

---

---

# RELACIONES GEOELECTRICAS EN LA EXPLORACION GEOTECNICA

## THE GEOELECTRICAL RELATIONS ON THE GEOTECHNICAL EXPLORATION

---

---

***Daniel Eduardo Arias, I.C., Oscar Echeverri Ramírez, Msc, & Fabián Hoyos Patiño, Msc***

*Universidad Nacional - Sede Medellín – Facultad de Minas  
gerencia@deacivil.com, oecheve@unal.edu.co, fabianhoyospatino@gmail.com*

Recibido para evaluación: 4 de Noviembre de 2011 / Aceptación: 10 de Mayo de 2012 / Recibida versión final: 10 de Junio de 2012

### RESUMEN

La resistividad eléctrica de los geomateriales ha sido utilizada ampliamente en la prospección de aguas subterráneas, y en forma más limitada en la exploración geotécnica. Este trabajo surge como respuesta a la necesidad de avanzar en el conocimiento de la relación entre resistividad eléctrica y características de los geomateriales, de utilidad en la práctica geotécnica. La investigación ha sido concentrada a los suelos derivados de rocas cristalinas del altiplano central de Antioquia - Colombia, a partir de sondeos eléctricos verticales (SEV), ensayos de penetración estándar y ensayos de caracterización en laboratorio. Los resultados de la investigación indican que es posible diferenciar con razonable certeza los geomateriales del subsuelo con base en su resistividad eléctrica, cuando se integra en la interpretación de los sondeos los valores de resistividad con un adecuado conocimiento de la geología local.

**PALABRAS CLAVES:** ensayo de penetración estándar, geomaterial, resistividad eléctrica, sondeo eléctrico vertical.

### ABSTRACT

The electrical resistivity of geomaterials is has been widely used in groundwater prospection, and in a more limited extent in geotechnical engineering. This work is intended to contribute to the understanding of the relationship between geomaterials resistivity and physical characteristics. The research has been concentrated in, but no limited to, residual soils derived from igneous and metamorphic rocks in the Antioquia Central Highland (Col), using the results of vertical electrical sounding (VES), coupled with standard penetration and laboratory tests. The results of this research indicate that it is possible discriminate the geomaterials in the subsoil based on the geoelectrical resistivity when it is coupled with an appropriated knowledge of local geology.

**KEY WORDS:** geophysical prospection, mechanical sounding, vertical geoelectrical sounding.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la práctica geotécnica es común la exploración del terreno mediante técnicas de perforación, ya sea por percusión y lavado o por rotación, procedimientos que son bastante costosos; en muy pocos proyectos se utilizan las técnicas de prospección geofísica, en particular geoeléctrica, debido, en gran medida, al desconocimiento de esta valiosa herramienta.

El diseño de obras de infraestructura demanda técnicas de generación de información del subsuelo eficientes en términos de calidad de la información, y de tiempo y costo de obtención de la misma. La posibilidad de conseguir este objetivo se encuentra en gran medida en la aplicación de métodos geofísicos.

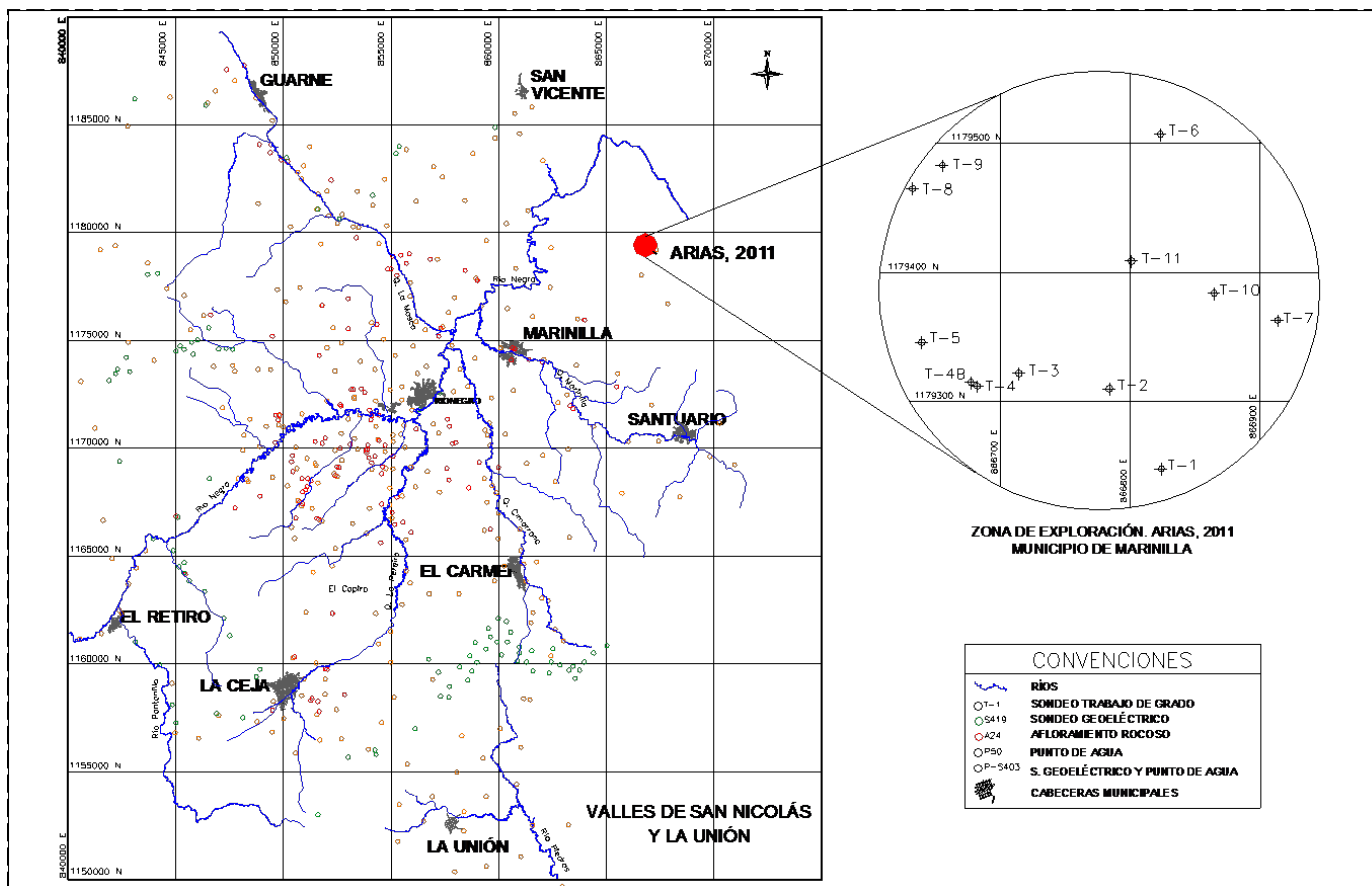
Las técnicas de geofísica aplicada están orientadas a distinguir o reconocer formaciones geológicas que se encuentran en profundidad mediante la medición de un parámetro físico asociado a ellas: la densidad, la velocidad de las ondas elásticas, la resistividad eléctrica. Los métodos geofísicos son particularmente útiles cuando existen contrastes bien definidos entre las propiedades de materiales del subsuelo y son utilizados para cartografiar horizontes de suelo, y la posición del nivel freático y del basamento. La profundidad de penetración y la resolución de estos métodos varían dependiendo del equipo que se utilice y de las condiciones del terreno. En la investigación geotécnica los métodos de exploración geofísica deben ser utilizados en combinación con la observación directa en campo y los sondeos mecánicos; los primeros pueden ser muy útiles como guía para determinar la localización de los sondeos mecánicos.

Los métodos sísmicos han sido utilizados para investigar la litología del subsuelo y estimar propiedades geomecánicas a partir de correlaciones propuestas de éstas con la velocidad de las ondas elásticas. Los métodos geoeléctricos han sido usados ampliamente en la prospección de aguas subterráneas; su utilización en la investigación geotécnica ha sido marginal, orientada generalmente a identificar el espesor del regolito o la geometría de las masas movilizadas en deslizamientos profundos y, sólo en ocasiones, a investigar la litología del subsuelo. El radar de penetración, GPR que presenta de manera rápida y directa los contrastes litológicos en el subsuelo, ha tenido una amplia difusión en los últimos años como herramienta útil en la investigación del subsuelo, aunque presenta la limitación de disminuir sensiblemente la resolución cuando se trata de aumentar la profundidad de investigación. Otros métodos geofísicos, en particular la gravimetría y la magnetometría son métodos útiles en investigaciones a escala regional, poco comunes en la práctica geotécnica.

La utilización de los métodos geofísicos en geotecnia presenta dos dificultades mayores desde el punto de vista de la percepción de los usuarios: una, la incapacidad de entender su potencial, y dos las expectativas exageradas de quienes cuentan con una información incompleta sobre sus potencialidades y sus limitaciones.

En este artículo presentamos una propuesta de utilización de los sondeos eléctricos verticales (SEV) en la investigación geotécnica en suelos residuales derivados de rocas cristalinas, a partir de los resultados de varios centenares de sondeos en el Altiplano Central de Antioquia, ejecutados durante la investigación hidrogeológica de los Valles de San Nicolás y de la Unión (Universidad Nacional, 2000), y complementados con investigación detallada con sondeos eléctricos verticales, acoplados a sondeos mecánicos con registro de resistencia a la penetración estándar y recuperación de muestras para ensayos de caracterización y propiedades geomecánicas, en desarrollo de la tesis de grado de uno de los autores (Arias, 2011), en la Vereda Rosario del Municipio de Marinilla. En la Figura 1 se observan los puntos en el plano principal indicando la exploración de los Valles de San Nicolás y La Unión, y los puntos en el círculo del zoom, los sitios de la exploración del trabajo de grado Arias, 2011.

Los resultados de esta investigación indican que la resistividad de los geomateriales permite discriminar adecuadamente entre diferentes tipos de materiales de interés en geotecnia y condiciones de saturación, aunque no es posible establecer relaciones significativas entre valores de resistividad y propiedades geomecánicas.



**Figura1.** Localización de los sondeos eléctricos verticales y las perforaciones mecánicas en los valles de San Nicolás y la Unión, en esta investigación.

## 2. LA INVESTIGACIÓN GEOELÉCTRICA APLICADA EN GEOTECNIA.

Los métodos geofísicos se basan en la medición de algunas propiedades físicas de los materiales de la corteza terrestre: la densidad, el campo magnético, la conductividad eléctrica, velocidad de transmisión de ondas elásticas, etc. La interpretación de dichas mediciones con base en los contrastes entre ellas y las anomalías observadas, permite preparar modelos de las características del subsuelo y de su distribución espacial. La interpretación de los datos geofísicos tiene dos niveles: uno, el modelamiento matemático en el que se definen las combinaciones de valores de la propiedad que se mide y de la geometría de las masas de suelo o de roca, coherentes con las mediciones hechas en el terreno, y dos, la interpretación de los modelos en términos geológicos, hidrogeológicos o geotécnicos. En la interpretación geológica y geotécnica se combinan modelos matemáticos de la geometría de las masas de geomateriales y su resistividad con la información geológica para producir una interpretación física del sondeo geoelectrico. Finalmente, de la combinación de los modelos físicos con la información geológica e hidrológica existente resulta un modelo que permite estimar probables comportamientos mecánicos del subsuelo. Los estudios eléctricos de superficie representan un método de análisis de los geomateriales en términos de sus propiedades eléctricas. De ellas la resistividad ha sido relacionada con parámetros petrofísicos como la porosidad y el grado de saturación, entre otros; también se ha utilizado este método para determinar la existencia de contaminantes en el terreno, antes de iniciar programas de exploración de alto costo.

La adquisición de datos de campo puede llevarse a cabo con configuraciones de electrodos que pueden variar su arreglo y que dependen estrictamente del objeto para el cual se realiza la exploración. Una configuración corriente en

estos métodos eléctricos es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), dado que es posible producir modelos unidimensionales que corresponden a puntos discretos en la superficie. Existen otras técnicas geofísicas eléctricas o electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales, o en algún caso su inverso la conductividad. Algunas de estas técnicas son mucho más modernas y más precisas que los sondeos eléctricos verticales (SEV), pero estos se siguen utilizando, por su sencillez y la relativa economía del equipo necesario. Otro método de uso frecuente es el Sondeo Eléctrico Horizontal (SEH), conocido también como calicata geoelectrica adoptado cuando se desean registrar cambios laterales de la litología investigada. Menos común pero con buenas perspectivas es el método de autopotencial (SP). De introducción reciente es la tomografía eléctrica bidimensional, en la que el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado. Esto permite realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en corto tiempo, obteniendo modelos bidimensionales de excelente calidad.

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) es determinar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie y, a partir de ellas, inferir la distribución vertical de geomateriales presentes en el subsuelo bajo el supuesto que el terreno está formado por unidades discretas de material dispuesto en capas paralelas. En un SEV se introduce una corriente eléctrica continua en el terreno mediante un par de electrodos AB y se mide la diferencia de potencial que genera en el terreno mediante un par de electrodos MN. A partir de la resistencia eléctrica calculada con los valores de intensidad y diferencia de potencial, y de las distancias entre los electrodos de potencial y de corriente, se calcula la resistividad aparente.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores AB, donde si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad AB/2 y el 70.6% por encima de una profundidad AB (Orellana, 1982). Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, podría pensarse que es proporcional a AB. Sin embargo esto sólo es válido para un subsuelo homogéneo.

Los valores de resistividad de un geomaterial pueden variar dentro de amplios límites debido al hecho que la conductividad eléctrica, y la resistividad, tienen dos componentes: la conductividad electrónica, debida al movimiento de electrones en la masa del geomaterial, y la conductividad electrolítica, debida al movimiento de iones en los fluidos que llenan los intersticios del geomaterial. Esta última puede predominar, de modo que un material con elevada resistividad puede presentar una muy baja resistividad si se encuentra saturada con fluidos cargados de sales. De esta forma, la interpretación de la información generada en los sondeos geoelectricos presenta su mayor dificultad cuando se trata de pasar del modelo teórico de combinaciones de estratos y resistividades al modelo físico de estratos y geomateriales. En este paso el ingeniero se enfrenta con el problema que no existe una correspondencia biunívoca entre valores de resistividad y materiales, como puede apreciarse en la Tabla 1, lo que exige un conocimiento previo de la geología y las formaciones superficiales de la zona donde se desarrolla la investigación, de su comportamiento probable al paso de la corriente eléctrica, y una elevada capacidad de interpretación de tipo heurístico.

**Tabla 1.** Valores típicos de resistividad (Universidad Nacional, 2000)

Material	Resistividad ( $\Omega m$ )
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20

Material	Resistividad ( $\Omega m$ )
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2500
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	30-50

Algunos rasgos del subsuelo de interés geotécnico presentan intervalos de valores típicos: el contraste de valores entre el regolito y el basamento rocoso, la abrupta disminución de resistividad asociada a las condiciones de saturación al alcanzar el nivel freático, los valores bajos de resistividad de las arcillas en ambientes sedimentarios, o los valores anómalos de baja resistividad en rocas y aluviones, asociados a la ocurrencia de acuíferos salobres, y los valores anómalos de alta resistividad de las zonas afectadas por movimientos de masa son elementos que pueden ser captados rápidamente y aplicados con provecho.

### 3. GEOLOGÍA

El área del proyecto se encuentra en el núcleo igneometamórfico de la Cordillera Central Colombiana. El sitio de la investigación detallado por Arias (2011) tuvo lugar sobre suelos residuales derivados de cuarzodiorita del Batolito Antioqueño, y el basamento rocoso está formado por rocas cristalinas fracturadas: granitoides del Batolito Antioqueño (*Kqd*), serpentinitas, dunitas (*Kum*), y metasedimentos (*Pmr*) y anfibolitas del Grupo Ayurá – Montebello (*Pam*), de acuerdo con la terminología propuesta por Botero (1963) y Restrepo & Toussaint (1987) en la cartografía actual.

En el área del proyecto la roca sana o ligeramente meteorizada aflora sólo en unos pocos sitios a lo largo de las vías principales, en tres canteras abandonadas y en algunos tramos de las quebradas, razón por la cual la presentación en detalle de la litología no tiene relevancia; por el contrario, en este artículo el énfasis se hará en los suelos residuales derivados de las rocas del basamento.

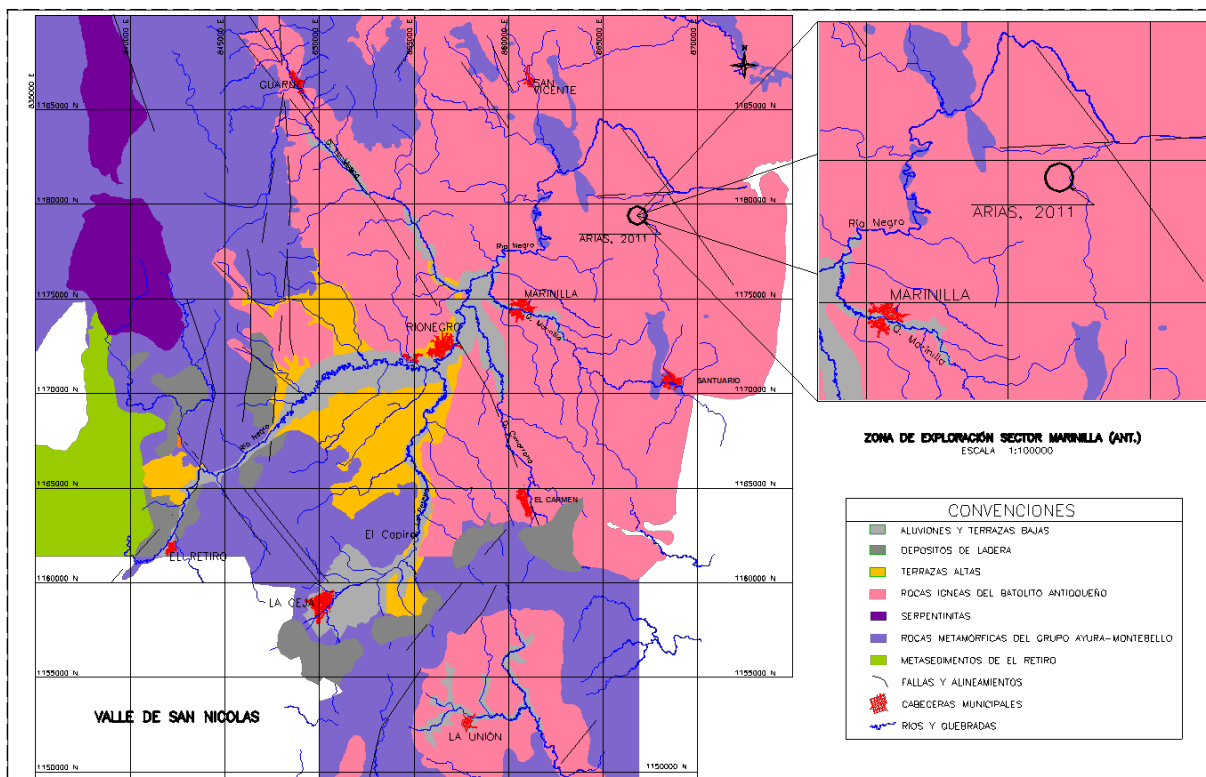


Figura 2. Geología del Valle de San Nicolás

Las características y el espesor de perfil de meteorización varían en las diferentes unidades litológicas y geomorfológicas. El rasgo común es la ocurrencia de una gruesa secuencia de suelo residual maduro y suelo saprolítico, cuyo espesor medio alcanza los 75 m, con una desviación normal de 45 m y valores máximos de 120 m.

En el perfil de meteorización de los Metasedimentos del Grupo El Retiro pueden diferenciarse dos niveles: el suelo residual maduro y el saprolito. El nivel de gruss no ha sido observado en la zona de estudio correspondiente a este informe, ni se encuentra registrado en la literatura. El suelo residual maduro, compuesto por limos de baja compresibilidad y baja permeabilidad, presenta un color pardo rojizo característico; en algunos puntos el suelo residual maduro es de color pardo amarillento pálido. El saprolito, de color pardo rojizo con bandas claras, es una arena limosa de baja permeabilidad.

La meteorización de las anfibolitas de Medellín produce perfiles de meteorización en los que se puede diferenciar tres niveles, suelo residual maduro, saprolito y gruss. En esta unidad los espesores el horizonte de saprolito normalmente es menor que en las rocas granitoides del Batolito Antioqueño y rara vez se encuentra el nivel de gruss. El suelo residual maduro es un limo de color pardo rojizo, de baja compresibilidad y baja permeabilidad. El saprolito es una arena limosa con valores de cohesión bajos. Cuando se encuentra el nivel de gruss, está compuesto de arenas finas de color gris verdoso.

Los productos de meteorización de las Dunitas de Medellín están compuestos de limos de baja compresibilidad y baja permeabilidad, de color pardo, pardo amarillento y pardo rojizo, cuya característica más destacada es su elevada relación de vacíos que puede ser mayor que 3.

La meteorización de las rocas del Batolito Antioqueño, de las cuales puede considerarse que forma parte el Stock de Samarcanda, ha dado lugar a un perfil de meteorización descrito por Carrillo (1973), Hoyos et al (1984) y Villegas (1981) con tres niveles bien diferenciados: suelo residual maduro, saprolito y gruss. El suelo residual maduro está formado por limos de baja a mediana compresibilidad y baja permeabilidad, de colores variados desde el rosado al color pardo amarillento; el saprolito, compuesto por arenas limosas, tiene un aspecto abigarrado con manchas de colores diferentes de ocre, pardo, blanco y púrpura. El nivel inferior de meteorización es una arena gruesa limosa de colores claros en la que es posible reconocer los restos de los minerales del protolito.

Además de los suelos residuales ya descritos se encuentran en la zona un conjunto de depósitos sedimentarios aluviales y de vertiente que fueron objeto de investigación.

Los depósitos de terraza están formados por arenas y gravas finas; los cantos y bloques son escasos y en la mayor parte de los depósitos están ausentes. Su espesor rara vez pasa de 3 m (Universidad Nacional, 2000). Los niveles superiores de terrazas presentan una cubierta de andosoles que no se encuentra en los depósitos de la vega aluvial ni en los niveles más bajos de terrazas.

Los depósitos aluviales del Río Negro y sus afluentes formados por arenas y gravas cuyo espesor rara vez supera los 20m (Universidad Nacional, 2000).

Los depósitos de ladera están formados generalmente por una matriz de limo de color pardo amarillento a pardo rojizo, que rodea cantos y bloques de roca. Algunos de los depósitos no están cubiertos por el manto de andosoles común en la zona, elemento indicador de su emplazamiento reciente.

En toda la extensión del área estudiada, excepto en los depósitos de ladera y en los aluviones recientes, se encuentra un manto superficial de andosoles, descritos usualmente en la literatura como cenizas volcánicas, cuyo espesor medio es de 0.8 m.



Depósitos antrópicos. Esta unidad tiene cierta importancia en la zona donde se desarrolló la investigación por la ocurrencia de llenos controlados en el aeropuerto José María Córdoba y la presa del embalse La Fe. Están compuestos de limos seleccionados y compactados con base en diseños especiales para cada caso.

En la Tabla 2 se encuentran los valores medios y las desviaciones estándar de las características y propiedades geotécnicas de algunos suelos que conforman las formaciones superficiales del área en la que se desarrolló la investigación.

**Tabla 2.** Características y Propiedades de los Suelos Formaciones Superficiales (CHS, 2001).

Propiedad	Formación		TQsra	TQsrm	TQsrq	Qal	Qdl	Qdt
	Unidad							
Peso unitario	kN/m <sup>3</sup>		17,4	16,8	18,1		14,3	17,6
			1,6	0,9	0,9		2,4	3,6
Humedad	%		46	34	50		72	57
			31	10	7,4		27	48
Gravedad Especifica			2,7	2,76	2,66		2,69	2,79
			0,05	0,03	0,02		0,6	0
Pasa #75μ	%		72	85	61		84	56
			27	9	7		17	2
Límite Líquido			61	50	47		79	32
			24	8	6		15	5
Límite Plástico			46	40	33		52	25
			11	4	8		11	3
Cohesión	kPa		39	25	31		39	30
			23	15	7		21	24
Angulo de fricción	°		25	24	20		18	13
			9	10	5		9	10
Módulo edométrico	kPa <sup>-1</sup>		5*10 <sup>-4</sup>	5*10 <sup>-4</sup>				7*10 <sup>-4</sup>
Permeabilidad	cm/s		6*10 <sup>-7</sup>	4*10 <sup>-7</sup>	4*10 <sup>-5</sup>			4*10 <sup>-7</sup>
Infiltración	cm/h		4,2	0,6	3,7	6	4 (e)	10,8
			3,1	---	2,7	2	3 (e)	5,6
Autopotencial	mV		4		1	6	0	1
			11		2	4	2	15
CIC	me/100g		5,8	5	5,9	7,5	5	5,5
			1,4		2,1	0,5	0,6	2,1
pH			5	5,2	5,4	5,3	6,3	5,5
			0,6	0	0,6	0,2	0,6	0,6

**TQsra:** suelos residuales derivados de anfibolita,

**TQsrm:** suelos residuales derivados de metasedimentos

**TQsrq:** suelos residuales derivados de cuarzodiorita,

**Qal:** depósitos aluviales,

**Qdl:** depósitos de ladera,

**Qdt:** depósitos de terraza aluvial.

#### 4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de esta investigación se trabajaron tres niveles diferentes y complementarios: el registro sistemático de sondeos eléctricos verticales en una amplia zona que comprendió los valles de San Nicolás y La Unión, el registro de sondeos eléctricos verticales acoplados a registros de penetración estándar y caracterización geomecánica en la vereda Rosario, Marinilla del Valle de San Nicolás. La interpretación de las curvas de resistividad aparente para llevarlas a valores de resistividad real y espesor de estratos geoelectricos fue hecha finalmente mediante el programa WINSEV.

La síntesis de los registros de valores de resistividad de geomateriales en los Valles de San Nicolás y La Unión se encuentra en la Tabla 3, con valores medios, máximos y mínimos. En ella puede apreciarse una amplia variación en los valores de resistividad de cada material que puede ser explicada por las variaciones mismas las características físicas de los materiales y por las amplias variaciones de humedad que se dan en condiciones naturales que fueron investigadas en pruebas de banco que serán detalladas más adelante. Las variaciones pueden ser más marcadas cuando el agua que satura el geomaterial está cargada de sales por encima de los niveles corrientes en las corrientes superficiales y en las aguas subterráneas, del orden de 50 a 100  $\Omega$ m.

**Tabla 3.** Valores de resistividad de geomateriales en los Valles de San Nicolás y La Unión.

Geomaterial	Resistividad ( $\Omega$ m)	
	Máxima	Mínima
Andosol (ceniza volcánica)	670	2500
Arcilla no saturada	20	30
Arcilla saturada	15	30
Arena aluvial no saturada	230	360
Arena aluvial saturada	140	180
Suelo residual maduro	90	200
Saprolito no saturado	300	570
Saprolito saturado	90	200
Gruss no saturado	900	2200
Gruss saturado	250	650
Basamento cristalino	> 10000	

En esta síntesis tabulada puede apreciarse una amplia variación en los valores de resistividad de cada material que puede ser explicada por las variaciones mismas las características físicas de los materiales y por las amplias variaciones de humedad que se dan en condiciones naturales. Las variaciones pueden ser más marcadas cuando el agua que satura el geomaterial está cargada de sales por encima de los niveles normales en las corrientes superficiales y en las aguas subterráneas, del orden de 50 a 100  $\Omega$ m.

La mayor variación relativa se presenta en el caso de los andosoles. La explicación a esta variación extrema puede darse en razón de la relación de vacíos y la alta capacidad de retención de humedad, característica de este tipo de suelo; las variaciones de humedad gravimétrica pueden ser extremas, desde la condición seca al aire, alrededor de 5%, hasta valores superiores al 100% en condición saturada. En este caso la conductividad electrolítica, que varía con el contenido de humedad, domina la señal de resistividad.

La menor variación relativa se presenta en el caso de las arcillas dado que en este geomaterial el contenido de humedad en el sitio varía usualmente alrededor de su límite plástico. En este caso la conductividad electrónica, que depende del contenido y de minerales de arcilla presentes en el suelo, domina la señal de resistividad.

Los valores de resistividad de arena aluvial corresponden todos a depósitos superficiales en la misma cuenca, formados en condiciones de sedimentación similares, que se encuentran en condiciones ambientales similares, lo que explica su homogeneidad, que puede apreciarse en la relación entre el valor máximo y medio. El valor mínimo de la resistividad en arena aluvial saturada corresponde a unos pocos casos que pueden explicarse por el posible contenido de limo en la arena de los sitios donde fueron realizados los SEV.

Los valores de resistividad del suelo residual maduro presentan una dispersión un poco mayor que la de las arenas. Debe tenerse en cuenta que aquí se trata de un material limoso cuya composición y saturación cambia en profundidad, en un mismo SEV, y puede cambiar de sitio en sitio debido a la composición de la roca original y del estado de meteorización. Los valores mínimos encontrados pueden estar asociados a la ocurrencia del nivel freático.

Los valores de resistividad más elevados registrados en el saprolito que en el suelo residual maduro pueden ser explicados en razón del mayor contenido de arena compuesta de partículas de cuarzo y feldespato en este horizonte. Igual anotación puede hacerse sobre la resistividad registrada en el nivel de gruss.



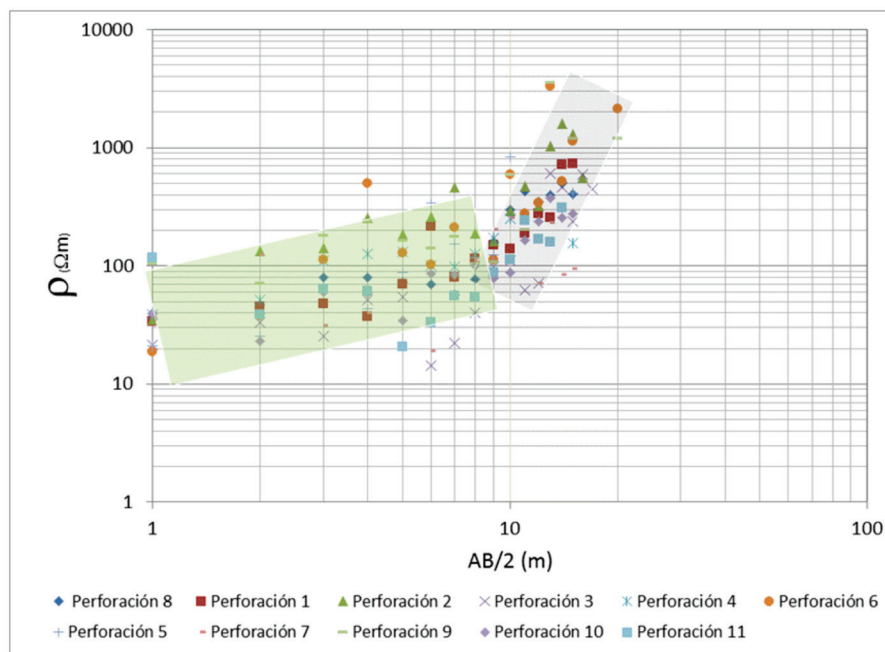
La comparación de los valores de resistividad del conjunto de los sondeos en los valles de San Nicolás y la Unión (VSU), con los valores del sector explorado en detalle en la Vereda Rosario (VR), presentados en la Tabla 4, puede apreciarse la coherencia de los valores de ambos conjuntos, excepto en el caso de los andosoles, cuya explicación puede encontrarse en el hecho que los sondeos VR fueron ejecutados todos en un corto intervalo de tiempo en período lluvioso, lo cual implica que tales andosoles estaban en condición saturada o próxima a ella, a las que corresponden valores bajos de resistividad, en tanto que los sondeos del conjunto VSU fueron ejecutados en un intervalo de 5 meses, durante los cuales encontramos un amplio espectro de condiciones de saturación a las que pueden corresponder, y de hecho corresponden, valores de resistividad en un intervalo muy amplio.

**Tabla 4.** Comparación de los valores de resistividad de geomateriales en los Valles de San Nicolás y la Unión (VSU) con los correspondientes a la Vereda Rosario (VR).

Geomaterial	Resistividad (Wm)					
	VR	VSU	VR	VSU	VR	VSU
	$\bar{\rho}$	$\bar{\rho}$	Máximo	Máximo	Mínimo	Mínimo
Andosol (ceniza volcánica)	40	670	90	2500	30	50
Suelo residual maduro	120	90	250	200	20	15
Saprolito no saturado	220	300	575	570	80	100
Gruss no saturado	1280	900	3000	2200	150	150

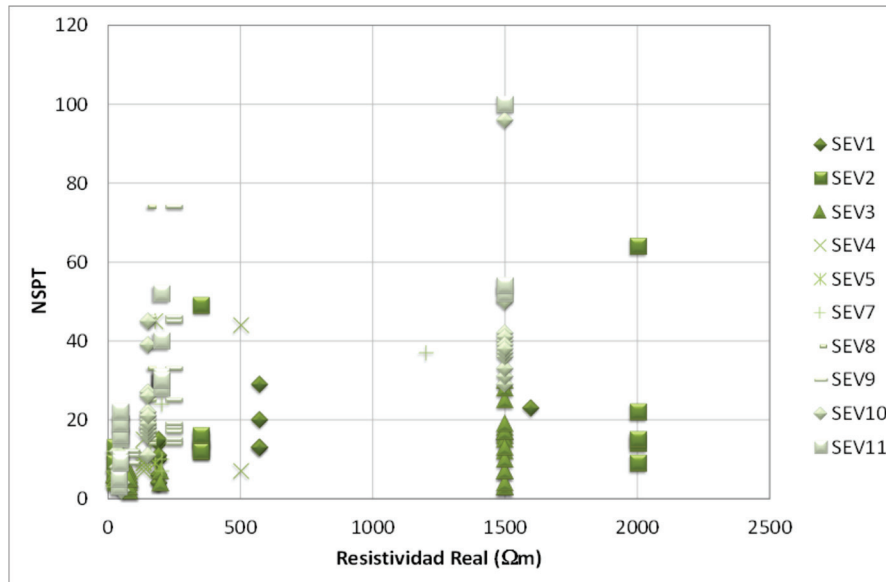
En la Tabla 3 y la Tabla 4 debe destacarse que los valores correspondientes a los diferentes materiales se superponen parcialmente en su segmento inferior lo que dificulta la interpretación. Por otra parte, si se considera que el intervalo de valores de resistividad es muy amplio, en tanto que el intervalo de valores de características y propiedades geomecánicas es relativamente estrecho, no es posible establecer relaciones cuantitativas entre una y otras.

En la figura 3, se encuentran los valores de resistividad eléctrica versus profundidad investigada, de los sondeos ejecutados en la Vereda Rosario; en ella se puede apreciar una tendencia positiva hasta los 8 m de profundidad en los registros de resistividad; a partir de esta profundidad la variación el incremento de la resistividad es más pronunciado, indicando un cambio de material esta profundidad en promedio para la zona investigada, correspondiendo al cambio entre saprolito y gruss, último geomaterial donde se presentan cambios significativo en las características, y propiedades geomecánicas y en la resistividad.



**Figura 3.** Valores de resistividad eléctrica versus profundidad.

En la Figura 4 presentamos los valores de resistividad eléctrica versus los valores de resistencia a la penetración estándar  $N_{SPT}$ , en la que no es posible identificar una tendencia de correlación útil en la investigación geotécnica. Este resultado está en la misma línea de la anotación de párrafos anteriores en el sentido que la resistividad eléctrica está relacionada con las características mineralógicas, de densidad y de saturación del terreno pero no directamente con sus propiedades geomecánicas.



**Figura 4.** Resultados tabulados del número de golpes del ensayo de penetración estándar (NSPT) vs la resistividad real ( $\Omega m$ ) en cada sondeo eléctrico realizado.

## 5. CONCLUSION

Ya fue anotado cómo la práctica geotécnica corriente presenta un retraso notable respecto al uso de técnicas geofísicas en la generación de información relevante para los proyectos. El uso de métodos geoelectrónicos para la caracterización de suelos con énfasis en geotecnia ha sido poco utilizado a nivel mundial, solo algunos artículos han mostrado su interés al intentar relacionar algunos registros de resistividad con condiciones geológicas y/o geotécnicas.

De los resultados de esta investigación puede concluirse que los registros de resistividad eléctrica permiten discriminar con razonable seguridad los tipos de geomaterial que se encuentran en el subsuelo, aunque no es posible correlacionarlos directamente con características y propiedades geomecánicas. Los valores de resistividad para los diferentes materiales, propuestos en las Tabla 3 y 4, han sido validados para los andosoles, los depósitos aluviales y depósitos de ladera y para los suelos residuales derivados de cuarzodiorita del Batolito Antioqueño y por extensión los valores de resistividad de otros suelos residuales derivados de rocas cristalinas.

Lo anterior permite obtener información de alta valor agregado con un costo comparativamente bajo, en una relación 2:1 y mayor, con respecto a los métodos tradicionales de auscultación del terreno. Como ejemplo, a la fecha, el costo de un SEV para un proyecto de ingeniería en suelos residuales se encuentra del orden de 2 S.M.L.V.M para una profundidad de investigación mayor de 50m, comparado con una perforación de esta magnitud que en promedio tendría un coste de 10 S.M.L.M.V e inclusive aún más si se perforan niveles de roca. En el caso de los depósitos de vertiente este costo puede ser de 20 S.M.L.M.V, y en los aluviones llegaría hasta los 30 S.M.L.M.V. Adicionalmente la logística de desplazamiento y el menor tiempo de generación de información, es una ventaja que genera valor agregado para los proyectos de ingeniería.

## BIBLIOGRAFIA

- ARIAS, D. (2011). Exploración Geotecnica – Relaciones Geoeléctricas. Trabajo Dirigido de Grado para Optar al Título de Maestría en Ingeniería Área Geotecnia. 104 p. Facultad Minas. Medellín.
- Botero, G. (1963). Contribución al Conocimiento de la Geología de la Zona Central de Antioquia. Anales Facultad Minas, 57: 1-107. Medellín.
- CARRILLO, J., (1973), Propiedades Físicas de los Suelos Derivados del Batolito Antioqueño, Tesis de Grado, 52 p. Facultad de Minas, Medellín.
- CHS, (2010), Diseños de parte de la Infraestructura Requerida para la Prestación de los Servicios de Acueducto y Alcantarillado en la Zona Centro Occidental del Valle San Nicolás y Envigado, contrato 10000235937 EPM-CHS. Consultoría Colombiana, (1984), Estudios de comunicación Medellín - Aeropuerto José María Córdoba. Informe Final.
- Feininger, T., Barrero, D., Castro, N., Ramírez, O., Lozano, H & Vega, J., (1970). Mapa Geológico del Oriente de Antioquia (Hojas I y II) Cuadrángulo I-9 y parte de los Cuadrángulos H- 9, H-10, J-9 y J-10 Ingeominas, Bogotá.
- Feininger, T.; Botero, G. (1982). The Antioquian Batholith, Colombia. Ingeominas, Publ. Esp., 12:1-50. Bogotá.
- González, H., (1980). Geología de las Planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salaminas) del mapa geológico de Colombia, 23(1): 174p
- Hermelin, M., (1978), Excursión Zona Central de Antioquia (Valle de Aburrá y sus alrededores), Hoja de Ruta, II Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.
- Hermelin, M., (1980), Cenizas Volcánicas Cuaternarias en el Oriente Antioqueño, Guía de Excursión Rionegro – Santa Fe de Antioquia, Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia. Bogotá.
- Hermelin, M., (1983). Origen del Valle de Aburrá. Evolución de las ideas. Boletín de Ciencias de la Tierra, Vols.78: pp 4765.
- Hermelin, M., (1992), Los Suelos del Oriente Antioqueño un Recurso no Renovable, Bulletin d'Institut Francais d'Etudes Andines, 21(1), 25-36.
- Hoyos, F., (2000), Evaluación Hidrogeológica del Corredor del Túnel Aburra-Oriente, Informe a Concesión Túnel Aburra Oriente, 47 p., Medellín.
- Hoyos, F., Vélez, M.V., Múnera, J.C., Arias, D.E., (2001), Sistemas hidrogeológicos de los Valles de San Nicolás y La Unión en la Zona Central de Antioquia, Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, Montevideo.
- Orellana, E. (1974). Prospección Geoeléctrica por Campo Variable. Madrid: Paraninfo. Vol 2.
- Orellana, E. (1982). Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. 2ª ed. Madrid: Paraninfo. Vol. 1.
- Restrepo, J.J. & Toussaint, J. F., (1987), El Grupo Ayurá Montebello ¿Tiene Todavía Validez Estratigráfica? Seminario Gerardo Botero Arango, pp 167- 173, Medellín.
- Roy, A. (1972). Depth of Investigation in Wenner, Three-Electrode and Dipole-Dipole DC Resistivity Methods. Geophysical Prospecting, 20: 329-340.
- Roy A. & Apparao A., Depth of Investigation in Direct Current Methods Geophysics 36, 943 (1971), DOI:10.1190/1.1440226
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E. (1990). Applied Geophysics. 2ª ed. New York: Cambridge University Press.
- Universidad Nacional de Colombia, (1997), Evaluación Hidrogeológica Preliminar para los Municipios de El Retiro, Rionegro, La Ceja, El Carmen de Viboral, Guarne y Marinilla, Medellín.

Universidad Nacional de Colombia, (2000), Investigación de Aguas Subterráneas Región Valles de San Nicolás, Medellín.

<http://web.usal.es/~javisan/hidrosan>. Prospección Geofísica. Sondeos Eléctricos Verticales