANÁLISIS EN LABORATORIO				
Sólidos disueltos totales (A)	mg SDT/L	39960	N.E.	SM 2540 C / Cálculo
* Sodio (A)	mg Na/L	12600	N.E.	SM 3111 B
* Potasio (A)	mg/L K	1539	N.E.	SM 3111 B
Calcio	mg Ca/L	78,56	N.E.	SM 3500-Ca B
Magnesio	mg Mg/L	74,64	N.E.	SM 3500 – Mg B
* Zinc (A)	mg Zn/L	0,054	N.E.	SM 3111 B
* Plomo (A)	mg Pb/L	0,237	N.E.	SM 3111 B
Hierro Total	mg Fe/L	0,07	N.E.	SM 3500-Fe
Cobre	mg/L	<0,1	N.E.	SM 3111 B
* Niquel (A)	mg Ni/L	0,204	N.E.	SM 3111 B
Carbonatos	mg CaCO ₃ /L	0	N.E.	SM 2320 B - Cálculo
Bicarbonatos	mg CaCO ₃ /L	1102	N.E.	SM 2320 B - Cálculo
Cloruros (A)	mg Cl/L	5828	N.E.	SM 4500-Cl -B
Sulfatos (A)	mg SO ₄ ²⁻ /L	17355	N.E.	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
Nitritos - N (A)	mg NO ₂ ⁻ /L	0,10	N.E.	SM 4500-NO ₂ ⁻ B
Nitratos - N (A)	mg NO ₃ ⁻ /L	<0,38	N.E.	Salicilato Sódico/Rodier
Fosfatos (A)	mg PO ₄ ³⁻ /L	2,58	N.E.	SM 4500 P-D
Nitrógeno Amoniacal (A)	mg NH ₃ ⁻ /L	2,00	N.E.	SM 4500 NH ₃ B, C
FIN DE LOS ENSAYOS				