Sistema Integrado de Transporte De Valledupar
SIVA S.A.S

CONTRATO N°: CC-058-2021

ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LOS PATIOS TALLERES REQUERIDOS PARA LA OPERACIÓN Y/O PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE DE VALLEDUPAR SIVA S.A.S ENTE GESTOR DEL PROYECTO SISTEMA ESTRATÉGICO DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO DE VALLEDUPAR SETPC EN EL MARCO DEL PROYECTO FORTALECIMIENTO Y DESARROLLO INTEGRAL DE LA GESTIÓN MISIONAL.

ITEM L
ESTUDIOS GEOELECTRICO PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS

PATIO TALLER NORTE

BARRANQUILLA, JULIO DE 2023

Sistema Integrado de Transporte De Valledupar SIVA SAS
NIT. 900.404.948-6

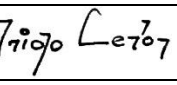
Calle 28 No. 6a -15, Valledupar, Cesar
Teléfonos: (5) 5726613 - 5898302

www.siva.gov.co

ÍNDICE DE MODIFICACIONES

ÍNDICE REVISIÓN	CAPITULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES
0		Diciembre de 2021	Emisión inicial
1		Mayo de 2022	Versión Final

ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

DOCUMENTO No.			**ITEM L ESTUDIO GEOELETCRICO PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS PTN**			
TITULO DOCUMENTO			**ITEM L ESTUDIO GEOELETCRICO PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS** ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LOS PATIOS TALLER REQUERIDOS PARA LA OPERACIÓN Y/O PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE DE VALLEDUPAR SIVA S.A.S ENTE GESTOR DEL PROYECTO SISTEMA ESTRATÉGICO DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO DE VALLEDUPAR SETPC EN EL MARCO DEL PROYECTO FORTALECIMIENTO Y DESARROLLO INTEGRAL DE LA GESTIÓN MISIONAL.			
CLASE DE DOCUMENTO			**DOCUMENTO TÉCNICO**			
APROBACION	NUMERO DE REVISIÓN		0	1	2	3
	Responsable por elaboración	Nombre	**ING. EBERTO ORTEGA**	**ING. EBERTO ORTEGA**		
		Firma				
		Fecha	AGOSTO 2021	MAYO 2022		
	Responsable por revisión	Nombre	**ING. RODRIGO CERÓN**	**ING. RODRIGO CERÓN**		
		Firma				
		Fecha	AGOSTO 2021	MAYO 2022		
	Control de calidad	Nombre	**ING. DIANA MUÑOZ**	**ING. DIANA MUÑOZ**		
		Firma				
		Fecha	AGOSTO 2021	MAYO 2022		
	Responsable por Aprobación	Nombre	**ING. ARMANDO RIVERO**	**ING. ARMANDO RIVERO**		
		Firma				
		Fecha	AGOSTO 2021	MAYO 2022		

GRUPO DE TRABAJO

Ingeniero RODRIGO CERÓN Y CERÓN
Director del Proyecto
MSc en Ingeniería de Tránsito y Transporte,
Ingeniería Ambiental y Recursos Hídricos

Arquitecto RUBÉN DARÍO CERÓN GUEVARA
MSc Planificación Urbana
Coordinador General del Proyecto
Especialista en Arquitectura, Urbanismo, y Paisajismo

Ingeniero JHANNER PATIÑO
Especialista Topografía

Ingeniero WILMER PIPICANO
Especialista en Tránsito y Transporte

Ingeniero ELMER JAVIER ZÚÑIGA VEGA
Especialista en Vías – Diseño Geométrico

Ingeniero WILSON FERNÁNDEZ
Especialista Redes Húmedas – Hidrología – Hidráulica y Drenaje

Ingeniero EBERTO RAFAEL ORTEGA SINNING
MSc en Geotecnia y Pavimentos

Ingeniero MARLON MARTÍNEZ
Especialista en Estructuras

Ingeniero FRANKLIN SÁNCHEZ
Especialista Redes Secas - Eléctricas Voz y Datos

Ingeniera BRENDA LEONOR CASTRILLÓN
Biólogo LEONARDO GUEVARA
Especialista Ambiental
Sociólogo JAIME VASQUEZ
Especialista en Gestión Social

Ingeniero JORGE LÓPEZ
Especialista en Presupuesto y programación de obra

Ingeniera DIANA ELIZABETH MUÑOZ LASSO
Especialista en Administración de la calidad y productividad - Coordinadora Calidad – SGC

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 7
1. GENERALIDADES 10
1.1 Localización 10
1.2 Ubicación de la línea 11
2. GEOLOGIA REGIONAL 12
2.1.1 Formación Corual (PTc) 12
2.1.2 Ignimbrita de Los Clavos (Jlc) 12
2.1.3 Granito porfiríticos (Jgp) 13
2.1.4 Riolita de Golero (Jg) 13
2.1.5 Terrazas aluviales (Qt) 14
2.1.6 Aluviones recientes (Qcal) 14
2.2 Geología de la zona de estudio 16
3. ADQUISICIÓN DE DATOS 17
3.1 Generalidades 17
3.2 Tomografía eléctrica 19
3.3 Ecuaciones fundamentales 20
3.4 Dispositivo electródico utilizado en este estudio 23
3.5 Adquisición en campo 24
4. METODOLOGIA DE TRABAJO 25
CONCLUSIONES 28
RECOMENDACIONES 29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localización de predio SIVA, Valledupar, Cesar 10
Figura 2 Localización de la línea de Tomografía TE-1 11
Figura 4 Rango de variaciones de la resistividad eléctrica en rocas y minerales en Ω·m 17
(Modificado de Orellana, 1982) 17
Figura 5. Esquema del Sistema de Prospección 20
Figura 6. Esquema de un dispositivo electródico 23
Figura 7. Configuración electródica para un dispositivo Wenner 24
Figura 8. Corte Geoeléctrico Línea 1 27
Figura 9. Ubicación Georeferenciada Línea 1 27

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de la línea Geoelectrica 11
Tabla 2. Porosidad intergranular de diversas rocas (Orellana, 1972) 18
Tabla 3. Descripción de los perfiles eléctricos.....25
Tabla 4. Valores Típicos de Resistividad. 26

INTRODUCCIÓN

La administración municipal y departamental están trabajando de la mano para que Valledupar, se vuelva una ciudad más competitiva, equitativa y eficiente, brindándole a los habitantes oportunidades más seguras y económicas con respecto a la movilidad; por lo que la implementación del SETPC, generará pautas y puntos de referencia para seguir contribuyendo a la ciudad y a la región, convirtiéndolo en un megaproyecto de la región.

El Sistema Integrado de Transporte de Valledupar propone desarrollar los estudios y diseños para la futura construcción de los Patio Taller requeridos para el sistema de transporte público de la ciudad, con el fin de mejorar las condiciones de movilidad, funcionalidad de la zona y su área de influencia, bajo los principios de eficiencia, seguridad y sostenibilidad mediante la planeación, gestión, implantación y control de un sistema estratégico de transporte público mejore la calidad de vida y la preservación del medio ambiente, contribuyendo a la transformación económica y social de Valledupar, SIVA SAS en la etapa de planeación, busca desarrollar los estudios y diseños de los patios taller, que le permitan posteriormente su construcción. Estos elementos de infraestructura son fundamentales para la operación y/o puesta en marcha del Sistema Integrado de Transporte de Valledupar SIVA S.A.S ente gestor del proyecto Sistema Estratégico de Transporte Público Colectivo de Valledupar SETPC en el marco del proyecto fortalecimiento y desarrollo integral de la gestión misional.

A través de un Concurso de Méritos Abierto No 01 de 2021, cuyo objeto consiste en "LOS ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LOS PATIOS TALLER REQUERIDOS PARA LA OPERACIÓN Y/O PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE DE VALLEDUPAR SIVA S.A.S ENTE GESTOR DEL PROYECTO SISTEMA ESTRATÉGICO DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO DE VALLEDUPAR SETPC EN EL MARCO DEL PROYECTO FORTALECIMIENTO Y DESARROLLO INTEGRAL DE LA GESTIÓN MISIONAL", el Consorcio Patios Valledupar, participó en la precitada

convocatoria, ocupó el primer lugar en el orden de elegibilidad, y como consecuencia se firmó el contrato de consultoría No CC-058-2021, entre SIVA S.A.S y el CONSORCIO PATIOS VALLEDUPAR.

El Gobierno Nacional de Colombia, a través del documento CONPES 3656 de 2010, define lo siguiente "Se ha considerado como parte integral del proyecto los patios y talleres, pero se espera que los mismos se financien con recursos privados o con explotación colateral", en este sentido la entidad define la estructuración técnica, legal y financiera, de las inversiones que se efectuaran en dos patios y talleres, ubicados en la zona sur – Sector Porvenir y la Zona Norte en el sector de Comfacesar, en la ciudad de Valledupar, los cuales se seleccionaron de acuerdo a la matriz de priorización que evalúa factores relacionados con kilómetros en vacío, condiciones topográficas del terreno, disponibilidad de servicios públicos y otros relacionados con elementos de tipo ambiental y uso de suelos. De forma general se presenta en la figura siguiente la localización inicial de las dos zonas destinadas para cumplir con este fin, origen y destino de viajes. Se observa desde ya, que, si bien el proceso de selección es válido, la definición precisa de localización de cada uno de los lotes se expone en todas su dimensión en el capítulo de generalidades, de tal suerte que corresponda a las áreas donde se emprende el ejercicio de estudios y diseños en todas sus componentes.

El presente estudio tiene como principal objetivo la aplicación del método de tomografía eléctrica para la identificación de posibles saturaciones en el subsuelo que permitan la explotación de aguas subterráneas mediante un pozo profundo en el predio perteneciente al Sistema Integrado de Transporte de Valledupar – SIVA, ubicado en el sector norte del municipio de Valledupar, departamento del Cesar

En este, se presenta las interpretaciones de los resultados obtenidos luego de aplicar el método de tomografía eléctrica con el fin de determinar el perfil de suelo a 62 metros de profundidad.

En total se realizó el levantamiento de 1 tomografía eléctrica 2D, ubicadas estratégicamente en zonas de mayor interés; este levantamiento se llevó a cabo empleando el equipo Subreme DC600 Subsoil Resistivity Meter, conformado por 32 electrodos, con certificado de calibración expedido por el laboratorio de ensayos e investigaciones LABE de la UNAL. Los electrodos fueron ubicados a una distancia de 10 metros (m), utilizando el formato de configuración de Wenner.

La inversión de los datos de resistividad aparente obtenidos en el campo se realizó por medio del código ZondRes2d, para lo cual se aplicó el método de inversión Gauss-Newton. Una vez que el proceso de inversión finaliza, se obtienen secciones de resistividad invertida en 2D, con su correspondiente error expresado como la raíz del error cuadrático medio (RECM).

1. GENERALIDADES

1.1 Localización

El proyecto se realizará en la zona norte del casco urbano del Municipio de Valledupar – Cesar, en el sector de Comfacesar para la construcción de los patios del SIVA.

Figura 1 Localización de predio SIVA, Valledupar, Cesar





1.2 Ubicación de la línea

La Tabla 1 relaciona las coordenadas planas de los puntos de inicio y final de cada una de las tomografías, se presenta la distribución geográfica de los electrodos en cada una de las líneas.

Tabla 1. Coordenadas de la línea Geoelectrica

	PUNTO DE INICIO	
ID	NORTE	OESTE
TE1	10°29'25.10"N	73°17'13.78"O
	PUNTO FINAL	
	NORTE	OESTE
	10°29'25.71"N	73°17'11.45"O

Figura 2 Localización de la línea de Tomografía TE-1



Fuente: Elaboración Propia

2. GEOLOGIA REGIONAL

2.1.1 Formación Corual (PTc)

Con el nombre de Formación Corual se han denominado las rocas sedimentarias, volcánicas y vulcanoclásticas, que se encuentran entre las sedimentitas del Carbonífero y la secuencia vulcano - sedimentaria de la Formación Guatapurí (TJg). Unidad denominada por Tschanz et al. (1969) como Formación Corual (TRPc), para describir las rocas aflorantes en el Río Corual en el sector nororiental de la Sierra Nevada de Santa Marta, al sur del Caserío de Pelechua (Departamento de la Guajira).

Bajo esta denominación se agrupa toda la sucesión de rocas sedimentarias y volcánicas que se sitúan entre las sedimentitas calcáreas del Carbonífero ó las rocas metamórficas del Precámbrico (pɛm) y las capas rojas de la Formación Guatapurí (TJg). La sucesión litológica de la Formación Corual (PTc) es muy variable, de acuerdo con las localidades de exposición, incluye brechas volcánicas, rocas volcánicas afaníticas de composición básica y sedimentitas oscuras finogranulares (limolitas), en ocasiones silicificadas (chert).

2.1.2 Ignimbrita de Los Clavos (Jlc)

Con este nombre se ha designado la secuencia de rocas vulcanoclásticas (tobas e ignimbritas) que aflora entre Caracolí y Valencia de Jesús. Descrita originalmente por Tschanz et al. (1969), como una unidad informal; posteriormente INGEOMINAS (2002), agrupó las ignimbritas de Los Clavos, La Paila, Caja de Ahorros y La Piña, bajo el término informal “Volcánico Ignimbríticos” (Jvi).

Esta unidad aflora en el extremo suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta, corresponde a varios afloramientos aislados de poca extensión, que forman una especie de cinturón discontinuo orientado SW – NE, que se extiende desde la población de Caracolí al suroeste hasta la población de Valencia de Jesús al noreste (Departamento del Cesar).

Consiste principalmente en ignimbritas cristalinas líticas, que varían composicionalmente entre traquitas y andesitas, el color es gris verdoso, amarillo claro o café verdoso, la textura es porfirítica, con matriz (20-40%) y porfiroclastos tamaño lapilli (60-80%); contiene cristales de cuarzo (0% a 10%), feldespato potásico (10% a 60%), plagioclasa (10% a 60%) y anfíbol (10%), además de fragmentos líticos (10%).La “Ignimbrita de la Caja de Ahorros”, aparentemente es más antigua que la “Ignimbrita de Los Clavos” (175 a 180 ± 12 m.a.). Probablemente es de edad Jurásico Temprano e incluso puede ser un poco más antigua y tener la misma edad de las “Espilitas Triásicas”. (Tschanz et al. 1969).

Corresponde un cuerpo volcánico extrusivo de composición ácida y con buena cantidad de fragmentos líticos.

2.1.3 Granito porfiríticos (Jgp)

Incluye a dos grupos de rocas designadas por Tschanz et al. (1969), como “Granito Porfiritico Cretácico” (Kp) y “Granito Porfiríticos Antiguo” (Kjp); estos autores consideran que el más joven (Kp) está asociado a la “Riolita de Golero” y a la

“Riodacita de los Tábanos” y el más antiguo (Kjp), está relacionado a la última fase de la intrusión del Jurásico.

La unidad “Granito Porfiríticos” (Jkp), corresponde a las rocas que afloran a lo largo del margen Suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta cerca al Valle del Cesar y a las rocas que afloran cerca al margen de los Batolitos del Jurásico Medio.

Esta unidad corresponde a “granitos porfiríticos grisáceos o café pálido, con abundantes fenocristales grandes de plagioclasas blanca y fenocristales pequeños de biotita hexagonal euhedrales, cuarzo subhedrales bipiramidal y algo de ortoclasa y hornblenda en una matriz afanítica. El feldespato potásico y el cuarzo son generalmente menos comunes que las plagioclasas. También incluye rocas “porfiríticas rosadas a salmón, que contienen abundantes fenocristales grandes de cuarzo euhedrales a subhedrales y fenocristales rosados de pertitas, en menor proporción fenocristales de plagioclasas blanca, en una matriz afanítica rosada”. Tschanz et al. (1969).

2.1.4 Riolita de Golero (Jg)

Esta unidad se encuentra distribuida en varios sectores aislados de la SNSM, se reconoce en el piedemonte suroccidental y en el piedemonte oriental, en donde ocurre en afloramientos aislados que en su conjunto forman un cinturón con orientación aproximada SSW – NNE.

La unidad “Riolita de Golero” (Jg) Es una secuencia de rocas volcánicas de composición ácida (riolítica y riodacítica), que presentan texturas porfiríticas, porfiroafaníticas y afaníticas; con interposiciones de niveles de vulcanoclásticas asociadas (ignimbritas y tobas), presenta fragmentos piroclásticos, y cristales de feldespato potásico, cuarzo y plagioclasa en una matriz vítrea de color marrón, rojo, gris y verde.

2.1.5 Terrazas aluviales (Qt)

Depósitos que se ubican en la cartografía geológica de la SNSM principalmente en la esquina noreste, en el sector de los ríos Carrizal, Camarones y Tapias y en una franja paralela al flanco oriental de la SNSM, que conforma el amplio valle del río Cesar y sus tributarios; están constituidos por capas delgadas de arenas líticas amarillas, grano grueso a medio, con estratificación cruzada en artesa y capas gruesas canaliformes de conglomerados clastosoportados, polimígticos, angulares a subredondeados, muy mal seleccionados, en capas de 1 a 20 cm de espesor. Igualmente, en el sector de la desembocadura del río Palomino (estación JRQ 010) se observan terrazas basculadas discordantes sobre niveles de neis, compuestas por arenitas conglomeráticas, con cuarzo (90%), feldespatos y líticos, pobremente seleccionadas, color blanco amarillento, al tope de la secuencia se observa conglomerado polimígticos, matriz soportado y mal seleccionado.

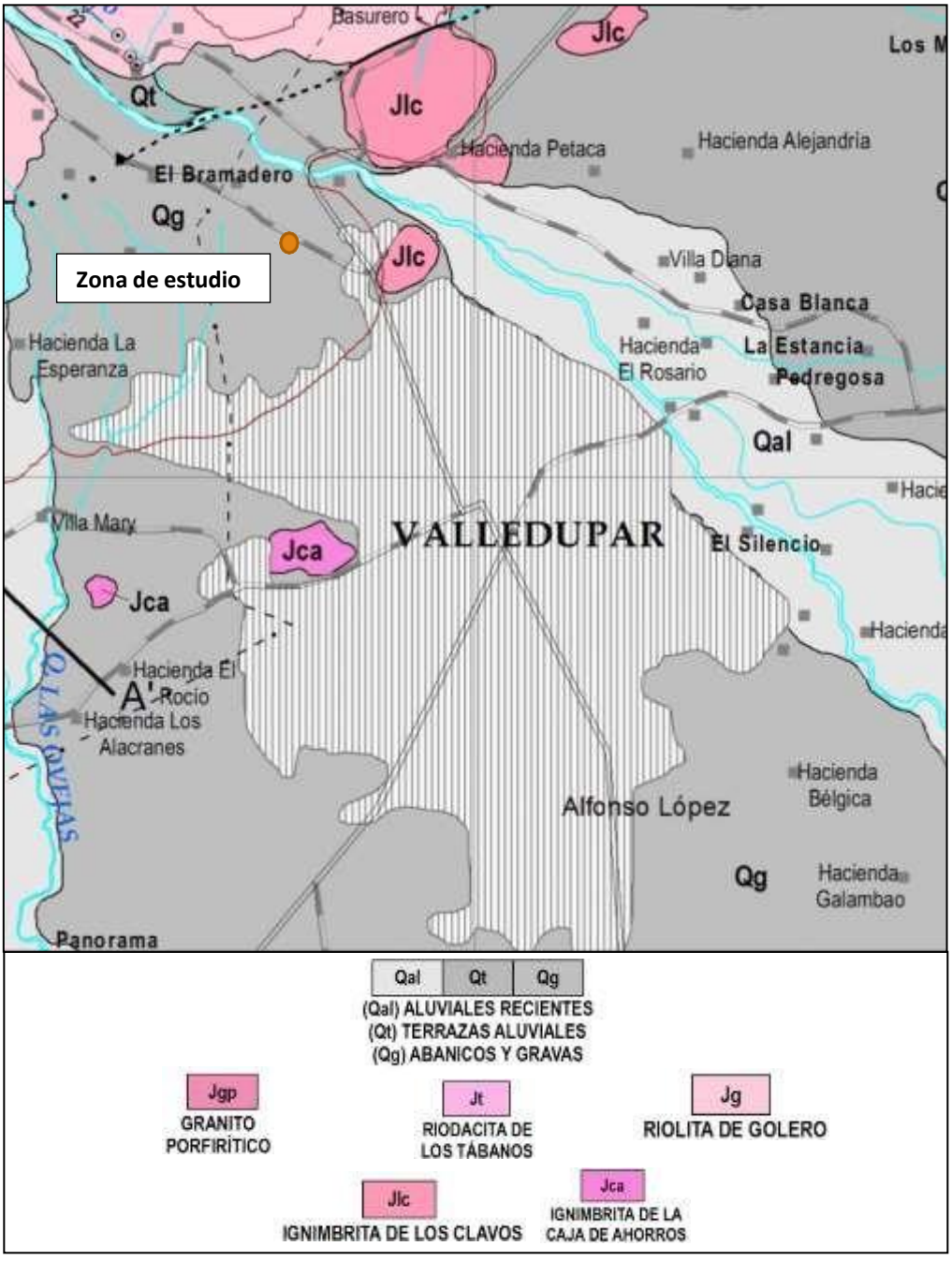
2.1.6 Aluviones recientes (Qcal)

Constituidos principalmente por dos franjas regionales que se ubican, una en la parte occidental de la SNSM, entre el piedemonte y el litoral Caribe, comprendiendo desde

El municipio de Bosconia hasta Santa Marta, con aporte de sedimentos de los ríos Fundación, Ariguaní, Sevilla, Orihueca, Frío y Córdoba; y la segunda paralela al flanco norte de la sierra, comprendiendo desde el municipio de Guachaca hasta las inmediaciones de los caseríos de Monguí y Villa Martin, con aporte de sedimentos de los ríos Piedras, Mendiguaca, Guachaca, Buritaca, Don Diego y Palomino.

En el sector Santa Marta – Ciénaga, están caracterizados como depósitos de topografía suave y baja no consolidados, de arenas, gravas y guijarros en matriz lodosa, amarillo ocre, mal seleccionados, con cantos ígneos con plagioclasa, mica, cuarzo y fragmentos de rocas del batolito central. En general estos depósitos contienen gravas hasta bloques de rocas metamórficas, ígneas plutónicas y volcánicas.

Figura 3 Geología regional plancha 27 escala 1:100.000



El área de interés del proyecto se encuentra geológicamente demarcado por rocas metamórficas como lo son abanicos aluviales y depósitos coluviales Q-ca. También se pueden identificar depósitos aluviales y de llanuras aluviales Q-al a sus alrededores.

2.2 Geología de la zona de estudio

Depósitos aluviales y de llanuras aluviales.

Constituidos principalmente por dos franjas regionales que se ubican, una en la parte occidental de la SNSM, entre el piedemonte y el litoral Caribe, comprendiendo desde el municipio de Bosconia hasta Santa Marta, con aporte de sedimentos de los ríos Fundación, Ariguaní, Sevilla, Orihueca, Frío y Córdoba; y la segunda paralela al flanco norte de la sierra, comprendiendo desde el municipio de Guachaca hasta las inmediaciones de los caseríos de Monguí y Villa Martin, con aporte de sedimentos de los ríos Piedras, Mendiguaca, Guachaca, Buritaca, Don Diego y Palomino.

En el sector Santa Marta – Ciénaga, están caracterizados como depósitos de topografía suave y baja no consolidados, de arenas, gravas y guijarros en matriz lodosa, amarillo ocre, mal seleccionados, con cantos ígneos con plagioclasa, mica, cuarzo y fragmentos de rocas del batolito central. En general estos depósitos contienen gravas hasta bloques de rocas metamórficas, ígneas plutónicas y volcánicas, en menor proporción sedimentarias, registrando la erosión de todas las unidades geológicas de la SNSM.

Depósitos coluviales.

Los depósitos coluviales tienen su origen a partir de procesos estructurales y denudacionales los cuales fracturan y degradan la roca, transportado los materiales denudados pendiente abajo a través de corrientes superficiales y depositado en las laderas de los valles, cuando la corriente pierde su velocidad. Conformados por fragmentos angulosos dentro de una matriz areno-arcillosa; presenta una morfología irregular y espesor variado, también se incluyen depósitos de talud y derrubios.

3. ADQUISICIÓN DE DATOS

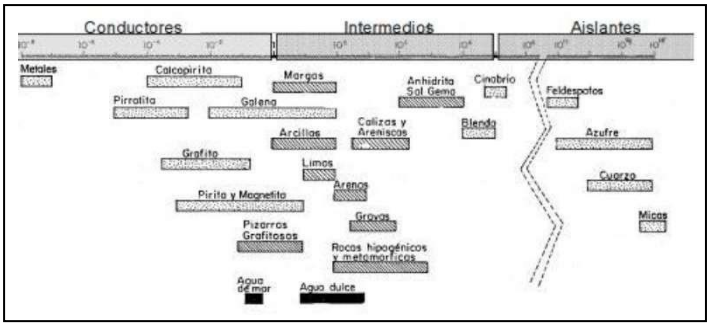
3.1 Generalidades

Los distintos métodos de prospección geofísica (magnética, eléctrica, sísmica…) permiten obtener una información detallada de las condiciones y la composición del subsuelo. Pero para poderse aplicar, es necesario que se presenten dos condiciones básicas:

•Que se tenga un contraste significativo entre algunas propiedades físicas para poder realizar la medición.
•Que dicho contraste se pueda relacionar con la geología del subsuelo.

El uso de estos métodos viene determinado por el conocimiento de las propiedades de las rocas y de los minerales que lo constituyen. Así pues, el método eléctrico utiliza la conductividad eléctrica (σ) o su inverso que es la resistividad eléctrica (ρ) como el parámetro de identificación de las diferentes estructuras del subsuelo. Esta propiedad que describe la capacidad de los materiales para transportar la corriente eléctrica es muy variable debido a las características de los materiales que componen el subsuelo y depende de diferentes factores como son la porosidad, presencia de agua intersticial, etc. Además, la temperatura y la presión pueden ejercer también modificaciones importantes en los valores.
Si la resistividad de las rocas dependiese sólo de los minerales que las componen se considerarían aislantes casi la totalidad de ellas, pero dado que suelen tener los poros ocupados por agua y electrolitos las rocas se comportan como conductores lónicos con resistividades que oscilan entre un amplio rango de calores. La influencia de la cantidad de agua en un material sobre el valor de la resistividad es una cuestión importante en el tema de filtraciones, puesto que la mayoría son producidas por una acumulación de agua en capas del subsuelo donde los materiales son permeables.

Figura 4 Rango de variaciones de la resistividad eléctrica en rocas y minerales en Ω·m (Modificado de Orellana, 1982)



Las rocas cuya resistividad es debida a la presencia de trazas de mineral conductor (conducción electrónica) ocupan un porcentaje muy pequeño de los materiales del subsuelo, y la mayor parte debe su resistividad a la existencia de poros y de fisuras en ellas que suelen estar rellenas de partículas disueltas que actúan como electrolitos y favorecen la conductividad. En la Tabla 3-1 se presenta la porosidad media dominante de las principales rocas, aunque suele haber un porcentaje mínimo (2%) de ella que es debido a fisuras y diaclasas. Otro dato a tener en cuenta es que la porosidad de un mismo tipo de roca disminuye con la edad y el grado de metamorfismo.

La expresión de Archie relaciona la porosidad de las rocas con la resistividad de éstas mediante la fórmula:

Resistividad de las rocas = F x Resistividad del agua intersticial

$$F = \frac{a}{porosidad^m}$$

Donde depende de la textura de la roca y varía entre 0,5 y 1,5 diferenciando:

- 0,6 para rocas sedimentarias compactadas
- 0,9 para rocas sedimentarias no cementadas
- 1,0-2,0 para calizas y dolomías
- 1,4 para rocas ígneas compactas, pudiendo llegar hasta valores mayores de 3.

Tabla 2. Porosidad intergranular de diversas rocas (Orellana, 1972)

Roca	Porosidad Intergranular
Arcillas	20-50%
Arenas gruesas	25-60%
Arenas finas	30-60%
Arenas de playa	80-85%
Arenisca	20-35%

Calizas	1,5-20%
Cienos	80-85%
Dolomías	3-20%
Gravas	20-40%
Lavas	20-80%
Margas	4-60%
Rocas ígneas	0,3-5%
Vulcanitas clásticas	5-60%

El valor del exponente m también varía entre dos valores, en este caso entre 1,3 y 2,3. A nivel más bajo se localiza rocas detríticas débilmente cementadas, mientras que a nivel medio se encuentran rocas poco porosas ígneas y areniscas poco cementadas, y como nivel más alto se encuentran calizas y dolomías. Este exponente depende de la forma de los granos, y aumenta conforme se van separando de la forma esférica.

La resistividad de las rocas también puede verse modificada mediante la salinidad de las aguas contenidas en éstas (agua intersticial). En menor medida también depende del grado de metamorfismo de las rocas, como ejemplo las rocas sedimentarias marinas tendrán una mayor salinidad que las continentales. El metamorfismo no sólo afecta a la porosidad disminuyendo el número de poros, sino que también hace aumentar la salinidad mediante la disolución de los granos del mineral; por ello, se puede deducir que una roca antigua tendrá menos cantidad de agua, pero con mayor salinidad.

Se ha estado suponiendo en lo anterior que los poros de la roca estaban llenos por completo de agua, hecho que no siempre es correcto puesto que puede existir aire (en las rocas más superficiales) y otros productos (petróleo, gas natural…), que también afecta a los valores de la resistividad del material.

3.2 Tomografía eléctrica

La Tomografía eléctrica (Electrical Resistivity Tomography; ERT) es un método de resistividad multielectródico que se basa en obtener modelos 2D y 3D de la resistividad del terreno. Esta técnica de exploración tiene un amplio abanico de aplicaciones: en geología, geotecnia, hidrogeología o medioambiente.

El procedimiento para obtener los modelos de resistividad del terreno consiste en inyectar una cantidad conocida de corriente al subsuelo y medir la diferencia de potencial entre dos puntos. El proceso se repite en toda el área de inspección y, una vez obtenidas estas medidas se dispone de una distribución de resistividades experimentales a lo largo del subsuelo. Dado que el subsuelo es heterogéneo, este

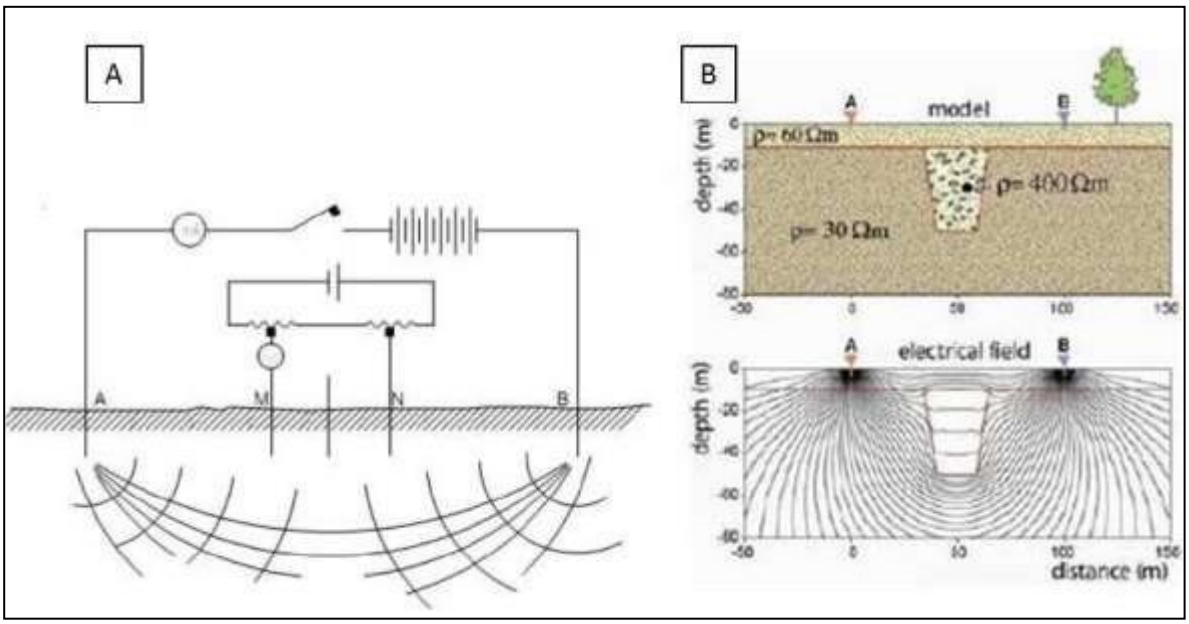
conjunto de resistividades no corresponde a la distribución real, sino que representa una amalgama de ellas; el cálculo para obtener el modelo de resistividades reales del subsuelo se realiza a través de técnicas de inversión utilizando un sistema iterativo.

3.3 Ecuaciones fundamentales

La prospección eléctrica en corriente continua es un método geofísico que investiga la distribución de la resistividad del subsuelo mediante la inyección de corriente continua a través de unas fuentes artificiales.

El método se basa en la producción de un campo eléctrico de corriente continua a través de dos electrodos de corriente (A y B) donde se inyecta una cantidad de corriente determinada al subsuelo (I, en mA) y se mide la diferencia del potencial eléctrico (ΔV, en mV) que se mide con dos electrodos de potencial (M y N). Teniendo en cuenta la ley de Ohm, esta diferencia de potencial se ve afectada por las resistividades de los materiales del subsuelo que atraviesa el campo eléctrico.

Figura 5. Esquema del Sistema de Prospección



La base física del método se halla en las ecuaciones de Maxwell:

$$\bar{\nabla} x \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial T} \quad \text{(a)}$$

$$\bar{\nabla} x \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad \text{(b)}$$

$$\bar{\nabla} x \bar{D} = \rho \quad \text{(c)}$$

$$\bar{\nabla} x \bar{B} = 0 \quad \text{(d)}$$

Donde:

- E: intensidad del campo eléctrico (V/m)
- B: inducción magnética (T)
- H: intensidad magnética (A/m)
- J: densidad de corriente (A/m2)
- D: desplazamiento de la corriente eléctrica (C/m2)
- ρ: densidad de carga eléctrica (C/m3).

Estas cinco ecuaciones se relacionan entre sí mediante las ecuaciones constitutivas de los materiales:

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad \text{(a)}$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad \text{(b)}$$

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \quad \text{(c)}$$

Siendo:

- ε: permisividad eléctrica (F/m)
- μ: permeabilidad magnética (H/m)
- ρ: conductividad eléctrica (S/m)

A partir de la Ley de Ohm se puede relacionar el vector densidad de corriente (J), y el campo eléctrico (E), mediante la conductividad eléctrica del medio (σ) inversa de la resistividad (ρ).

Los valores de ε y μ se estiman constantes en los estudios de prospección eléctrica, ya que se considera al subsuelo como un medio de pequeñas pérdidas donde los valores experimentales obtenidos difieren muy poco de los valores en el vacío (ε
=8,85x1012 F/m y μ=4πx107 H/m).

Considerando que el campo eléctrico en corriente continua está en estado estacionario, la primera ley de Maxwell (ley de Faraday) se expresa de tal forma que indica que el campo eléctrico es rotacional y que es posible describirlo a partir de un potencial eléctrico (ΔU).

$$\bar{\nabla} x \bar{E} = 0$$

$$\bar{E} = -\bar{\nabla} U$$

Si se considera un medio homogéneo entonces, al inyectar una determinada cantidad de corriente I a través de un electrodo, la propagación del campo describe una superficie semiesférica en la cual la densidad de corriente (J) está dirigida en dirección normal y tiene siempre el mismo valor en todos los puntos de dicha superficie. De modo que la integral de J en toda la superficie semiesférica debe ser igual a la intensidad de corriente (I) inyectada.

$$2\pi r^2 J = I$$

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2}$$

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2}$$

Por lo tanto, para cualquier electrodo el valor del campo E es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r). A partir de la ecuación anterior se puede calcular la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera (M y N):

$$\Delta U_N^M = -\int_N^M E.dl$$

Considerando r1 y r2 como las distancias respectivas de los puntos M y N al electrodo de corriente de referencia, se obtiene la fórmula para el cálculo del potencial entre dichos puntos:

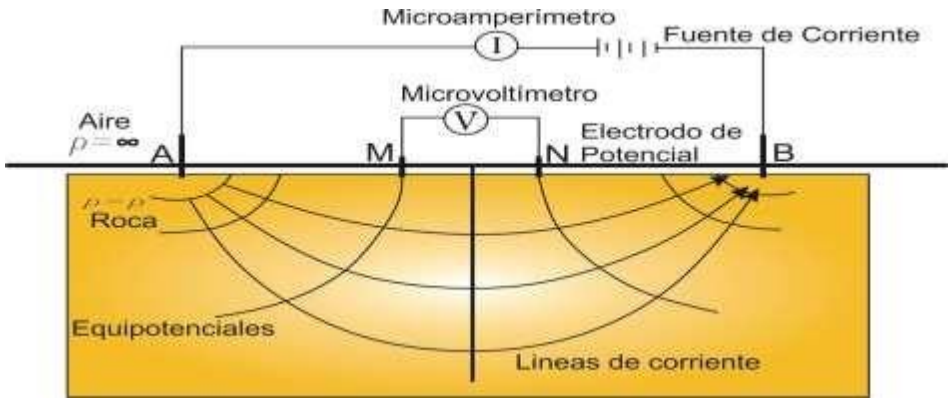
$$\Delta U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi}\int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Donde U se corresponde a la diferencia de potencial eléctrico entre los electrodos M y N, y r1 y r2 representan las distancias a los electrodos de corriente.

3.4 Dispositivo electródico utilizado en este estudio

Un dispositivo electródico es un conjunto de electrodos distribuidos de una forma concreta en el terreno a investigar. Generalmente, suele constar de 2 electrodos de corriente A y B por donde se inserta corriente eléctrica al subsuelo, y otros dos electrodos de potencial M y N en los cuales se mide la corriente generada (Figura 4-3). Todos ellos deben de ir unidos por cables conectados a un instrumento de medida o resistivímetro.

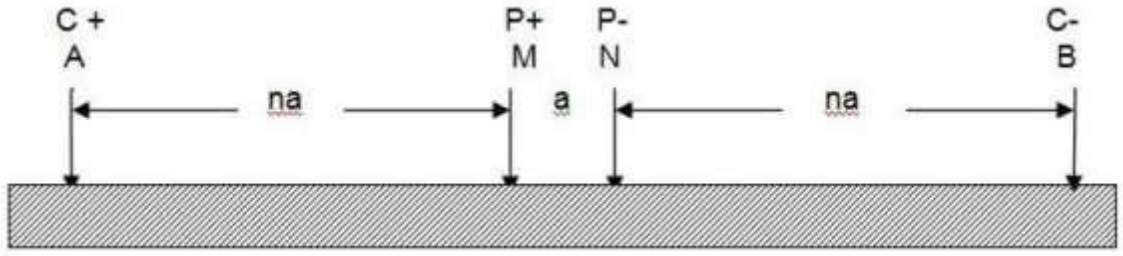
Figura 6. Esquema de un dispositivo electródico



Dependiendo de las distancias relativas entre cada par de electrodos, y la distancia comprendida entre electrodos, se obtienen diferentes configuraciones electródicas (o dispositivos) y su utilización depende del tipo de disposición de las capas del subsuelo. En este estudio se ha utilizado la configuración Wenner que es un dispositivo simétrico muy utilizado en el caso de capas plano-paralelas. Los electrodos que miden el potencial M y N se disponen en el centro del dipolo y se

mantienen a una distancia constante (a), mientras que los electrodos A y B por donde se inyecta corriente van aumentando progresivamente la distancia con el número de medidas (n) hasta llegar al final del perfil (na).

Figura 7. Configuración electródica para un dispositivo Wenner



El aumento progresivo de la distancia de los electrodos de corriente permite una mayor penetración en el subsuelo, de tal forma que mientras más rango de profundidad se necesite, más distancia deben separarse los electrodos externos (A, B). Al ser un dispositivo simétrico es más fiable a la hora de determinar estructuras horizontales que de resolver estructuras verticales. Otra propiedad es que, dada la intensidad de su señal, esta configuración permite la investigación del subsuelo en terreno con fuerte ruido ambiental, puesto que la fuerza de la señal es inversamente proporcional al factor geométrico k.

3.5 Adquisición en campo

Se ejecutó 1 perfil eléctrico que cubrió la zona con mayor interés de prospección (Figura 4-5). La toma de datos se efectuó con el siguiente equipo:

• 32 electrodos impolarizables.
• 32 conectores de enlace electrodo-cables.
• Cables multielectródico.
• Un resistivímetro Subreme DC600 Subsoil Resistivity Meter. Es la unidad central donde se controla la inyección de corriente, la medida de potencial y la configuración electródica.
• Un selector de canales que establece la configuración entre los distintos electrodos del perfil para una medida determinada.
• Batería 12 V (60 A/h) para alimentación del sistema.
• Material auxiliar.

Tabla 3. Descripción de los perfiles eléctricos

PERFIL	LONGITUD (m)	DISPOSITIVO	No. DE MEDIDAS
TE1	320	Wenner	155

4. METODOLOGIA DE TRABAJO

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectródico basado en la modelación 2D de la resistividad de terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos). La representación de estos datos en 2D, muestra la localización horizontal de los datos, ubicados en el punto medio del juego de electrodos, utilizados para hacer la medida. La ubicación vertical del dato se sitúa a una distancia proporcional a la separación de electrodos, que depende directamente del arreglo de electrodos.

Sin embargo, esta imagen es una representación aproximada de la distribución de la resistividad en el subsuelo, aunque esta puede estar distorsionada debido a isolíneas que dependen del arreglo, así como de la resistividad verdadera del subsuelo. El mismo nos permite conocer el material y la resistividad eléctrica correspondiente al mismo, de esta forma es posible validar los datos de la tomografía, ya que la percepción de los datos está controlada por los colores en la pseudosección. Una selección adecuada de los límites puede permitir realzar los cambios geológicos, mientras una selección inadecuada puede ocultar datos importantes, o resaltar rasgos irrelevantes.

En consecuencia, en la siguiente tabla se presentan los rangos de resistividad y la correspondencia con materiales geológicos propios de la zona.

Tabla 4. Valores Típicos de Resistividad.

RESISTIVIDAD (Ω•m)	CORRELACIÓN LITOLÓGICA
< - 1	Materiales finogranulares (arcillas marinas); Arenas con agua salada
1,0 - 1,7	Materiales finogranulares (arcillas/arcillolitas); Limos con agua salada a salobre
1,7 - 2,9	Materiales finogranulares (limos y arcillas/arcillolitas); Agua salada a salobre
2,9 - 4,9	Materiales finogranulares (limos/limolitas); Agua salada a salobre
4,9 - 8,4	Suelo limoso; Arenas/areniscas/calizas y limos saturados; Aguas salobres
8,4 - 14,2	Suelo limo-arenoso; Arenas/areniscas finas/calizas saturadas; Aguas salobres
14,2 - 24,1	Suelo limoso; Arenas medias/areniscas medias/calizas saturadas
24,1 - 41,0	Arenas/areniscas/calizas gruesas saturadas
41,0 - 69,8	Arenas y gravas saturadas; Roca (Areniscas/calizas) muy fracturada, saturada
69,8 - 119	Materiales superficiales secos; Gravas y arenas saturadas; Roca (ígneas, areniscas/calizas) muy fracturada, saturada?
119 - 202	Materiales superficiales secos; Arenas secas; Gravas saturadas; Roca (ígneas, areniscas/calizas) fracturada, saturada?
202 - 343	Materiales superficiales secos; Roca (ígneas, areniscas/calizas) fracturada
343 - 583	Materiales superficiales secos; Roca (ígneas, areniscas/calizas) poco fracturada
583 - 990	Materiales superficiales secos; Roca (ígneas, areniscas/calizas) muy poco fracturada

Tal como se muestra en la Figura, el corte geoeléctrico de la Línea 1, detecto una alta probabilidad de encontrar material saturados a una profundidad de aproximadamente 5 m hasta 60 m entre las coordenadas 10°25'40.95"N 73°15'52.78"O y 10°25'40.59"N 73°15'53.90"O. Luego, entre las abscisas 10 y 90, a mayores profundidades (70 m y 100 m) también se puede identificar una alta probabilidad de presencia de materiales saturados.

Posteriormente, a niveles posteriores se pueden encontrar una matriz compuesta por limos, arenas y gravas hasta aproximadamente 160m con un rango de resistividad de 16-40 ohm-m. Estos mismos valores se pueden dar entre 240 y 300 m.

Por otro lado, es posible encontrar arenas, gravas y rocas entre 160 y 240m por presentar resistividades mayores en un rango de 40-60 ohm-m.

Figura 8. Corte Geoeléctrico Línea 1

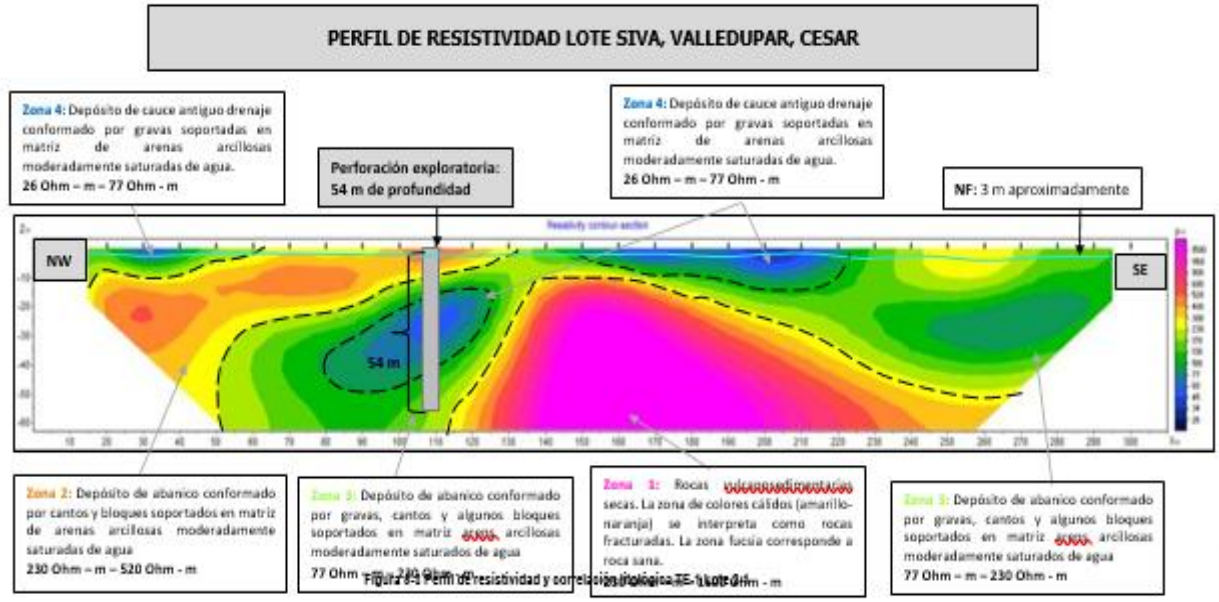


Figura 8-1 Perfil de resistividad y correlación litológica TE-1 Lote 01

Figura 9. Ubicación Georeferenciada Línea 1



Fuente: Elaboración Propia.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el Mapa Geológico de la Plancha 27, Servicio Geológico Colombiano1998, el área de estudio se encuentra sobre sedimentos no consolidados de Abanicosy Gravas (Qg), los cuales reposan sobre rocas vulcanosedimentarias de la unidad Ignimbrita de Los Clavos (Jlc). El depósito de abanicos y gravas está conformado por bloques, cantos, gravas, arenas y limos. Los niveles de bloques, cantos, gravasy arenas arcillosas poseen el mayor interés desde el punto de vista hidrogeológico,debido a la porosidad intergranular (primaria).

De acuerdo a las características analizadas del resultado de la interpretación de la tomografía eléctrica la cual ha sido cotejada con la información geológica regional prexistente se puede concluir que en para el posible aprovechamiento de las posiblescorrientes de agua subterráneas existentes se debe realizar una perforación exploratoria o de prueba de 54 metros de profundidad como mínimo, la cual debe ser realizada en la ubicación del electrodo 12, es decir, a 40 metros del punto mediode la tomografía en sentido NW (Noroeste)

Teniendo en cuenta que en la zona de trabajo se ha localiza un depósito de abanicoclasto soportado que posee bloques, cantos y gravas de roca, soportados en una matriz de arenas arcillosas, se puede concluir que desde el punto de vista hidrogeológico el potencial de producción de aguas subterráneas es de carácter moderado.

NOTA: NO ES POSIBLE CALCULAR EL CAUDAL DE UN POZO POR MEDIO DE UN ESTUDIO GEOELÉCTRICO, NI POR NINGÚN OTRO ESTUDIO, DEBIDO A QUE ESTAS SON MEDICIONES INDIRECTAS QUE SE REALIZAN AL TERRENO, PARA CONOCER SUS CARACTERÍSTICAS, TANTO LITOLÓGICAS COMO HÍDRICAS. LA ÚNICA FORMA DE SABER EL CAUDAL, ES REALIZANDO UNA PRUEBA DE BOMBEO CUANDO EL POZO SE HA TERMINADO.

RECOMENDACIONES

Se recomienda perforar un pozo exploratorio de 54 metros de profundidad en el electrodo 12 de la tomografía, es decir, a 40 metros a partir del punto medio de la tomografía eléctrica en sentido NW. Es importante tener en cuenta que, en el sitio escogido para la perforación se recomienda realizar un registro eléctrico, con el fin de localizar las corrientes de agua y así establecer el diseño definitivo. Dicho procedimiento se debe realizar antes de encamisar el pozo y con la menor cantidad de lodo posible para verificar con exactitud las profundidades de las capas saturadas, las capas que presentan más arcilla y la salinidad de las mismas, para obtener un buen diseño del pozo y conocer la viabilidad de explotar estos acuíferos.

Los registros eléctricos ayudan a detectar con exactitud aquellas capas de agua de menor calidad para sellarlas en caso de encamisar (entubar) el pozo y solo tener acceso a las capas acuíferas que, si son de mayor provecho, además de obtener el diseño preciso del pozo. Lo anterior se puede realizar considerando que la sonda de muestreo posea mínimo los siguientes paramentos: Gamma natural, Resistivity 16” y 64”, SP.

En el caso en que la perforación de prueba y el registro eléctrico presenten condiciones favorables para la explotación de fuentes subterráneas en el sector, se podrá perforar un pozo siguiendo las siguientes características:

La explotación de las aguas subterráneas que se prevé efectuar debe realizarse con las condiciones mínimas de un equipo de perforación suficiente para la necesidad requerida, para lo cual se recomienda un diámetro no inferior a 12”, tendientes a revestir mínimo 6” y usar bomba sumergible o de lapicero para la explotación del agua del pozo.

7.1 Recomendaciones Para La Perforación Exploratoria

Para la elaboración mecánica de la perforación exploratoria debe seguir el siguiente comportamiento:

• Realizar las piscinas y canales para la circulación de los lodos bentoníticos, e igualmente utilizar agua de excelente calidad para preparación de los lodos para las etapas de la perforación exploratoria y de ampliación con el fin de no contaminar los acuíferos.

• Efectuar la perforación exploratoria en 6" de diámetro a una profundidad mínima de 50 metros.

• Durante la perforación exploratoria se debe tener en cuenta, la toma de muestras metro a metro, con el fin de describir en forma completa la columna estratigráfica. Simultáneamente se debe medir la Rata de Penetración de la Broca a cada metro, determinar los cambios en la viscosidad del lodo de perforación e identificar los acuíferos a medida que se perfora.

• En este momento se recomienda hacer un análisis por parte del geólogo para decidir si es necesario seguir con la perforación exploratoria o no.

• Una vez finalizada la perforación exploratoria se debe realizar un Registro eléctrico, lo cual consiste en bajar al pozo una serie de sondas a fin de determinar diversas curvas, siendo las más útiles y frecuentes las de Potencial Espontáneo, Resistividad Aparente y Gamma Natural. La interpretación combinada de las mismas, juntamente con la descripción de las muestras de los terrenos atravesados en el pozo y la velocidad de avance, permitirá confeccionar un perfil correcto con límites entre capas (espesores) dando además una pauta semi-cuantitativa de las condiciones del agua subterránea a explorar.

• Se debe realizar el diseño del pozo de explotación de acuerdo con los resultados de los registros eléctricos y de las recomendaciones adicionales que emita el perforador y la parte técnica para la ubicación exacta de los filtros y de la tubería ciega, características de empaquetamiento, etc.

7.2 Recomendaciones Para Finalizar La Perforación

Perforado el pozo exploratorio y de acuerdo a los resultados positivos obtenidos en el Registro Eléctrico y las muestras extraídas de la perforación exploratoria, se procede a continuar con el proyecto del pozo profundo de explotación, de acuerdo a lo siguiente:

• La perforación de ampliación no debe ser inferior a 10" de diámetro.

• Se recomienda revestir el pozo con tubería y filtros PVC RDE-21 mínimo de 6", además usar un empaquetamiento de gravilla bien seleccionada, con 95% de sílice y redondeada cuyo tamaño va de acuerdo al análisis granulométrico.

• Luego se realiza un lavado y desarrollo del pozo. En esta fase es muy importante la buena aplicación de polifosfatos (Tripolifosfato de sodio o Hexametafosfato de sodio) y buen lavado para retirar el lodo que queda incrustado en los planos de estratificación, diaclasas y empaquetamiento filtrante.

• Es conveniente efectuar la Prueba de Bombeo continua para determinar la producción del pozo.

• Las características de la bomba sumergible se determinan de acuerdo con los resultados de la Prueba de Bombeo.

• De acuerdo con la nueva geomorfología del nuevo predio de Patio Norte, se logra inferir que está no sufre cambios significativos en la localización y aprovechamiento de las aguas subterráneas.

• Se recomienda construir un sello sanitario de 2.5 metros de profundidad y debe ser instalados dos tubos engravilladores de 2" para agregarle la gravilla seleccionada cuando el nivel de esta se baje por cuestiones de reacomodamiento durante la explotación del agua subterránea o cuando se le practique mantenimientos.

• Se recomienda la toma de muestras de agua para los correspondientes análisis fisicoquímicos y determinar la calidad de agua e implementar el plan de control si no es solo para uso agrícola e industrial.



EBERTO RAFAEL ORTEGA SINNING
Ing. Civil – U. de Cartagena, Bolívar
Esp. En Vías y Transporte – U. del Norte, Barranquilla
Magíster en Geotecnia – Universidad Industrial de Santander UIS

BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, W.L. 1975. Improved digital filter for evaluating Fourier and Hankel transform integrals. NTIS U.S. Dept of Commerce.

BOBACHOV, ALEXEI. 1998. Interpretation of VES using the IPI-7 and IPI-2 programs... University of Moscow. Geophyisical Department.

BURGER, H. R.; SHEEHAN, A. F. & JONES, C. H. (1992): "Introduction to Applied Geophysics – Exploring the shallow subsurface". W. W. Norton & Company. 600 págs.

CERVANTES, B.; POLÁCEK, A. & RYSAVKA, J.:" Contribution of electrical resistivity tomography applied to the slope deformation survey in Lidecko". GeoScience Engineering LVIII (2), pp. 7-15, ISSN 1802-5420.

INGEOMINAS, 1998. Mapa geológico de Colombia. Escala 1: 1.500.000. Bogotá

INMAN, J.R. 1975. Resistivity inversion with ridge regression; Geophysics, V.40 p. 789-817.

ORELLANA ERNESTO. 1972. Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Madrid, Paraninfo, 532 p.

OTERO A. et Al. 1982. DC Linear voltage sources, one method for the enhancement of the millivolt signal responses, over some conductive terrains, applied to Vertical Electrical Soundings.

ZHODY ADEL M. 1989. Programs for the automatic processing and interpretation of Schlumberger Sounding curves in QuickBASIC 4.0 USGS open file report 89-137.