

**CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DEL ACUÍFERO LIBRE DEL  
SUROCCIDENTE DEL VALLE DE ABURRÁ, A PARTIR DE  
TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS CALIBRADAS CON UN MODELO  
GEOLÓGICO INICIAL Y DE FÍSICA DE ROCAS**

**Sebastian Vanegas Cubillos**

**David Ospina Benítez**

**MEDELLÍN**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

**2020**

## **Agradecimientos**

Agradecemos a los compañeros y profesores que nos han acompañado durante el proceso académico especialmente a la profesora Marcela Jaramillo e Isabel Restrepo.

Este trabajo esta dedicado para María Blanca Bolívar de Vanegas la cual falleció el día 16 del mes 4 en el año 2020, desde su estadía en la Tierra y ahora en el cielo fue pilar fundamental para cumplir con mi proceso académico. Att: Sebastian Vanegas

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	9
1. Pregunta e hipótesis .....	11
2. Objetivos.....	11
2.1 Objetivo General.....	11
2.2 Objetivos específicos .....	11
3. Área de estudio.....	12
3.1 Localización de zona de estudio: .....	12
3.2 Geología regional .....	14
3.3 Geología local.....	16
3.4 Geomorfología .....	16
3.4.1 Bloque Romeral:.....	17
3.4.2 Bloque La Estrella - San Antonio de Prado. ....	17
3.5 Hidrogeología.....	18
4. Marco conceptual.....	20
4.1 Modelo Geológico inicial (MGI) .....	20
4.2 Información geológica de la zona de estudio .....	20
4.3 Modelo de física de rocas (MFR) .....	21
4.3.1 Tomografía eléctrica resistiva (TER) .....	22
4.4 Métodos de inversión .....	23
5. Métodos y datos.....	25
5.1 Datos seleccionados.....	26
5.2 Evaluación geofísica de la zona de estudio.....	29
5.3 Inversión de tomografías eléctricas.....	31
6. Resultados .....	33
6.1 Compilación de la información .....	33
6.2 Modelo Geológico inicial (MGI). ....	34
6.2.1. Modelo conceptual parte baja de la ladera .....	34
6.2.2. Modelo conceptual parte media de la ladera .....	35
6.2.3. Modelo conceptual parte alta de la ladera .....	35
6.3 Modelo de física de rocas (MFR) .....	39
6.3.1 Modelo sintético parte baja de la ladera .....	40

6.3.2	Modelo sintético parte media de la ladera .....	40
6.3.3	Modelo sintético parte alta de la ladera .....	41
6.3.4	Rango de resistividad.....	41
6.3.5	Correlación geología y geofísica.....	42
6.4	Caracterización hidrogeológica del subsuelo a partir de la interpretación de TER 52	
7.	Discusión.....	54
8.	Conclusiones.....	56
9.	Referencias Bibliográficas.....	57

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos seleccionados para la definición del MGI y MFR.....	28
Tabla 2. Tabla de compilación de rangos de resistividad estudios AMVA (2002), AMVA y UdeA (2013) y EPM y UdeA (2014). Elaboración propia. ....	29
Tabla 3. Tabla resumen información geológica y geofísica del Valle de Aburrá.....	33
Tabla 4. Rangos de resistividad parte baja de la ladera .....	41
Tabla 5. Tabla generalizada rangos de resistividad para la zona de estudio. Elaboración propia.....	42
Tabla 6. Tabla comparativa de interpretación tomografía 3, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013).....	44
Tabla 7. Tabla comparativa de interpretación tomografía 4, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013).....	46
Tabla 8. Tabla comparativa de interpretación tomografía 5, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013).....	48
Tabla 9. Tabla comparativa de interpretación tomografía 6, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013).....	49
Tabla 10. Tabla comparativa de interpretación tomografía 7, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013).....	51
Tabla 11. Unidades hidrogeológicas de la zona de estudio .....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización zona de estudio. Elaboración propia. ....	13
Figura 2. Mapa Geológico – FUENTE SIG: EPM & UDEA (2014) – CORANTIOQUIA & AMVA (2018). Elaboración propia. ....	15
Figura 3. Mapa de unidades hidrogeológicas Valle de Aburrá. Modificado de AMVA y UdeA (2013). ....	19
Figura 4 Ejemplo de la correlación entre el modelo geológico y el modelo de física de rocas. Tomado y modificado de Butler (2005). ....	21
Figura 5. Esquema general de adquisición de datos de tomografía geoelectrica Tomado de Loke et al. (2003). ....	22
Figura 6. Modelo, número de bloques y puntos de medición utilizada por el software de inversión. Fuente Elaboración Propia (Obtenida de Res2Dinv) ....	23
Figura 7. Esquema metodológico general del proyecto de grado. Elaboración propia ..... 25	25
Figura 8. Mapa de localización de datos seleccionados (perforaciones y TER). Elaboración propia. ....	27
Figura 9. Esquema metodológico de inversión utilizado en las TER procesadas para la zona de estudio. Elaboración propia. ....	32
Figura 10. Modelo conceptual parte baja de la ladera ..... 34	34
Figura 11. Modelo conceptual parte media de la ladera ..... 35	35
Figura 12. Modelo conceptual parte alta de la ladera ..... 35	35
Figura 13. Cortes geológicos de la zona de estudio. Elaboración propia tomado de CORANTIOQUIA Y AMVA (2018). ....	36
Figura 14. Corte A - A' de la zona de estudio ..... 37	37
Figura 15. Corte B – B' - B'' de la zona de estudio. .... 37	37
Figura 16. Corte C - C' de la zona de estudio ..... 38	38
Figura 17. Corte D - D' de la zona de estudio ..... 38	38
Figura 18. Modelo sintético parte baja de la ladera suroccidental. .... 40	40
Figura 19. Modelo sintético parte media de la ladera suroccidental ..... 40	40
Figura 20. Modelo sintético parte media de la ladera suroccidental ..... 41	41
Figura 21. Modelo de inversión tomografía 1. Tomado de: AMVA y UdeA (2014) ..... 43	43
Figura 22. Modelo de inversión tomografía 2. Tomado de: AMVA y UdeA (2014) ..... 43	43
Figura 23. Modelo de inversión tomografía 3. Elaboración propia ..... 44	44
Figura 24. Modelo conceptual de materiales TER-03. Elaboración propia. .... 45	45
Figura 25. Modelo de inversión tomografía 4. Elaboración propia ..... 46	46
Figura 26. Modelo conceptual de materiales TER-04. Elaboración propia. .... 47	47
Figura 27. Modelo de inversión tomografía 5. Elaboración propia ..... 47	47
Figura 28. Modelo conceptual de materiales TER-05. Elaboración propia ..... 48	48
Figura 29. Modelo de inversión tomografía 6. Elaboración propia ..... 49	49
Figura 30. Modelo conceptual de materiales TER-06. Elaboración propia ..... 50	50
Figura 31. Modelo de inversión tomografía 7. Elaboración propia ..... 51	51
Figura 32. Modelo conceptual de materiales TER-07. Elaboración propia. .... 52	52

## **Anexos digitales**

**[https://1drv.ms/u/s!An4Nc1mbN2fHgfoiea\\_nnwMrf\\_KZkQ?e=BgpwwO](https://1drv.ms/u/s!An4Nc1mbN2fHgfoiea_nnwMrf_KZkQ?e=BgpwwO)**

Anexo 1. Compilación de la información geológica y geofísica.

Anexo 2. Descripción de datos seleccionados.

Anexo 3. Procesamiento e interpretación TER.

Anexo 4. Diagramas de caja. Método estadístico

## **Resumen**

Los modelos geológicos inicial (MGI) y de físicas de rocas (MFR) son herramientas importantes en los procesos de inversión geofísica (tomografías eléctricas) e interpretación de estas, cuando se usan con el objeto de lograr la caracterización estratigráfica e hidrogeológica de una zona de estudio. Los MGI y MFR se construyen a partir del procesamiento de información primaria y/o secundaria, generando una representación esquemática de la zona la cual aporta al entendimiento de las propiedades físicas de los materiales.

Dichos modelos iniciales deben ser implementados para la interpretación de datos en geofísica somera, en el caso de las tomografías eléctricas las interpretaciones dependen en gran parte de la calidad de los datos de campo, el procesamiento y la cantidad de información geológica disponible. La implementación de MGI y MFR es una herramienta fundamental para disminuir la incertidumbre relacionada al problema de la no-unicidad en inversiones geoeléctricas.

Para la construcción del MGI de la zona de estudio se tuvo en cuenta la cartografía geológica disponible y columnas estratigráficas, dicha información permitió realizar correlaciones estratigráficas y cortes geológicos. Mientras que para el MRF se utilizó información de resistividades aparentes de materiales de la zona de estudio y sus características granulométricas. Los cortes geológicos, las correlaciones estratigráficas y los rangos de resistividad esperados en los materiales de la zona de estudio son los parámetros más importantes en la interpretación de las tomografías eléctricas.

Este trabajo analiza el caso del acuífero libre del Valle De Aburrá definido por AMVA y UdeA (2012), AMVA y UdeA (2013) de la zona suroccidental, donde se compone principalmente por depósitos no consolidados. Mediante la interpretación geofísica se encontró que los materiales que componen dichos depósitos en el sector presentan variaciones texturales y, por ende, su clasificación y su comportamiento hidrogeológico resultan de manera heterogénea.



## Introducción

El agua subterránea es el recurso hídrico de agua dulce más importante en la actualidad debido a su calidad y volumen, además de su importante papel en el equilibrio de los ecosistemas (Ariyo et al., 2011). Dicho recurso se almacena en múltiples materiales como suelo y roca, y por ende la importancia de conocer el comportamiento y la interacción de estos componentes (materiales y agua subterránea) (Ariyo et al., 2011).

El consumo de agua potable en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se ha acelerado en la última década debido al evidente desarrollo urbano, agrícola e industrial. Desde el 2010, en Colombia, mediante el estudio nacional del agua (IDEAM, 2010), se impulsó la necesidad urgente de conocer las condiciones físicas y químicas del recurso hídrico. Estudios como el AMVA y UdeA (2012), AMVA y UdeA (2013) y EPM y UdeA (2014) realizaron la caracterización geológica e hidrogeológica del Valle de Aburrá. Sin embargo, en la ladera suroccidental del Valle de Aburrá, entre el corregimiento de San Antonio de Prado, La Estrella, Itagüí y Envigado, no se cuenta con una caracterización detallada del comportamiento del agua subterránea en diferentes unidades litológicas.

En la exploración de aguas subterráneas es común utilizar métodos geofísicos para caracterizar la geometría de las capas (extensión lateral y espesor) y sus relaciones estratigráficas. Hay dos métodos geoelectrónicos de preferencia en hidrogeología: los sondeos eléctricos verticales (SEV) y las tomografías eléctricas verticales (TER). Ambos son métodos de prospección somera y presentan diferentes maneras de adquirir la información con base en los objetivos deseados por el estudio o proyecto (Gómez, 2018).

Una manera de realizar la exploración de aguas subterráneas es a través de métodos indirectos y directos. Las tomografías eléctricas son un método geofísico indirecto que genera imágenes 2D del terreno y permiten combinar con métodos directos, uno de ellos las perforaciones, que permiten extraer material in situ brindando información geológica. (Chaudhuri et al., 2013).

La información geológica y geofísica, se utiliza para la generación de modelos geológicos y modelos geofísicos respectivamente. La precisión de este último depende en gran parte del procedimiento utilizado para la adquisición y procesamiento de datos, además de la información geológica directa disponible. La principal limitación durante las inversiones geoelectrónicas es el problema de no unicidad, en el cual los modelos pueden tener múltiples soluciones. La incorporación de modelo geológico inicial (MGI) y modelo de física de rocas (MFR) disminuye el problema de no unicidad en el proceso de parametrización geofísica durante la inversión de estos datos, además de mejorar la interpretación de tomografías eléctricas y permitir una caracterización detallada de la geometría y textura de los materiales que componen el sistema acuífero (Butler, 2005).

Para la elaboración de este proyecto se recopiló información geofísica y geológica disponible del Valle de Aburrá, la cual fue procesada e interpretada para la definición de los MGI y MFR. La correlación de tomografías eléctricas con los modelos iniciales da como resultado la caracterización estratigráfica somera y las características hidrogeológicas de los

materiales que componen la zona de estudio. Los materiales que componen el Valle de Aburrá están asociados principalmente a depósitos no consolidados aluviales y de flujo de lodos y escombros (Rendón, 2006).

Este trabajo pretende entonces, elaborar un modelo geológico inicial (MGI) y de física de rocas (MFR) del acuífero libre en la zona suroccidental del Valle de Aburrá e implementarlo en el procesamiento y la interpretación de las tomografías eléctricas seleccionadas. Mediante dicha correlación se espera mejorar los resultados en la caracterización de la estratigrafía somera y las características hidrogeológicas de los materiales que componen la zona de estudio.

## **1. Pregunta e hipótesis.**

### **1.1 Pregunta de investigación**

¿Como se puede disminuir la incertidumbre durante el proceso de inversión geofísica de tomografías eléctricas para obtener interpretaciones más confiables?

### **1.2 Hipótesis**

La implementación de modelos geológico inicial y de física de rocas en flujos de inversión de tomografías eléctricas, es una buena alternativa para disminuir la incertidumbre en los resultados e interpretación geológica de las tomografías eléctricas.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Definir e implementar en el acuífero libre del suroccidente del Valle de Aburrá un modelo geológico inicial y de física de rocas durante el procesamiento e interpretación de tomografías eléctricas para disminuir la incertidumbre de los resultados.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Compilar la información secundaria directa (perforaciones) e indirecta (tomografías eléctricas resistivas -TER-) en la zona de estudio para la realización del modelo geológico inicial.
- Realizar un modelo geológico inicial y de física de rocas del subsuelo somero al suroccidente del Valle de Aburrá.
- Interpretar las unidades hidrogeológicas a partir del procesamiento y análisis de las tomografías eléctricas disponibles para la zona de estudio.

### **3. Área de estudio**

#### **3.1 Localización de zona de estudio:**

La zona delimitada para el estudio se encuentra en la ladera suroccidental del Valle de Aburrá. Esta zona abarca un área aproximadamente de 25 km<sup>2</sup> y presenta unas diferencias de elevación hacia el occidente con alturas de 2100 msnm cerca al casco urbano de San Antonio de Prado, y el más bajo en el río Medellín a unos 1500 msnm aproximadamente. La zona de estudio ( Figura 1) ocupa territorio de 4 municipios: Medellín (corregimiento de San Antonio de Prado), La Estrella, Itagüí y Envigado. La topografía de la zona es inclinada con pendientes medias a altas, en San Antonio De Prado y La Estrella, mientras que en los municipios de Itagüí y Envigado se encuentra una parte con inclinaciones medias a bajas, y algunas pendientes aisladas, pero aplanando el relieve hacia el canal del río.

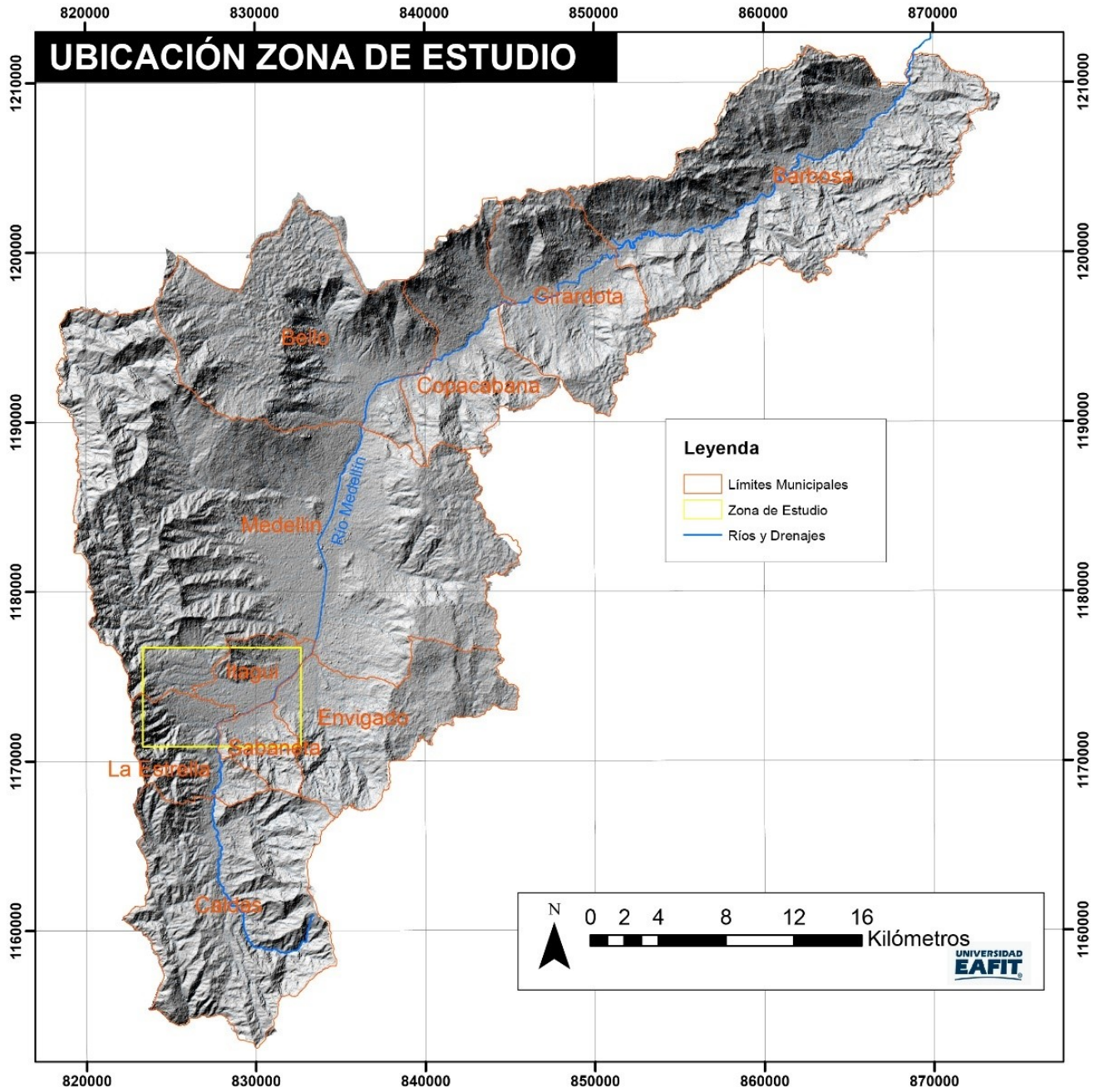


Figura 1. Mapa de localización zona de estudio. Elaboración propia.

### 3.2 Geología regional

En general, el Valle de Aburrá, presenta una condición geológica compleja, enmarcada en la Cuenca Del Río Medellín o Aburrá, por la presencia de múltiples unidades geológicas con múltiples composiciones desde rocas metamórficas como esquistos, anfibolitas, migmatitas y gneises, rocas ígneas granodioritas, gabros, basaltos y rocas volcanosedimentarias, y finalizando con depósitos de vertientes, lodos y aluviales, con edades que se han enmarcado desde el Paleozoico hasta los depósitos Cuaternarios recientes. Dichas unidades están limitadas por el sistema de Fallas Cauca-Romeral ubicado hacia el W y sistemas de fallas menores en sentido N-S como la Falla San Jerónimo que, pese a no estar ubicada dentro de la zona de estudio, es la más cercana hacia el costado occidental. (Rendón et al., 2007 en AMVA, 2007).

Para la zona de estudio, y teniendo en cuenta principalmente el informe de EPM y UdeA del 2014 y la actualización del CORANTIOQUIA & AMVA (2018), se observa la siguiente estratigrafía de la zona (ver Figura 2).

Las rocas más antiguas se componen de los Esquistos de Cajamarca del Triásico, que se ubican hacia el costado sur Oriental, entre los municipios de Envigado y Sabaneta, Posteriormente, hacia el costado sur Occidental afloran Los Gabros Del Romeral, que a pertenecen al Complejo Ofiolítico del Romeral de edad Jurásica, y sobre estos se observa de manera alargada ocupando todo el costado occidental de la zona de interés el complejo Quebradagrande con edad del Cretácico. Este complejo fue descrito por Botero (1963) como un cuerpo alargado sentido N-S, delimitado por la Falla Cauca Romeral al occidente, y la Falla San Jerónimo hacia el Oriente, compuesto por una sucesión de rocas volcánicas verdes con sedimentos intercalados, descrito más a fondo en trabajos posteriores como la plancha 146 (INGEOMINAS 1984) y el POMCA desarrollado por CORANTIOQUIA Y AMVA (2018). En estos trabajos se delimitan sus dos miembros claramente como: miembro volcánico compuesto principalmente por rocas basálticas y gabros asociados el inicio del plutonismo básico y ultrabásico en la cordillera central a finales del Jurásico, y un miembro volcano sedimentario compuesto de liditas, lodolitas, grauvacas, conglomerados finos y tobas, con un espesor muy variable, llegando hasta los 400 metros, finalizando con intrusiones cuarzodioríticas (INGEOMINAS, 1984). Esta formación se observa en la zona hacia el costado más occidental y por fuera de la zona de estudio, mientras que el miembro sedimentario se extiende sobre la zona alta de la ladera en el occidente y hacia el centro de la cuenca, pero aflorando principalmente en la región de San Antonio de Prado (CORANTIOQUIA & AMVA,2018),

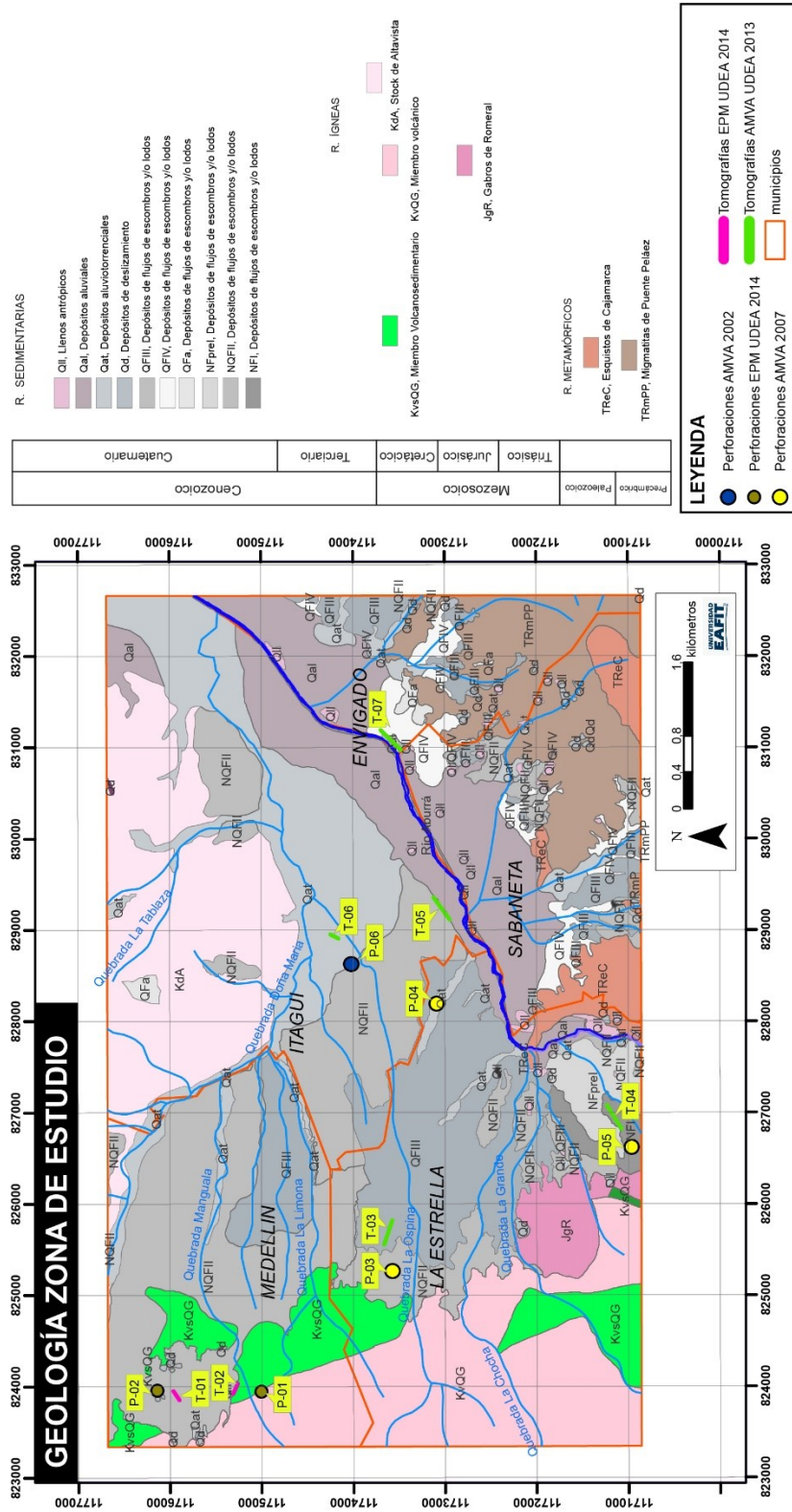


Figura 2. Mapa Geológico – FUENTE SIG: EPM & UDEA (2014) – CORANTIOQUIA & AMVA (2018). Elaboración propia.

### 3.3 Geología local

La geología local se caracteriza, para las profundidades someras (<200 m), por depósitos que son de suma importancia por su extensión a lo largo del Valle y, por su espesor que puede llegar a ser de hasta 200 m hacia el sur del Valle (Shelmon, 1979). Por su edad de formación más reciente (Cuaternario) se encuentran suprayacentes en casi la totalidad de las rocas descritas previamente (CORANTIOQUIA, AMVA, 2018). Se presentan cuatro tipos de depósitos:

- a) Capa de suelo derivada de depósitos de aluviotorrenciales de aproximadamente 3,12 Ma hacia las partes más bajas del Valle, con espesores entre 50 hasta 200 m, en un relieve suave, compuesto por una mezcla heterogénea de bloques en matriz-fino granular arcillo limosa con bloques (matriz soportado) angulares de 1cm hasta 1 m (metagabros, dunita, anfibolita, y gabros altamente meteorizados). (Restrepo, 1991), (Toro, 1999), (Rendón, 2006).
- b) Capa de depósitos de vertiente y flujo de lodos, se extiende por ambas laderas del Valle con espesores entre los 10 hasta los 80 m, variando su composición según su ubicación. con matriz limosa y bloques subangulares menores a los 2m con composición de gabros, dunitas, metagabros, anfibolitas y gneises, y algunos depósitos retrabajados, entre 1.8 Ma +/- 0.62Ma (Toro, 1999). (Rendón, 2006).
- c) Capa matriz soportada, correspondiente a sistemas actuales de drenaje y zonas de alta pendiente sobre ambas laderas en zonas de retrabajamiento de depósitos más antiguos, con espesores variables entre los 1 a 5 metros, materiales de alta energía, matriz arenosa a limo arenosa (Rendón, 2006).
- d) Capa de depósitos aluviales, asociados a los depósitos recientes, resultantes de la dinámica del río Aburrá y sus principales afluentes. Ubicados a lo largo de la zona baja del Valle, conformando llanuras de inundación y terrazas aluviales de diferentes niveles. De granulometría heterogénea que va desde arcillas, limos, arenas y gravas gruesas y fragmentos rocosos, con espesores muy variables, desde centímetros hasta metros en algunas zonas. Debido a la urbanización de los sectores cercanos al canal de río por los diferentes municipios, las condiciones son muy variables e igualmente sus descripciones, Además, se encuentran altamente intervenidas por llenos y obras civiles (AMVA y UdeA 2013).

### 3.4 Geomorfología

La zona de estudio presenta una geomorfología influenciada principalmente por el relieve, la erosión, la litología y la tectónica (AMVA y UdeA 2013). La zona se encuentra en una tendida ladera, de entre 5 a 6 kilómetros, con pendientes medias a altas (entre el 5% hasta el 30% de inclinación). Se puede apreciar que el factor asociado a la erosión y deposición de material sedimentario asociado a la acción de la gravedad por la erosión y los múltiples quebradas que recorren la ladera, han permitido desarrollar suelos con un relieve quebrado, con colinas de suaves a largas, y zona con alto flujo de material que puede desembocar en material asociado flujos de lodos y depósitos de vertiente (AMVA y UdeA



2013). Estos depósitos han sido asociados a dos factores: deslizamientos por saturación y actividad sísmica. La zona al presentar valores de humedad altos, permiten que los suelos sufran constante saturación lo que lleva a deslizamientos y movimientos en masa desde unos pocos metros hasta grandes porciones de la ladera (AMVA y UdeA 2013). La actividad sísmica también ha sido un factor que ha permitido la dinámica de los depósitos en el sector de flujo y acumulación (Rendón 2006). Sin embargo, no se encuentra mucha evidencia de múltiples eventos de este tipo, como sí los hay por deslizamiento por saturación asociados a épocas de lluvia, inclusive, siendo cartografiados más específicamente. (AMVA y UdeA 2013).

La dinámica del Río Medellín en la zona es también uno de los factores que más ha delimitado el relieve de la zona, generando geoformas como terrazas, y llanuras de inundación en la parte baja del Valle. Esto ha permitido el desarrollo de suelos, sin embargo, la intervención antrópica debido a alto desarrollo demográfico en la región de los últimos años es también un factor que, a partir de llenos antrópicos, la canalización del río y el aprovechamiento de zonas de llanuras de inundación han permitido el asentamiento de infraestructura, transporte, comercio y residencia. Estos factores han alterado el ciclo de las quebradas, la geomorfología y los suelos en las partes más proximales al canal del río. (AMVA y UdeA 2013).

La zona de estudio se encuentra dentro de 2 grandes bloques geomorfológicos con unidades características: el Bloque Romeral y el Bloque La Estrella-San Antonio de Prado (AMVA y UdeA 2013).

#### **3.4.1 Bloque Romeral:**

Se ubica desde la parte media hasta la baja de la vertiente occidental del Valle de Aburrá, correspondiente al casco urbano del municipio de La Estrella hacia el sur principalmente y del corregimiento de San Antonio de Prado al norte. Su relieve presenta laderas largas, con pendientes predominantes son suaves a localmente empinadas homogéneas y levemente cóncavas que van desde la cota 2.200 msnm aproximadamente, hasta el fondo del Valle con una altitud 1.600 msnm. Su composición es casi en su mayoría a depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros, con eventuales ventanas erosivas (zonas de mayor inclinación) de rocas meteorizadas pertenecientes al Complejo Quebradagrande (AMVA y UdeA, 2013).

#### **3.4.2 Bloque La Estrella - San Antonio de Prado.**

Esta se localiza entre la parte media a baja del Valle de Aburrá, ubicada entre los cascos urbanos del municipio de La Estrella al sur y del corregimiento de San Antonio de Prado al norte. Se caracteriza por laderas largas, homogéneas y levemente cóncavas, pendientes predominantes son suaves a localmente empinadas, que desciende desde una altitud 2.200 m.s.n.m. aproximadamente hasta el fondo del Valle, en el canal de río a 1500 msnm (especialmente hacia las vaguadas del sector). La composición casi en su totalidad pertenece a depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros, con

eventuales ventanas erosivas (zonas de mayor inclinación) de rocas meteorizadas pertenecientes al Complejo Quebradagrande (AMVA UdeA 2013).

### **3.5 Hidrogeología**

Los estudios AMVA y UDEA (2013), EPM y UDEA (2014) y CORANTIOQUIA y AMVA (2002) presentan una caracterización de unidades hidrogeológicas del Valle de Aburrá (Figura 3) mediante información estratigráfica, geofísica e hidroestratigráfica, clasificando 3 unidades de acuífero, sus zonas de recarga y su potencial hidrogeológico.

- La primera unidad hidrogeológica es el acuífero libre del Valle de Aburrá conformado por depósitos de flujo de lodo y escombros y depósitos aluviales del río Medellín y sus afluentes; se extiende por todo el Valle desde Caldas hasta Barbosa. Esta unidad se considera con buen potencial hidrogeológico debido a su granulometría.
- La segunda unidad hidrogeológica se caracteriza como acuífero semiconfinado conformado por depósitos de origen aluvial, separado del acuífero libre por una capa arcillosa de 1 a 57 m de espesor.
- La tercera unidad hidrogeológica es el acuífero de la dunita de Medellín cuyas propiedades hidrogeológicas son asociadas al fracturamiento y el comportamiento pseudokarst del macizo rocoso lo que permite acumulaciones de agua subterránea importantes; y su potencial hidrogeológico es considerado como bueno.

Las áreas de recarga en el Valle de Aburrá son condicionadas por las características geomorfológicas, los rasgos estructurales de la roca, el tipo de cobertura del suelo, la hidrografía, la precipitación y la geología. Según AMVA y UDEA (2013), EPM y UDEA (2014) y AMVA (2000) las áreas potenciales de recarga se clasifican:

- Recarga directa y distribuida por medio de infiltración en las superficies libres donde aflora el acuífero.
- Recarga por interacción hidráulica entre el río Medellín y sus afluentes y los cuerpos de agua subterránea
- Recarga proveniente de flujos regionales, asociado a porosidad secundaria de macizos rocosos cristalinos.

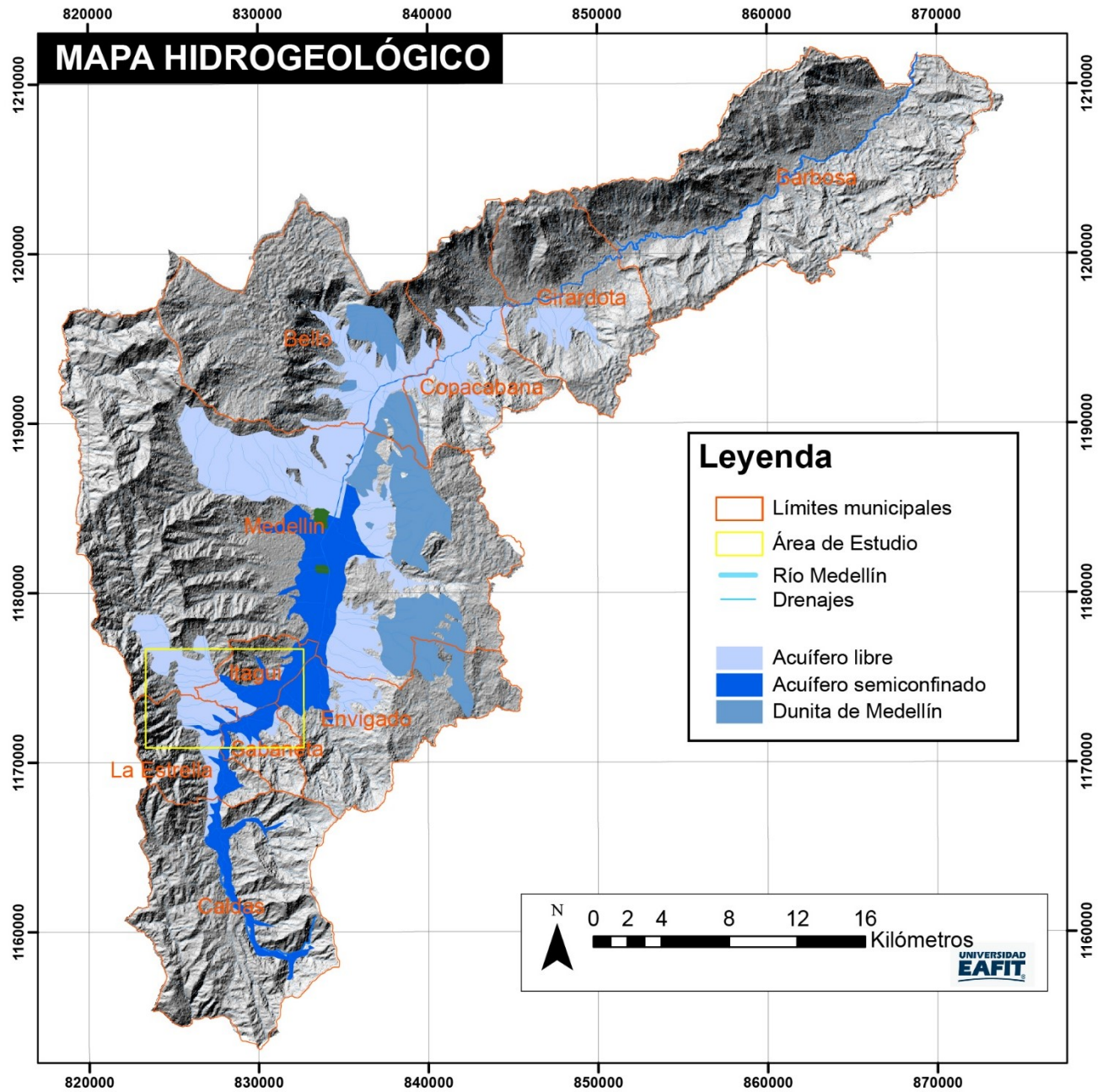


Figura 3. Mapa de unidades hidrogeológicas Valle de Aburrá. Modificado de AMVA y UdeA (2013)

## **4. Marco conceptual**

### **4.1 Modelo Geológico inicial (MGI)**

El modelo geológico inicial (MGI) es una representación esquemática en 2 o 3 dimensiones, que se desarrolla a partir de la síntesis de estudios hechos y resultados obtenidos previamente en una zona específica. Esto se hace con el fin de proporcionar una primera indicación a cerca de las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del área de interés. Su alcance y nivel de detalle dependerá de factores como: la cantidad y calidad de información disponible, la escala de los trabajos realizados, y el objetivo final del trabajo (hidrogeológica, geotecnia, etc). Este último también servirá como pauta en el tipo de modelo a desarrollar, nivel de detalle e información relevante (Gattinoni, 2014).

El desarrollo de un MGI busca identificar a partir de la información disponible: Materiales y procesos geológicos presentes, distribución espacial, estructuras y tectónica, geomorfología e hidrogeología en el subsuelo sobre el área de influencia seleccionada (Gattinoni, 2014). Siendo importante para la elección de métodos adecuados en el posterior aprovechamiento que se desee realizar según sea la condición en específico, además de ayudar en la cuantificación y estimación de unidades e identificar los sitios más críticos y/o de interés.

La construcción de un MGI comprende de 3 insumos principales. (Gattinoni, 2014):

1. Estudio y compilación de información geológica a escala requerida (1:10,000, 1:25,000, 1:5000) según la cartografía disponible, donde se resalten: Las orientaciones litológicas, aspectos estratigráficos, características tectónicas y geomecánicas (si así lo permite). Este estudio utiliza la cartografía geológica a escala 1:25,000 para el desarrollo del MGI.
2. Estudio geomorfológico de la zona, donde se identifiquen posibles factores erosivos, ambientales, topográficos e influencia de los ríos y los drenajes.
3. Evaluación más detallada de los aspectos relevantes, ej: influencia de la red de drenaje y acuíferos para estudios hidrogeológicos, variables climáticas, etc.

Sobre dichos estudios, se obtienen resultados técnicos como: mapas geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, perfiles y cortes transversales, con el fin de contrastar información y tomar de decisiones para posteriores procedimientos (Gattinoni, 2014).

### **4.2 Información geológica de la zona de estudio**

El subsuelo del Valle de Aburrá está compuesto principalmente de depósitos consolidados y no consolidados de flujos de escombros, depósitos aluviales y depósitos de flujos de lodo. Las formaciones superficiales de la zona suroccidental del acuífero libre están constituidas principalmente por movimientos en masa que cubren la ladera del Valle y se diferencian entre depósitos de flujos de escombros y depósitos de flujos de lodo. También es común la aparición de depósitos aluviales del Río Medellín, formando geoformas características de depósito aluvial, entre las cuales se presentan abanicos aluviales, terrazas aluviales y

depósitos torrenciales (CORANTIOQUIA y AMVA, 2002). Los depósitos aluviales y de flujos de escombros del Valle de Aburrá no presentan características estructurales asociadas a fallas y/o diaclasas. (AMVA y UdeA, 2012).

Las relaciones de los depósitos no consolidados con el basamento son netamente deposicionales y entre ellos mismos pueden aparecer escalonados, envolventes, lenticulares, intercalados y con digitaciones. Los depósitos de vertiente son producto de movimientos en masa en zonas de alta pendiente y su composición general es de bloques angulosos en matriz limo arenosa. Los depósitos aluviales son producto de los depósitos del río Medellín y se encuentran en las zonas más profundas del Valle de Aburrá con morfología suave a plana, su espesor es variable y su geometría está relacionada con la irregularidad topográfica del basamento rocoso del valle de Aburrá (CORANTIOQUIA y AMVA, 2002).

### 4.3 Modelo de física de rocas (MFR)

El MFR es una representación de las propiedades físicas de los materiales, los cuales varían dependiendo de las características geológicas, texturales, y la presencia de fluidos (Butler, 2005). El MFR permite establecer el puente entre las propiedades físicas de los materiales geológicos y la respuesta geofísica de estos (Figura 4).

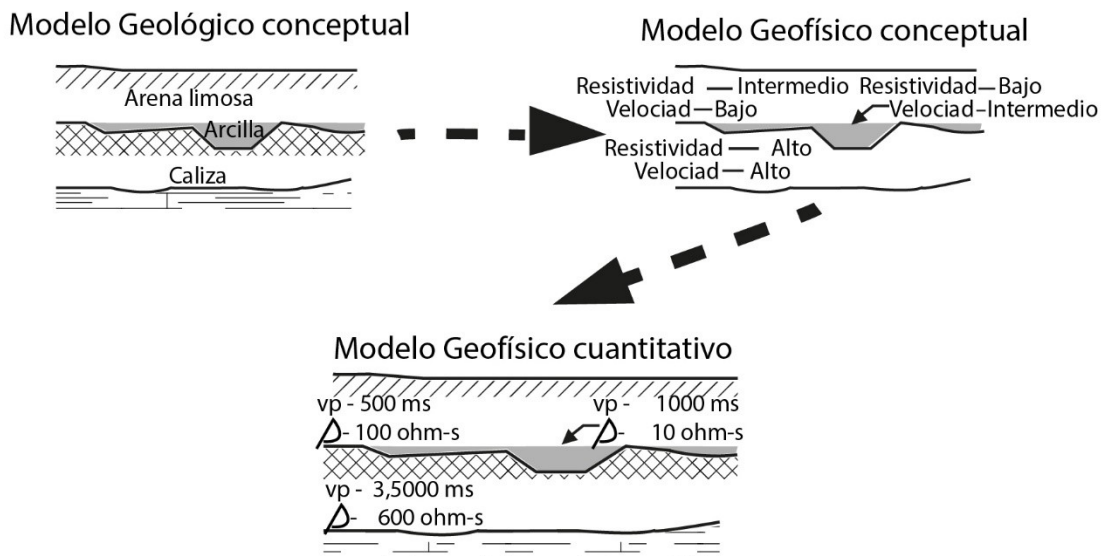


Figura 4 Ejemplo de la correlación entre el modelo geológico y el modelo de física de rocas. Tomado y modificado de Butler (2005).

El MFR se construye a partir de información geológica disponible y su correlación con la información geofísica. Para la construcción de un MFR, se debe tener en cuenta que la respuesta de los materiales geológicos a una propiedad física de interés, en este caso la resistividad, depende de cinco elementos (Butler, 2005):





El algoritmo de inversión *blocky* genera una malla de elementos finitos, cada elemento rectangular se divide en 4 triángulos y la resistividad de cada triángulo se define bajo la extensión del electrodo dependiendo de las propiedades que componen el modelo. Este método asume que el subsuelo consta de unas regiones homogéneas con una interfaz definida entre ellas, es decir, es muy útil para determinar la ubicación de los límites entre unidades litológicas diferentes y las resistividades de estas (Olayinca et al., 2000).

Otro algoritmo de inversión disponible en el software RES2DINV es el de restricción robusta (*robust constrain*), el cual consiste en producir modelos con límites definidos entre diferentes capas del subsuelo con diferentes valores de resistividad, pero dentro de cada capa debe haber valores de resistividad constantes. Al utilizar esta técnica se debe establecer un valor de factor de corte, que será el valor que reducirá las diferencias entre los valores de resistividad aparente y los calculados. Este método genera buenos resultados para modelos donde haya contrastes significativos en los valores de resistividad de las capas subsuperficiales; y así brinda una buena resolución de límites (Kola et al., 2013).



## 5. Métodos y datos

La metodología utilizada para el desarrollo de este estudio se basa en primera instancia en la recopilación bibliográfica de información geológica directa (perforaciones) e indirecta (tomografías eléctricas) de la zona de estudio. Dicha información es analizada y, en algunos casos, procesada para la realización de un modelo geológico inicial (MGI) y de física de rocas (MFR) ( Figura 7). Después de realizados el MGI y el MFR se procede a la implementación de estos en el procesamiento e interpretación de las TER seleccionadas.

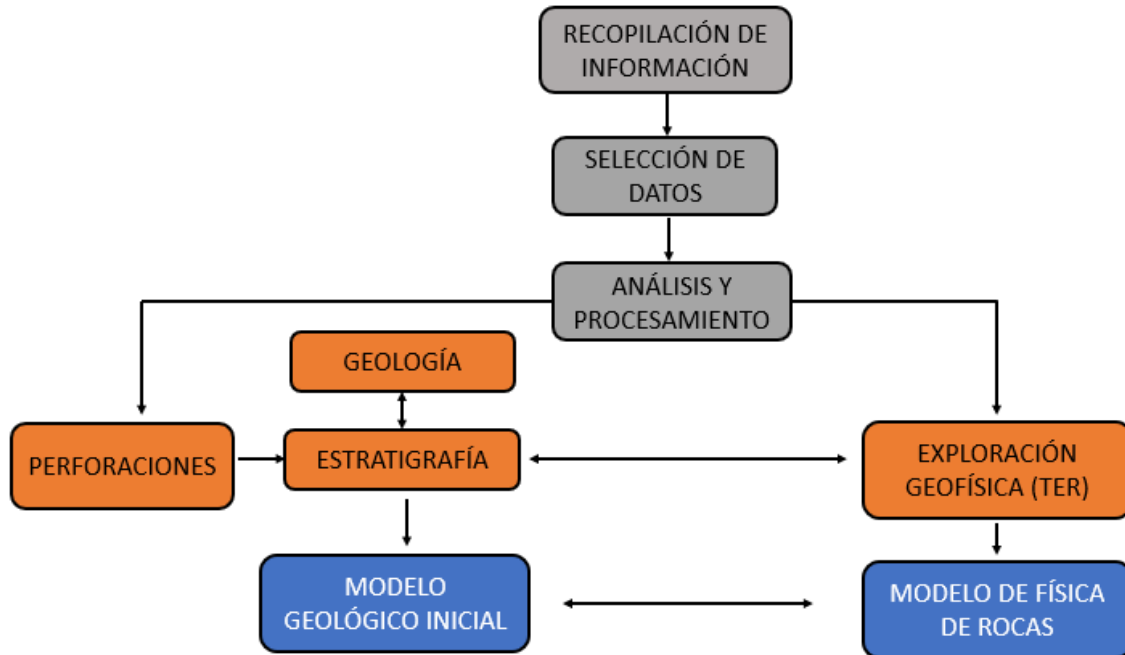


Figura 7. Esquema metodológico general del proyecto de grado. Elaboración propia

La información utilizada en el proyecto de grado fue extraída en su totalidad de los estudios anteriores del Valle de Aburrá: CORANTIOQUIA Y AMVA (2002), microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (2002) microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (2007), AMVA et al., (2012), AMVA y UdeA (2013), y EPM y UdeA (2014). Los cuales cuentan con información geológica (litologías, geomorfología e hidrogeología) y geofísica (TER, SEV, refracción sísmica). Después de identificar y analizar dicha información se procede a la elección del acuífero libre en la zona suroccidental del Valle de Aburrá con el objetivo de mejorar la caracterización geológica e hidrogeológica de los depósitos no consolidados en dicha zona. Esto a partir de la creación de un MGI y MFR, para la elaboración de estos modelos se utilizó información geológica relacionada con perforaciones y cartografía e información geofísica asociada a TER.

El primer paso para la realización del MGI es la digitalización de las perforaciones y su respectiva columna estratigráfica, seguido por la realización de cortes geológicos con base en la cartografía geológica previa de acu (1984) y CORANTIOQUIA Y AMVA (2018). Mientras

que el modelo de física rocas, se inicia a partir del inventario y análisis de la información geoelectrica de estudios previos AMVA (2002), AMVA y UdeA (2013) y EPM y UdeA (2014), con los cuales se obtienen los rangos de resistividad esperados para las diferentes unidades litológicas de la zona de estudio, los cuales luego son utilizados para el procesamiento e interpretación de las tomografías eléctricas verticales. Las columnas estratigráficas se digitalizaron en el software de uso libre SEDLog, mientras que el procesamiento de las tomografías eléctricas se realiza en el software RES2DINV (Figura 9)

La información geológica seleccionada para la realización del MGI en la zona de estudio se compone de 1 perforación de Microzonificación sísmica (2002), 3 perforaciones de Microzonificación sísmica (2007) y 2 de EPM y UdeA (2014). La información geofísica utilizada para la realización del MFR consta de 5 tomografías del estudio AMVA y UdeA (2013) las cuales fueron procesadas e interpretadas y 2 tomografías de EPM y UdeA (2014) las cuales solo fue posible utilizarlas como información bibliográfica por la falta de datos de campo.

La correlación de estos modelos ayuda a determinar e identificar el estado de los materiales a través de sus características cualitativas y cuantitativas (Butler, 2005). Esto es clave para la caracterización de las unidades litológicas y sus características hidrogeológicas.

### **5.1 Datos seleccionados**

La base de datos recopilada de los estudios sirve como insumo para la delimitación del área de estudio. Dicha área de estudio fue seleccionada para la caracterización detallada de las unidades litológicas en el acuífero libre de la zona sur occidental del Valle de Aburrá, esta caracterización se lleva a cabo mediante la definición del MGI y MFR

Los datos seleccionados se encuentran ubicados geográficamente entre el corregimiento de Medellín: San Antonio de Prado, y los municipios de: La Estrella, Itagüí, Envigado (Figura 8). La descripción de cada uno de estos datos se encuentra en el **Anexo 2. Descripción de datos seleccionados.**

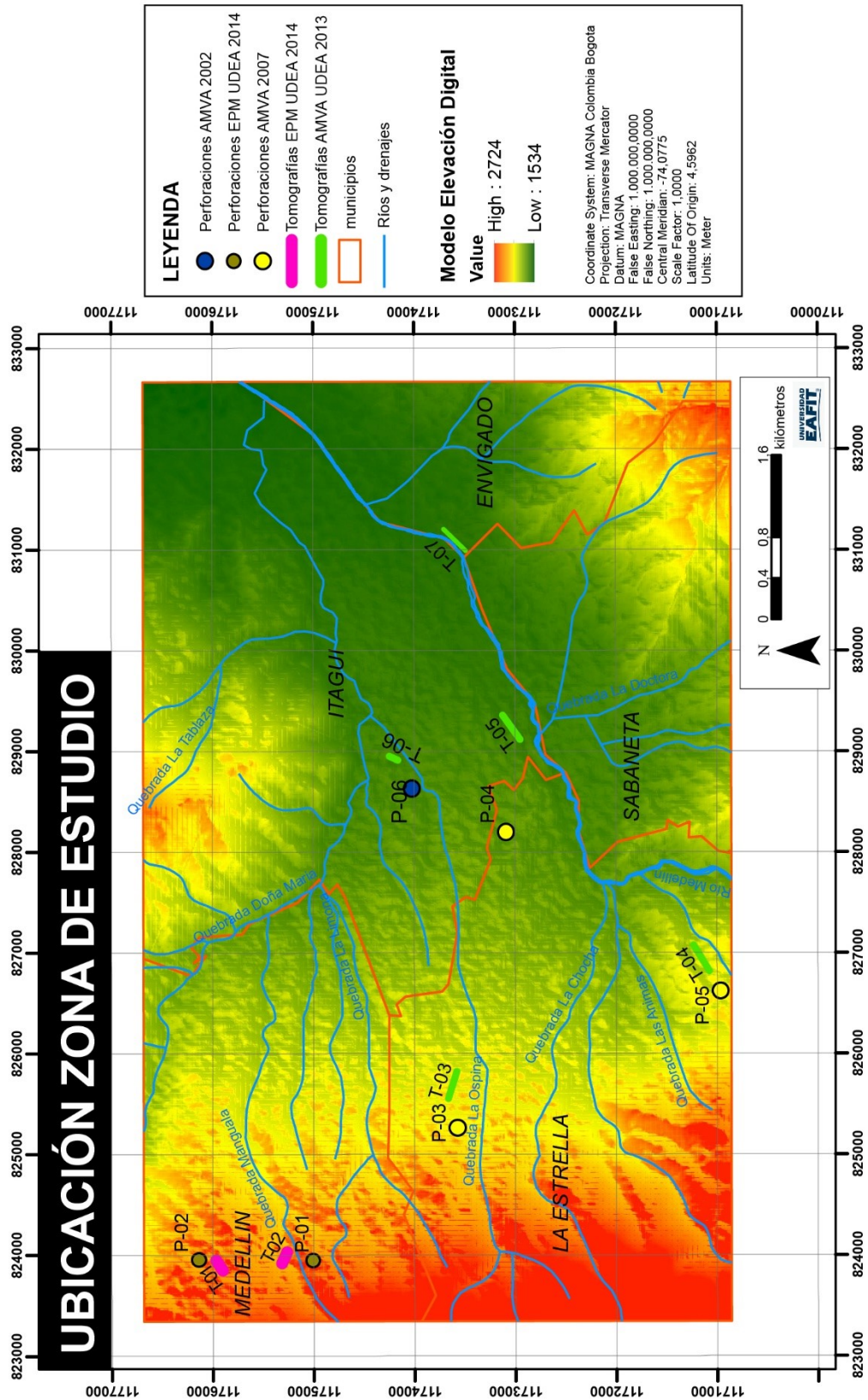


Figura 8. Mapa de localización de datos seleccionados (perforaciones y TER). Elaboración propia

La definición del MGI y de MFR se realiza a partir de los siguientes datos que se muestran en la Tabla 1. Las características: longitud, arreglo y profundidad, de cada una de las tomografías eléctricas se encuentran en el **Anexo 2. Descripción de datos seleccionados.**

Tabla 1. Datos seleccionados para la definición del MGI y MFR.

Método	Estudio	Año	Ubicación	Localización de referencia	Nomenclatura proyecto
Perforación	EPM UDEA	2014	San Antonio de Prado	Finca los Torcorama	p-01
Perforación	EPM UDEA	2014	San Antonio de Prado	Finca los Manantiales	p-02
Perforación	AMVA	2007	La Estrella	Escuela de Policías Carlos E. Restrepo	p-03
Perforación	AMVA	2007	La Estrella	Glorieta Suramérica	p-04
Perforación	AMVA	2007	La Estrella	Sector la Tablaza	p-05
Perforación	AMVA	2002	Itagüí	Hogar de los recuerdos – actualmente Hospital del Sur Gabriel Jaramillo Piedrahita Sede San Pío	p-06
Tomografía	EPM UDEA	2014	San Antonio de Prado	Finca los Torcorama	T-01
Tomografía	EPM UDEA	2014	San Antonio de Prado	Finca Al Sur de La Virgen	T-02
Tomografía	AMVA UdeA	2013	La Estrella	Finca La Teresita	T-03
Tomografía	AMVA UdeA	2013	La Estrella	Finca La Esther	T-04
Tomografía	AMVA UdeA	2013	Itagüí	Jardines de Montesacro	T-05
Tomografía	AMVA UdeA	2013	Itagüí	Hogar Xundabe	T-06
Tomografía	AMVA UdeA	2013	Envigado	Separador Centro Comercial Mayorca	T-07

## 5.2 Evaluación geofísica de la zona de estudio.

La compilación de la información geofísica consta del análisis de tablas de rangos de valores de resistividad y sus respectivos materiales, además de la aplicación del método estadístico de diagramas de caja en las distribuciones de resistividad de cada una de las tomografías. Estas tablas de resistividad recopiladas y los diagramas de caja son la base principal para la creación de la tabla de rangos de valores de resistividad del proyecto, la cual es la base principal del MFR (Tabla 4 y Tabla 5).

Otra de las fuentes de información geofísica es el pozo “Matadero” de Envigado perteneciente al estudio de CORANTIOQUIA y AMVA, (2002). Este pozo contiene información geofísica directa obtenida mediante registro de pozo con sondas de resistividad normal y lateral. La información encontrada allí consta de capas o láminas de arcilla con resistividades de 35 ohmios-metro y arenas saturadas con valores de 90 - 150 ohmio-metro. Aunque la información geofísica disponible de dicho pozo es netamente granulométrica, esta se correlaciono con las unidades litológicas presentes en la zona de estudio con base en la granulometría característica de cada litología.

El estudio CORANTIOQUIA y AMVA, (2002) restringe la información de registros de pozo con resistividad normal y sólo es posible utilizar el pozo “Matadero” como un insumo para la realización de la tabla de rangos de resistividad propuesta para el proyecto. Otra herramienta utilizada en la realización de la tabla de rangos de resistividad es la recopilación de los rangos de resistividad utilizados en los estudios AMVA (2002), AMVA y UdeA (2013) y EPM y UdeA (2014) para la zona de estudio.

Los diagramas de caja brindan información numérica de los intervalos mínimos, máximos y de los cuartiles de una serie de datos. Estos diagramas se realizan para cada una de las tomografías seleccionadas con el objetivo de analizar estadísticamente la distribución de resistividades en la parte baja y media de la ladera suroccidental de la zona de estudio, además de las respectivas profundidades 0-20m, 20-40m y 40-60 metros para cada tomografía. Estos diagramas de caja sirvieron para realizar el filtrado de datos en la inversión geofísico debido a que brindaron información acerca de los valores anómalos de resistividad en cada una de las tomografías, además de su aporte para la realización de la tabla de rangos de resistividad. Ver **Anexo 4. Diagramas de caja. Método estadístico**

Tabla 2. Tabla de compilación de rangos de resistividad estudios AMVA (2002), AMVA y UdeA (2013) y EPM y UdeA (2014). Elaboración propia.

Código de Tomografía	AMVA, 2002 (SEV)		AMVA Y UDEA, 2013		EPM Y UDEA, 2014	
Nomenclatura propuesta	Capa	Rango de Resistividad (ohm-m)	Capa	Rango de Resistividad (ohm-m)	Capa	Rango de Resistividad (ohm-m)
T-01					Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos secos	140-483

Código de Tomografía	AMVA, 2002 (SEV)	AMVA Y UDEA, 2013	EPM Y UDEA, 2014
			Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos saturados con agua dulce. 55-103
T-02			Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos secos 103-180 Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos saturados con agua dulce 32-103 Miembro Volcánico 129-200
T-03		Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos secos 18-798 Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos saturados <2	
T-04		Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos secos 121-805 Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos saturados 10-121	
T-05	Limos saturados 20-100 Arenas 70-90 Gravas saturadas 90-150 Arcillas parcialmente saturadas 20-60	Depósitos de Flujos de Escombros y/o lodos secos 42-943 Roca metamórfica 4-20	
T-06		Depósitos aluviales torrenciales secos 121-303 Depósitos aluviales torrenciales saturados 35-89	
T-07	Limos saturados 20-100 Arenas 70-90 Gravas saturadas 90-150 Arcillas parcialmente saturadas 20-60	Depósitos aluviales secos 12-150 Depósitos aluviales saturados 33-119 Depósitos aluviales 12-24	

### 5.3 Inversión de tomografías eléctricas

Los métodos de inversión utilizados para la obtención de imágenes 2D del terreno fueron seleccionados con base en las sugerencias del geotomo del software RES2DINV Loke (2010) y el MGI de la zona de estudio.

Se utilizaron diferentes algoritmos y parámetros de inversión en el software RES2DINV entre los cuales están el *robust inversion*, el *smoothness constrained least squares*, *reduce effect of side blocks*, *damping factor* y *flatness filter radio* (ver Figura 9). Con base en los diferentes modelos de inversión obtenidos durante dichas parametrizaciones se procede a escoger aquellos valores que mejor representen el MGI en cada una de las tomografías eléctricas que permitieron su procesamiento (T-03, T-04, T-05, T-06 y T-07).

Dichos métodos o algoritmos fueron descritos en la sección 4.4 Métodos de inversión, y son utilizados para el procesamiento y la inversión de los datos de resistividad aparente en las tomografías eléctricas obtenidas mediante la base de datos del estudio AMVA y UDEA (2013).

El proceso de inversión genera modelos del subsuelo que pueden considerarse una solución válida o real de las propiedades geológicas del subsuelo; sin embargo, el modelo proporcionado no da una solución única; la persona encargada de procesar el modelo de inversión puede generar múltiples soluciones hasta tratar de ajustarlo a la realidad. Para esto es conveniente establecer un MGI como guía para el procesamiento e interpretación del modelo de inversión. La precisión de los resultados depende en gran medida de si el subsuelo presente concuerda o no con estos supuestos (Tapias et al., 2005).

El MGI sirvió como base para definir diferentes capas litológicas, su respectivo espesor y grado de saturación mediante los cambios en los valores de resistividad de cada uno de los modelos de inversión de las TER. El procedimiento utilizado para la correlación de MGI con las TER se realizó mediante la ubicación espacial de las TER en los cortes geológicos y las columnas estratigráficas.

Los parámetros de inversión utilizados en el procesamiento de las tomografías eléctricas seleccionadas se mencionan en la Figura 9. En ésta se puede observar un flujograma con las opciones seleccionadas del software RES2DINV y sus respectivos valores asignados dependiendo de las anomalías eléctricas identificadas en cada tomografía eléctrica procesada (T-03, T-04, T-05, T-06 y T-07).

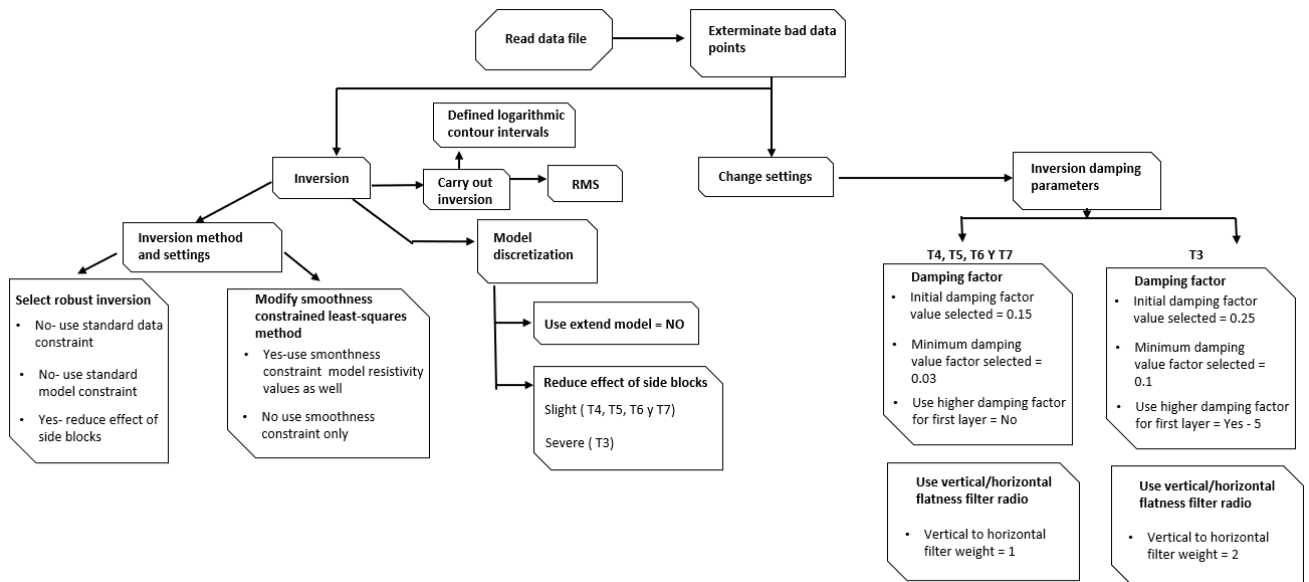


Figura 9. Esquema metodológico de inversión utilizado en las TER procesadas para la zona de estudio.  
Elaboración propia

Es importante tener en cuenta los valores atípicos, es decir, el ruido originado por fuentes no aleatorias, como errores o problemas del equipo. Estos son apreciables en la mayoría de las adquisiciones geofísicas y por lo tanto es necesario tenerlos en cuenta y eliminarlos para disminuir errores en la inversión, dichos valores podrían generar grandes cambios en los modelos de inversión resultantes (Kola et al., 2013). Cabe anotar que cada tomografía eléctrica se filtró con base al análisis de los datos de campo (resistividades aparentes), suprimiendo valores atípicos para cada una de forma independiente.

El proceso de inversión adopta como criterio de convergencia, el valor del error cuadrático medio (RMS) entre los datos de campo y la respuesta del modelo de inversión después de cada iteración. Si el valor del RMS o su disminución relativa se sitúa por debajo de un valor predefinido, esto significa que la inversión ha convergido, es decir, la iteración se detiene y el proceso se considera terminado. (Tapias et al., 2005). Aunque se dice que si el error RMS está por debajo del 10% es una buena indicación del modelo del subsuelo; los resultados demuestran que obtener un bajo error RMS no es necesariamente una buena indicación de que el modelo se ajuste a la realidad.

Otro factor importante en la inversión es el *damping factor*, el cual es un valor utilizado para normalizar la cantidad de ruido y contaminación que se presente en los modelos de inversión, este a su vez permite utilizar el valor de amortiguación para la primera capa. (Gunter, 2005). Este factor fue utilizado en el procesamiento de los modelos de inversión de las TER debido a que permite restringir las soluciones posibles, dándole estabilidad a la inversión geofísica.



## 6. Resultados

### 6.1 Compilación de la información

Se recopiló información geológica y geofísica para la generación de una base de datos, a partir de los estudios: microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (2002) microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (2007), AMVA et al., (2012), AMVA y UdeA (2013), EPM y UdeA (2014). **(Anexo 1. Compilación de la información)** (Tabla 3)

La compilación de dicha información permite identificar vacíos asociados a la construcción de MGI y MFR; los cuales si son implementados en la generación de los modelos de inversión de las tomografías eléctricas disminuye la incertidumbre en la interpretación y mejora la parametrización durante la inversión geofísica.

La importancia de la implementación de un MGI y tras el análisis de las interpretaciones de las TER existentes, se logra identificar que algunas unidades litológicas no concuerdan con la cartografía geológica del CORANTIOQUIA Y AMVA (2018) a escala 1:25,000. Uno de los principales problemas es la aparición del basamento en algunas TER en zonas donde no hay información geológica directa disponible. Otro problema encontrado es la caracterización de diferentes unidades litológicas en zonas donde según el MGI, sigue siendo la misma unidad litológica, pero esta puede presentar variaciones texturales y/o presencia de fluidos dando comportamientos geoeléctricos diferentes en la misma unidad.

También cabe resaltar la falta de información asociada al procesamiento de inversiones de TER debido a que no se presentan los parámetros de inversión usados en cada modelo. Además, la falta de datos de campo en algunas TER dificulta la reinterpretación y no permite un reprocesamiento de los datos para este estudio.

Tabla 3. Tabla resumen información geológica y geofísica del Valle de Aburrá

Nombre de Estudio	Autor	Año	SEV	Tomografía	Refracción Sísmica	Perforaciones	Alcance del proyecto
Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones. Informe Interno. Medellín.	AMVA	2002	0	0	0	14	Delimitaciones de unidades de riesgo en el Valle de Aburrá
Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado	AMVA	2007				36	Delimitaciones de unidades de los municipios Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.

Nombre de Estudio	Autor	Año	SEV	Tomografía	Refracción Sísmica	Perforaciones	Alcance del proyecto
Estudio de geología aplicada, geotecnia y sismología aplicada (planta de tratamiento de aguas residuales Bello)	EPM	2007			7	43	Correlacionar los parámetros geomecánicos estáticos y evaluar la resistividad de los materiales del subsuelo
Determinación y Protección de las Potenciales Zonas de Recarga en el Norte del Valle de Aburrá. Medellín, Antioquia Área Metropolitana del Valle de Aburrá	AMVA y UdeA	2012		20			Delimitación unidades hidrogeológicas zona norte del VA
Determinación y protección de zonas de recarga en el centro y sur del VA	AMVA y UdeA	2013	85	17		36	Delimitación unidades hidrogeológicas zona centro del VA
Disponibilidad del recurso hídrico subterráneo para el abastecimiento	EPM y UdeA	2014		47	5	7	Exploración y caracterización del potencial hidrogeológico en sectores específicos del Valle de Aburrá

## 6.2 Modelo Geológico inicial (MGI).

Para la creación del MGI se necesitaron modelos conceptuales de los materiales del subsuelo para la parte baja, media y alta de la ladera suroccidental en la zona de estudio. Estos modelos conceptuales son realizados mediante la información geológica disponible de las perforaciones y la cartografía geológica. Cada modelo conceptual representa esquemáticamente los materiales que se esperarían encontrar en el subsuelo y si estos presentan fluidos.

### 6.2.1. Modelo conceptual parte baja de la ladera

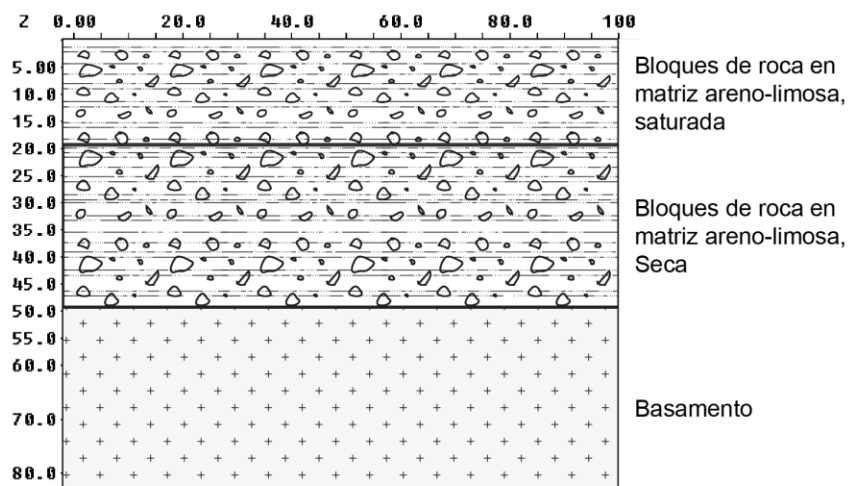


Figura 10. Modelo conceptual parte baja de la ladera

### 6.2.2. Modelo conceptual parte media de la ladera

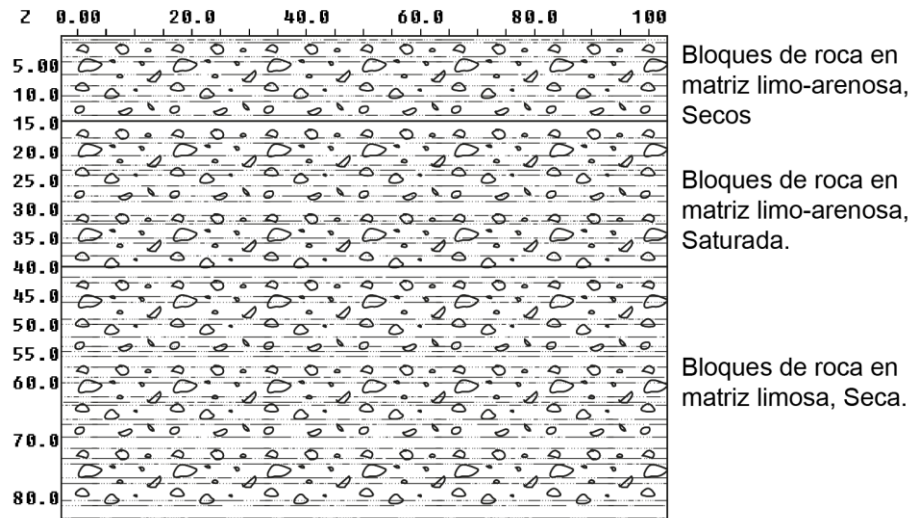


Figura 11. Modelo conceptual parte media de la ladera

### 6.2.3. Modelo conceptual parte alta de la ladera

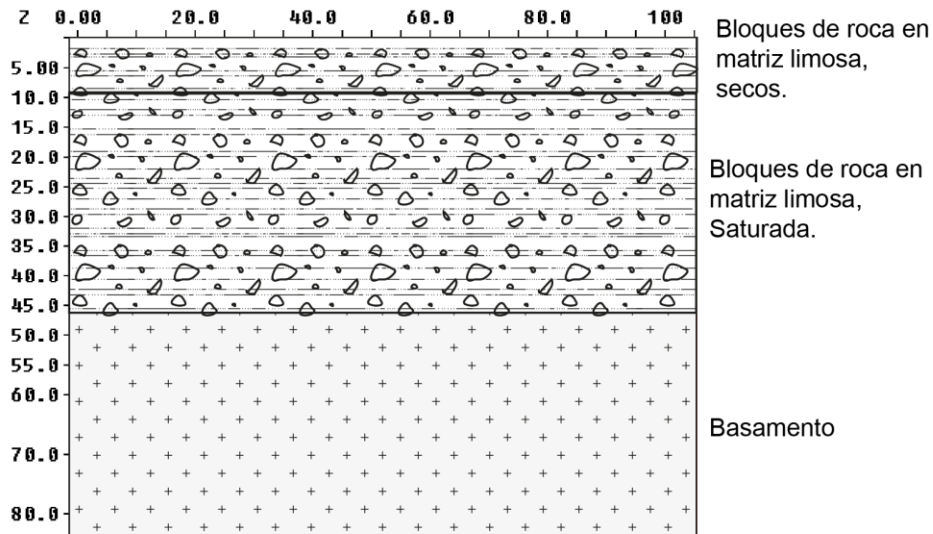


Figura 12. Modelo conceptual parte alta de la ladera

Con la información cartográfica del CORANTIOQUIA Y AMVA (2018) y la información geológica directa (perforaciones), se generó un MGI el cual se representa mediante los 4 cortes mostrados a continuación (Figura 13). La información geológica directa (perforaciones y sus respectivas columnas estratigráficas) es utilizada principalmente como insumo para la realización del MGI. Por lo tanto, la correlación con las TER se realiza mediante el MGI y no con las perforaciones, esto debido a que la distancia entre TER y perforaciones no permite la correlación directa.

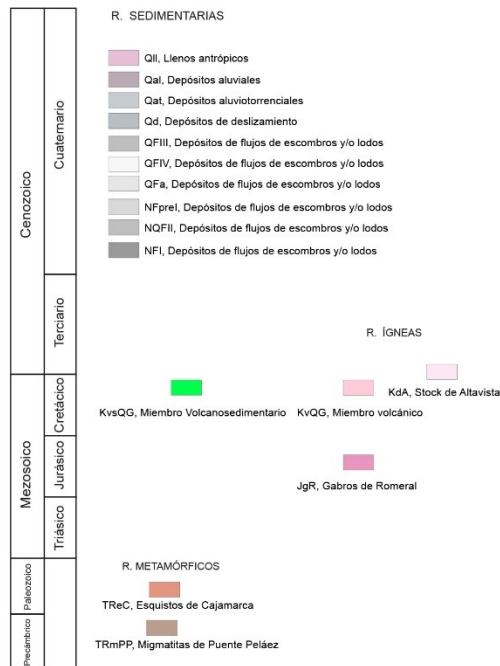
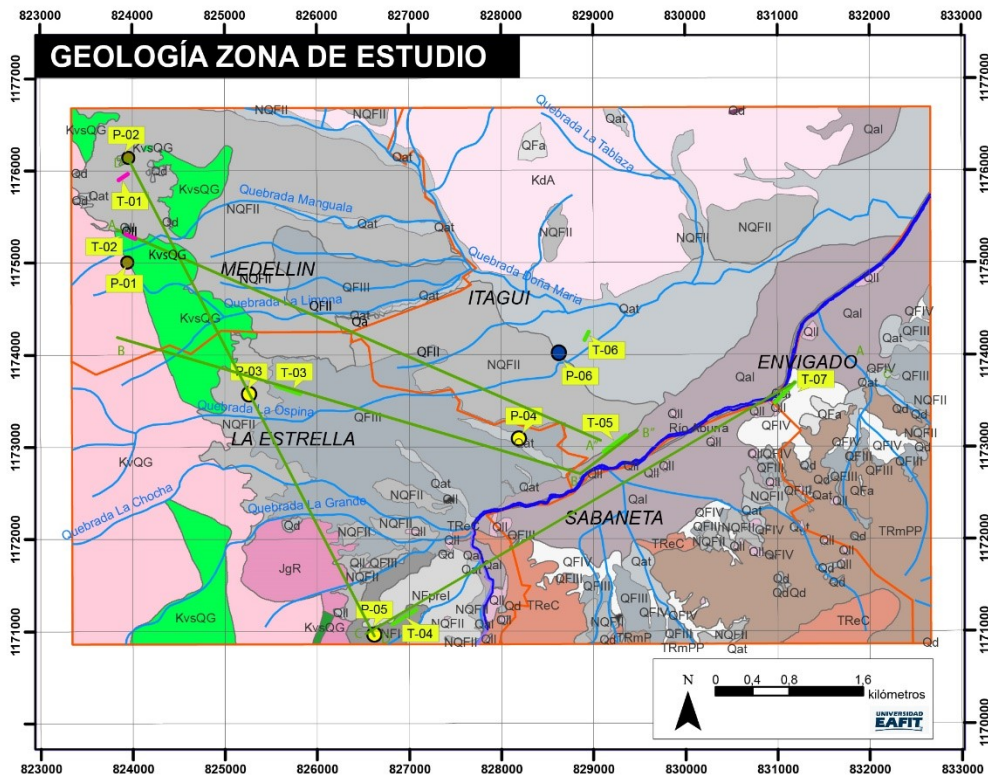


Figura 13. Cortes geológicos de la zona de estudio. Elaboración propia tomado de CORANTIOQUIA Y AMVA (2018)

Los cortes se realizan paralelos a las direcciones de las tomografías con el objetivo de poder correlacionar los modelos de inversión con el modelo geológico inicial. Se realizan 4 cortes geológicos de longitudes entre 5 hasta 8 kilómetros, su extensión se debe a la separación entre perforaciones existentes, las cuales son base para la correlación entre información geológica directa e información geofísica. Dichos cortes se realizan de manera esquemática para representar la ubicación espacial de las unidades litológicas someras en la zona de estudio. La profundidad máxima alcanzada por las perforaciones y las tomografías seleccionadas es de 100 metros, motivo por el cual no se obtiene información detallada del basamento.

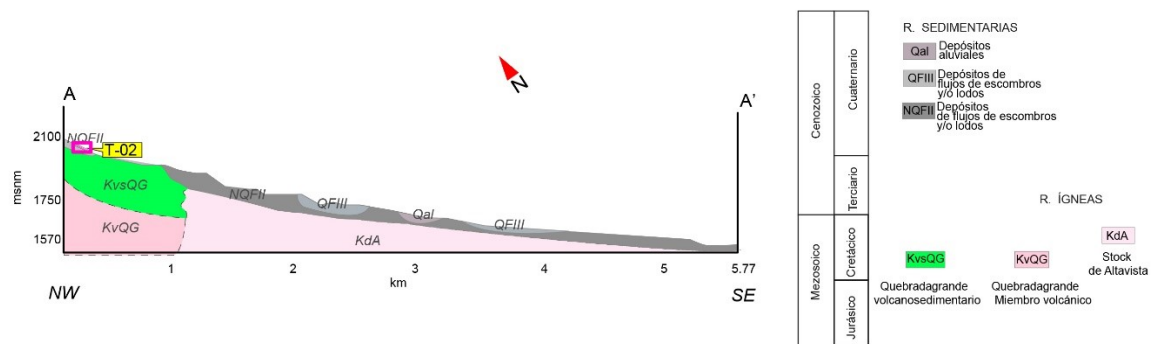


Figura 14. Corte A - A' de la zona de estudio

Corte A-A': En este corte (Figura 14) se pueden apreciar dos zonas de deposición en la ladera con diferencias muy marcadas, zona centro y parte baja de la ladera (Sureste del corte), y zona superior (NW del corte). La primera zona, la zona sureste del corte, se observan dos capas de depósitos: (Qat) asociada a depósitos aluviotorrenciales, extendidos desde la parte media hasta la parte baja del Valle, y sobre este, en la zona baja, los depósitos aluviales (Qal) asociados a la dinámica del Río Medellín. La segunda zona, hacia la zona noroccidental de la ladera, se observan otras capas de depósitos: NQFII como la más antigua en la parte inferior y depositada encima de esta, QFIII como la más reciente. Ambos depósitos asociados a depósitos de flujos de escombros y lodos. También es de acotar qué en la parte más alta del corte afloran secciones del miembro vulcano sedimentario de Formación Quebradagrande.

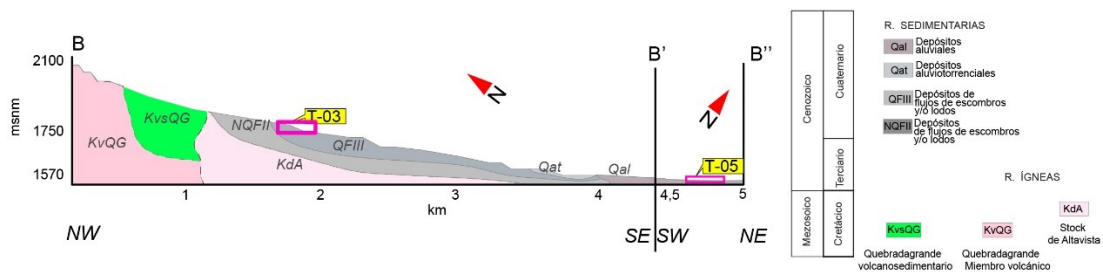


Figura 15. Corte B – B' - B'' de la zona de estudio

Corte B-B': En la Figura 15 se puede apreciar una extensa capa asociada a NQFII sobre toda la ladera, desde la parte media alta hacia la parte baja, y sobre esta, hacia la parte baja del Valle, los depósitos asociados al Río Medellín (Qal) y en la parte media, otra capa de QFIII. Se puede observar hacia el costado más noroccidental del corte, el afloramiento de la Formación Quebradagrande con sus dos miembros, El volcanosedimentario (KvsQG) y el miembro ígneo (KvQG). Hacia el costado derecho de la figura se agrega un perfil de 500 mts, en el cual se puede observar la geometría y la composición de la capa presente, asociada al depósito aluvial (Qal).

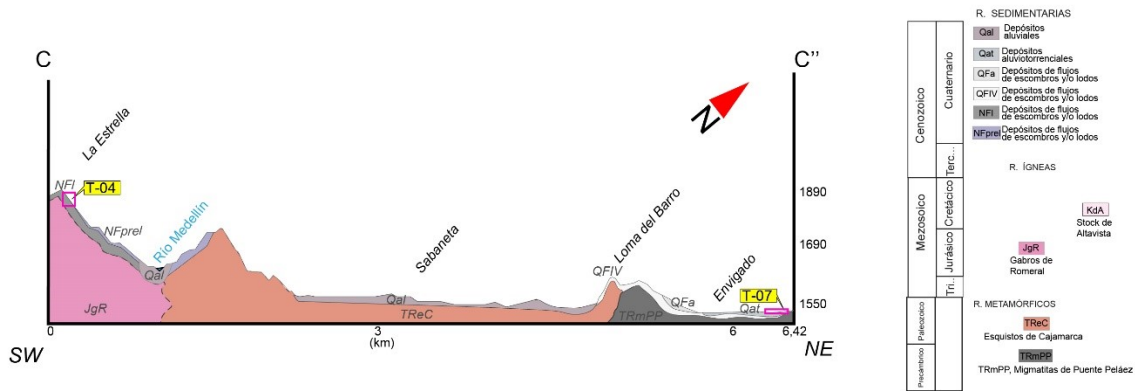


Figura 16. Corte C - C' de la zona de estudio

Corte C-C': Esta sección de la zona (Figura 16), abarca un trayecto muy similar al del Río Medellín, desde su nacimiento en el municipio de Caldas, hasta su paso por el municipio de Envigado. En la parte alta del nacimiento del río, se observa una zona de altas pendientes, sobre el relieve dos capas de depósitos: de manera más extensa y cubriendo el relieve la capa caracterizada como NFI y sobre esta, principalmente en la zona más cercana al sector de influencia del Río Medellín, los depósitos de NFPre, ambos depósitos se encuentran asociados a depósitos de flujos de lodos y escombros. Hacia la parte media a baja, a su paso por los municipios de Sabaneta y Envigado, se puede observar la capa QFIV, asociados a depósitos de flujo de escombros, como resultado de la dinámica erosiva de la ladera oriental del Valle que se extienden hasta el Río. Se identifica hacia la parte media del corte el contacto entre el depósito aluvial (Qal) y la unidad de rocas metamórficas de Esquistos de Cajamarca (TReC).



Figura 17. Corte D - D' de la zona de estudio

Corte D-D': Este corte (Figura 17) se realiza desde los límites del municipio de La Estrella y Caldas, y la parte alta de la ladera, en el corregimiento San Antonio de Prado, y aquí se observa la dinámica de las diferentes capas en toda la zona. Hacia el costado sur este, se observa una zona de relieve quebrado, y sobre toda esta topografía, los depósitos más antiguos del Valle NFI y NFPrel, y a lo largo de ladera, se puede apreciar una capa extensa del miembro sedimentario de la Formación Quebradagrande (KvsQG) y sobre este, en la parte central y alta del corte, dos depósitos NQFII y QFIII, asociados a depósitos de flujo de escombros y lodos.

### **6.3 Modelo de física de rocas (MFR)**

Los modelos sintéticos son aproximaciones de la realidad geológica del subsuelo en términos de la respuesta física de los materiales a la inyección de corriente. Dichos modelos se realizan en la parte baja, media y alta de la ladera suroccidental del Valle de Aburrá, con base en los modelos conceptuales de la sección Modelo Geológico inicial (MGI). Estos modelos conceptuales muestran representaciones esquemáticas del subsuelo, dando información acerca de que tipo de materiales se esperan encontrar en cada una de las zonas mencionadas.

Otro insumo importante para la realización de los modelos sintéticos es el análisis estadístico de las distribuciones de resistividad en la zona de estudio. Este análisis se realiza mediante la creación de diagramas de caja para cada una de las tomografías seleccionadas. Los diagramas de caja se realizan para diferentes profundidades en cada una de las tomografías, siendo en la mayoría de los casos dividido de esta manera, 0 a 20 m, de 20 a 40m y de 60 a 80m de profundidad. Esta división del subsuelo por profundidades es debido a que se analizan los valores de resistividad esperados en cada una de las profundidades mencionadas y con base a esto se puede predecir que valores de resistividad encontrar en el subsuelo de la zona de estudio.

Los diagramas de caja también brindan información importante para la discriminación de datos o valores de resistividad anómalos en cada una de las tomografías seleccionadas. Para el procesamiento de las tomografías eléctricas se filtraron los datos de resistividad según los resultados obtenidos por los diagramas de caja.

### 6.3.1 Modelo sintético parte baja de la ladera

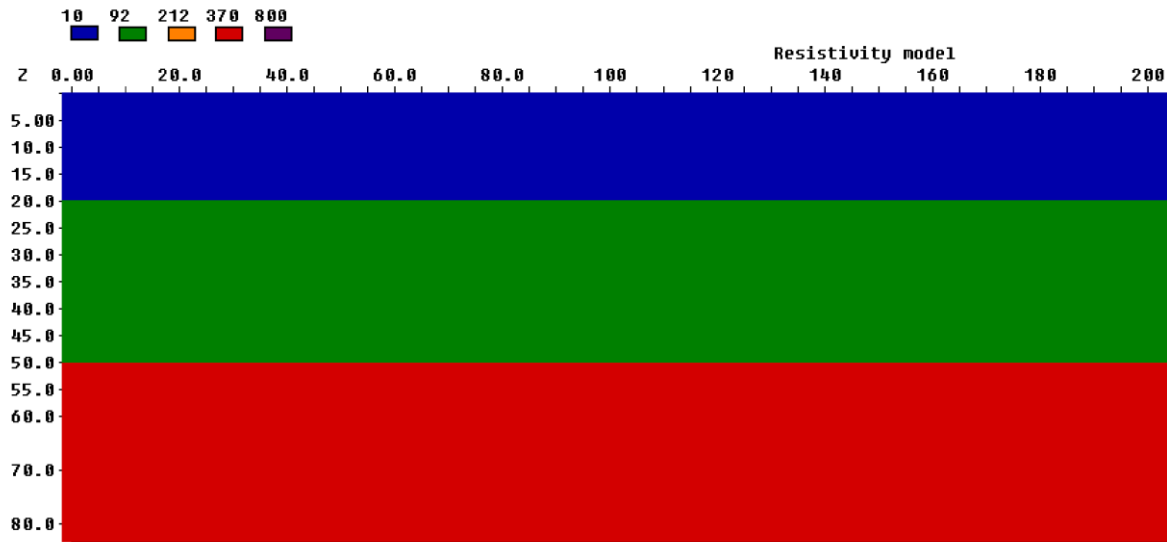


Figura 18. Modelo sintético parte baja de la ladera suroccidental

Este modelo (Figura 18) se divide en 3 niveles de resistividad esperada; teniendo el primer nivel de 0 a 20 metros de profundidad con resistividades esperadas de alrededor de 10 ohm.m, seguido por el segundo nivel de 20 a 50 m de profundidad con resistividades entre 90-120 ohm.m y por ultimo el tercer nivel de 50 a 80 m de profundidad con resistividades esperadas mayores a 370 ohm.m.

### 6.3.2 Modelo sintético parte media de la ladera



Figura 19. Modelo sintético parte media de la ladera suroccidental



El modelo sintético de la parte media de la ladera suroccidental (Figura 19) en la zona de estudio se describe en 3 niveles de resistividades esperadas. El primer nivel encontrado de 0 a 15 m de profundidad presenta resistividades esperadas alrededor de 200 a 230 ohm.m; seguido por el segundo nivel de 15 a 40 m de profundidad con resistividades entre 80 a 120 ohm.m y por ultimo el tercer nivel de 40 a 80 m de profundidad con resistividades esperadas alrededor de 150 ohm.m.

### 6.3.3 Modelo sintético parte alta de la ladera

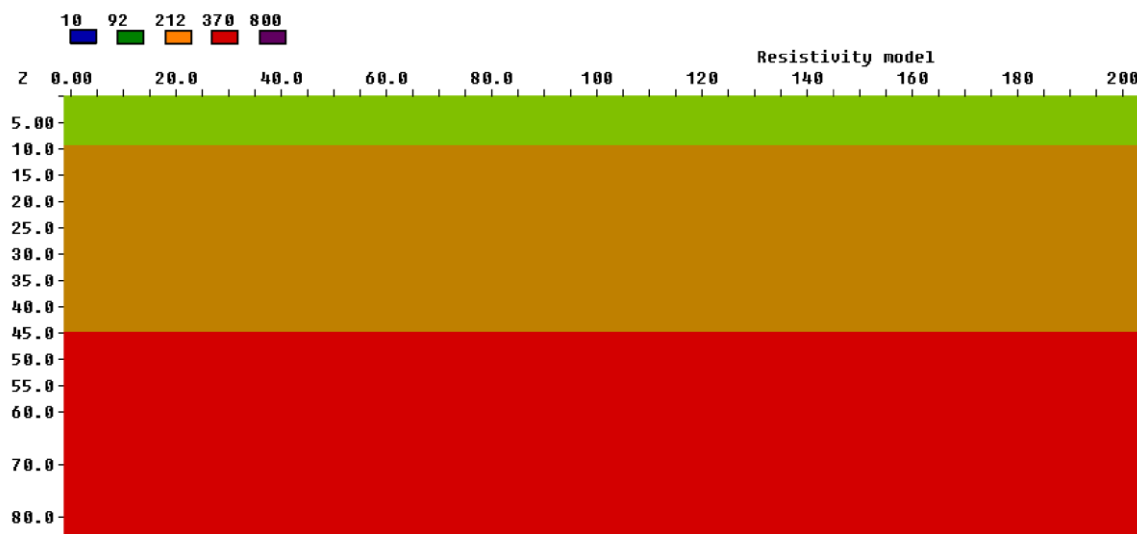


Figura 20 .Modelo sintético parte media de la ladera suroccidental

El modelo sintético de la parte alta de la ladera suroccidental (Figura 20) en la zona de estudio se describe en 3 niveles de resistividades esperadas. El primer nivel encontrado de 0 a 10 m de profundidad presenta resistividades esperadas alrededor de 90 a 120 ohm.m; seguido por el segundo nivel de 10 a 45 m de profundidad con resistividades entre 200 a 230 ohm.m y por último el tercer nivel de 45 a 80 m de profundidad con resistividades esperadas mayores a 370 ohm.m.

### 6.3.4 Rango de resistividad

Se utilizan los rangos de resistividades analizados mediante el método estadístico de diagramas de caja, el cual nos sirve como patrón fundamental para escoger los rangos de resistividad de la parte baja y media de la ladera suroccidental en la zona de estudio. Otro insumo utilizado para el análisis de estos rangos de resistividad y su respectivo material asociado son la recopilación de información geofísica obtenida por medio de los diferentes estudios locales los cuales caracterizan resistividades para las litologías y materiales geológicos presentes en la zona de estudio. Ver Tabla 4 y Tabla 5.

### Rangos de resistividad parte baja de la ladera

Tabla 4. Rangos de resistividad parte baja de la ladera

Rango de resistividad (Ohm.m)	Litología
8-112	Depósito aluvial = Fragmentos de roca (<50%) en matriz limo- arenosa saturados
112-210	Depósito aluvial = Fragmentos de roca (<50%) en matriz limo arenosa secos

### Rangos de resistividad parte media de la ladera

Tabla 5. Tabla generalizada rangos de resistividad para la zona de estudio. Elaboración propia

Rango de resistividad (Ohm.m)	Litología
5-120	Depósito aluvial = Fragmentos de roca (<50%) en matriz limo- arenosa saturados
50-250	Depósito aluvial = Fragmentos de roca (<50%) en matriz limo arenosa secos
30-150	Depósitos de flujos de escombros = Fragmentos de roca (>60%) en matriz limosa saturados
140-450	Depósitos de flujos de escombros = Fragmentos de roca (>60%) en matriz limosa secos
450-1000	Basamento

### 6.3.5 Correlación geología y geofísica

Luego de tener definido el MGI y MFR, se procede a procesar y reinterpretar algunas de las tomografías del estudio AMVA y UDEA (2013) (**Anexo 3. Procesamiento e interpretación TER**). La ubicación y las características de cada tomografía eléctrica se encuentran en el Anexo 2. Descripción de datos seleccionados. La correlación de las tomografías eléctricas con la información geológica directa disponible (columnas estratigráficas y cortes geológicos) genera los siguientes modelos de inversión presentados a continuación:

#### 6.3.5.1 Tomografía 1

En esta tomografía se realiza una nueva descripción con base en el MGI y el MFR debido a que no es posible hacer un reprocesamiento por la falta de datos de campo, por lo tanto, la siguiente interpretación es basada en el MGI y el MFR. En la Figura 21 se pueden observar 2 capas, una primera capa con un espesor aproximado de 10 metros, con materiales no consolidados secos, colores entre morados, rojos, amarillos y verdes, asociado a depósito de flujo de escombros (NQFII). Y una segunda capa de 20 a 25 metros con colores azules y materiales no consolidados, saturados. De igualmente se asocia a depósitos de flujo de escombros (NQFII).

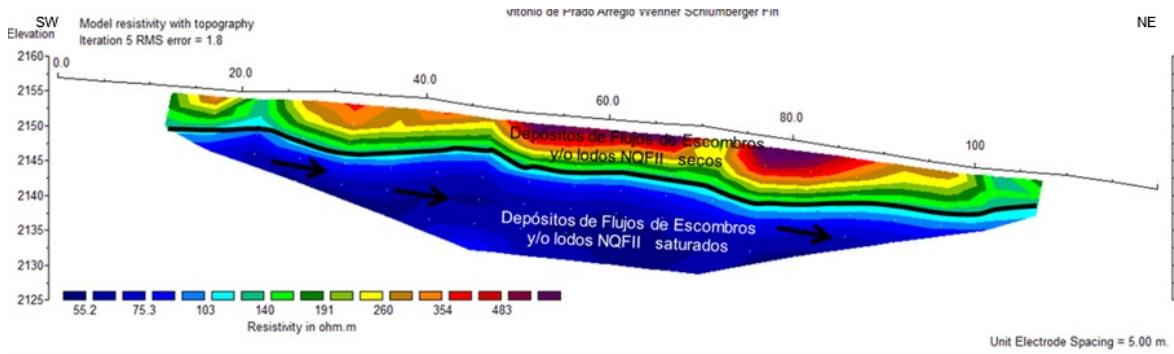


Figura 21. Modelo de inversión tomografía 1. Tomado de: AMVA y UdeA (2014)

### 6.3.5.2 Tomografía 2

En esta tomografía se realiza una nueva descripción con base en el MGI y el MFR debido a que no es posible realizar un reprocesamiento, por lo tanto, la siguiente interpretación es basada en el MGI y el MFR. En la Figura 22 se pueden observar 2 capas: una primera capa entre 5 a 10 metros aproximadamente, con materiales no consolidados secos, con colores entre el rojo, naranja verde y azules, asociado a depósitos de flujos de escombros y/o lodos secos (NQFII), y una segunda capa de 20 metros aproximadamente de espesor con colores azules, asociado a depósitos no consolidados y saturado (NQFII). Se observa un material con colores entre rojos, amarillos y verdes, en el parte inferior asociado al miembro volcanosedimentarios.

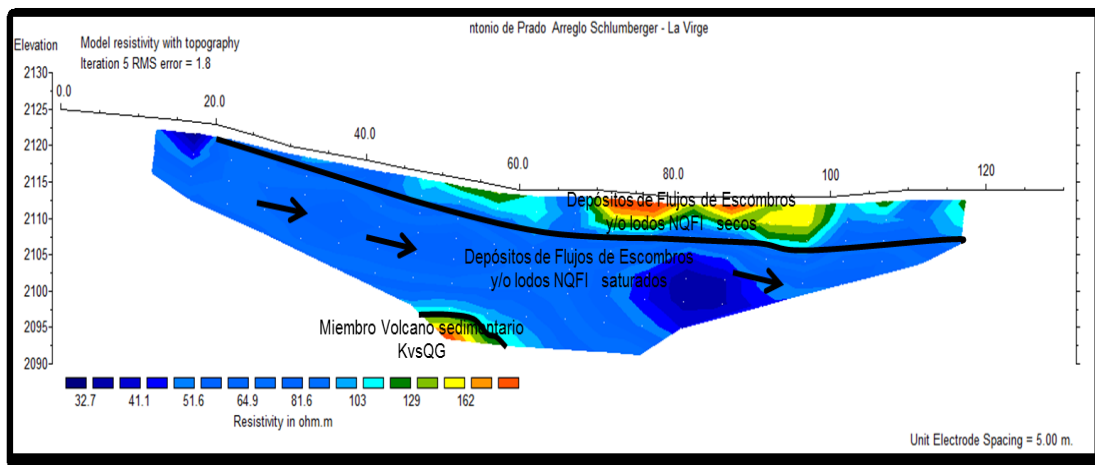


Figura 22. Modelo de inversión tomografía 2. Tomado de: AMVA y UdeA (2014)

### 6.3.5.3 Tomografía 3

En esta tomografía se realiza un reprocesamiento y una reinterpretación del modelo de inversión desarrollado para este trabajo, basados en el MGI y el MFR construido previamente La Figura 23 presenta un amplio rango de valores de resistividad dando una intercalación de colores en el modelo de inversión asociadas a diferentes unidades



15 a 45	18 a 798	Arcillas, limos y arenas parcialmente saturados con agua subterránea	QFIII Depósitos de Flujos de Escombros y lodos	10	160-500	Matriz Limosa, con bloques de 2 m, secos	Depósito de flujo de escombros (NQFII)
5 a 30	Menor de 2	Arenas, limos y arcillas saturados con agua salada	NQFII Depósitos de Flujos de Escombros y lodos	15	17-100	Bloque de rocas 1.5m, matriz limo arenosa parcialmente saturados a saturados	Depósito de flujo de escombros (NQFII)
				35	160-500	Bloque de rocas en matriz limo arenosa, secos	
				20	0-10	Bloque de rocas en matriz limo arenosa, saturados	

#### 6.3.5.4 Modelo conceptual de materiales TER-03

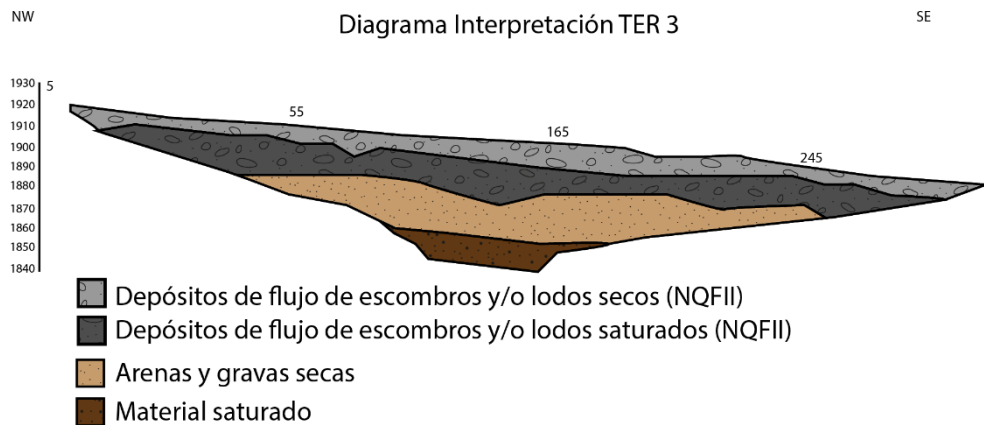


Figura 24. Modelo conceptual de materiales TER-03. Elaboración propia.

#### 6.3.5.5 Tomografía 4

En esta tomografía se realiza un reprocesamiento y una reinterpretación del modelo de inversión basados en el MGI y el MFR propuestos por el trabajo de grado La tomografía eléctrica 4 (Figura 25) se interpreta como dos capas, la primera capa con resistividades entre 11 y 600 ohm.m, espesor aproximado de 20m y colores rojos, naranjas, amarillo y morados asociados a materiales no consolidados secos de un depósito de flujo de escombros (NFPrel) y la segunda capa pertenece a depósitos de flujo de escombros no consolidados saturados

con colores azules de espesor aproximado de 60 metros y resistividades menores a 50 ohm.m (NFI).

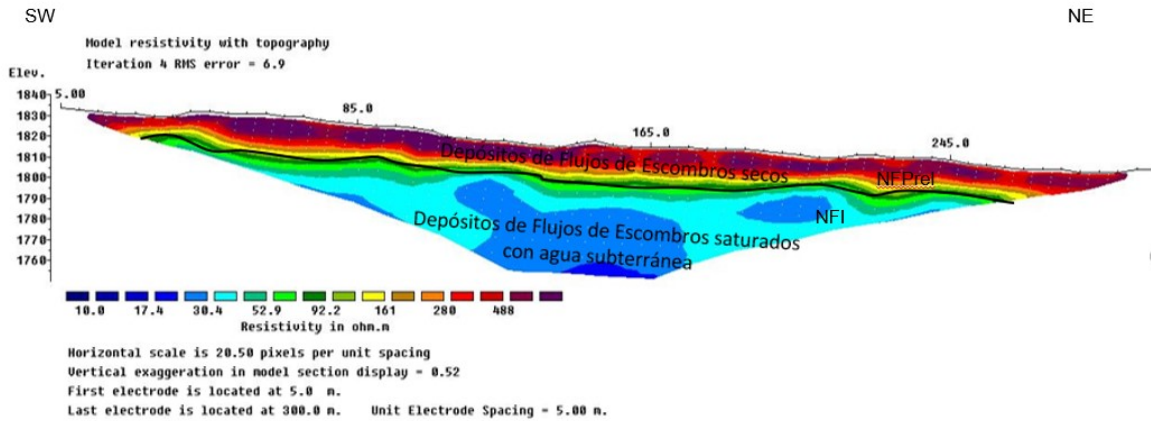


Figura 25. Modelo de inversión tomografía 4. Elaboración propia

La principal variación entre las interpretaciones del estudio AMVA y UdeA (2013) y la propuesta por el trabajo de grado se basa principalmente en la clasificación de las unidades litológicas de los primeros metros del modelo. Mientras que el estudio AMVA y UdeA (2013) clasifica la unidad litológica (NFI) depósitos de flujo de escombros y lodos en los primeros 10 a 20 metros, la interpretación propuesta por el estudio sugiere que la unidad litológica presente en los primeros 20 metros se asocia con (NFPrel) depósito de flujo de escombros y lodos (ver Tabla 7). Dichas diferencias son posibles mediante la aplicación del MGI, el cual brinda información acerca de la ubicación espacial de los depósitos de flujo de escombros y lodos (NFPrel).

Tabla 7. Tabla comparativa de interpretación tomografía 4, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013)

AMVA y UdeA, 2013 – Tomografía 1				Trabajo de grado – Tomografía 4			
Espesor (m)	Rango de resistividad (Ohm.m)	Materiales	Unidad litológica	Espesor (m)	Rango de resistividad (Ohm.m)	Materiales	Unidad litológica
10 a 20	121 a 805	Arcillas, limos y arenas secos	NFI Depósitos de Flujos de Escombros y lodos	20	160-500	Matriz Limosa, con bloques de 2 m, secos	Depósito de flujo de escombros (NFPrel)
40 a 50	10 a 121	Arenas, limos y arcillas saturados con agua subterránea	NFI Depósitos de Flujos de Escombros y lodos	60	17-100	Bloque de rocas 1.5m, matriz limo arenosa parcialmente saturados a saturados	Depósito de flujo de escombros (NFI)

### 6.3.5.6 Modelo conceptual de materiales TER-04

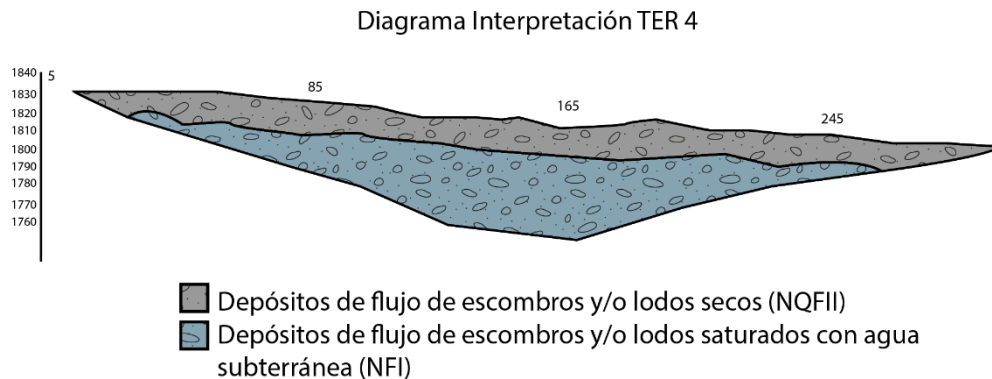


Figura 26. Modelo conceptual de materiales TER-04. Elaboración propia

### 6.3.5.7 Tomografía 5

En esta tomografía se realiza un reprocesamiento y una reinterpretación del modelo de inversión basados en el MGI y el MFR propuestos por el trabajo de grado. En la Figura 27 se observa una primera capa de aproximadamente 5 metros con una amplia gama de colores desde azules hasta rojos y resistividades desde 30 a 400 ohm.m, relacionada con materiales no consolidados secos a parcialmente saturados pertenecientes a un depósito aluvial (Qal), seguido de una segunda capa con un espesor aproximado de 35 metros, resistividades entre 70 y 280 ohm.m y colores naranja, amarillo, rojos y verdes, que obedece a materiales no consolidados secos a parcialmente saturados, asociado a depósitos de flujos de escombros (NQFII). Se identifica una tercera capa, con un espesor aproximado de 15 metros, con colores azules y resistividades menores a 40 ohm.m asociados materiales saturados pertenecientes a depósitos aluviales (Qal)

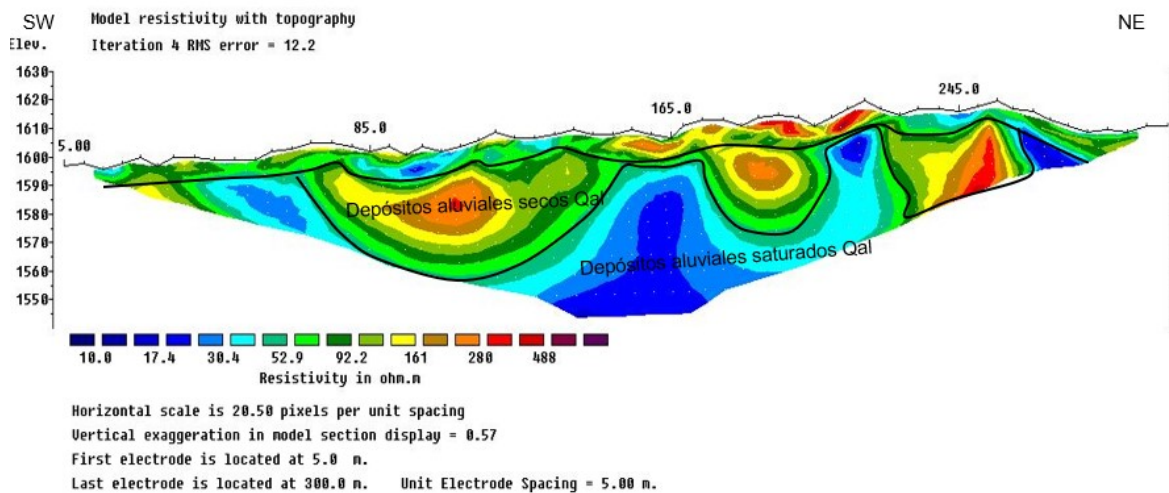


Figura 27. Modelo de inversión tomografía 5. Elaboración propia



Las principales diferencias entre las interpretaciones del estudio AMVA y UdeA (2013) y la propuesta por el trabajo de grado se basan principalmente en la clasificación de las unidades litológicas y sus respectivos espesores. Mientras que el estudio AMVA y UdeA (2013) clasifica la unidad litológica (TReC) Esquistos de Cajamarca en los últimos 4 a 20 metros de profundidad, la interpretación propuesta por el estudio sugiere que la unidad litológica presente en estos últimos metros se asocia a Depósitos aluviales (Qal). Otra variación entre las interpretaciones es la saturación de las unidades litológicas en algunas zonas del modelo, dicha variación depende de la geometría discontinua de los contornos, lo que a su vez se relaciona con sus características deposicionales en una topografía irregular (ver Tabla 8). Dichas diferencias son posibles mediante la aplicación del MGI y el MFR.

Tabla 8. Tabla comparativa de interpretación tomografía 5, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013)

AMVA y UdeA, 2013 – Tomografía 3				Trabajo de grado – Tomografía 5			
Espesor (m)	Rango de resistividad (Ohm.m)	Materiales	Unidad litológica	Espesor (m)	Rango de resistividad (Ohm.m)	Materiales	Unidad litológica
30 a 40	42 a 943	Arcillas, limos y arenas secos	NQFII Depósitos de Flujos de Escombros y lodos	5	30 – 280	Arenas, limos y arcillas secas meteorizadas	Suelo de depósitos aluviales (Qal)
	4 a 20	Rocas metamórficas Esquistos	TReC Esquistos de Cajamarca	35	30 - 488	Gravas, arenas, limos y arcillas secos	Depósitos aluviales (Qal)
				15	1 - 60	Gravas, arenas, limos y arcillas saturados	Depósitos aluviales (Qal)

### 6.3.5.8 Modelo conceptual de materiales TER-05

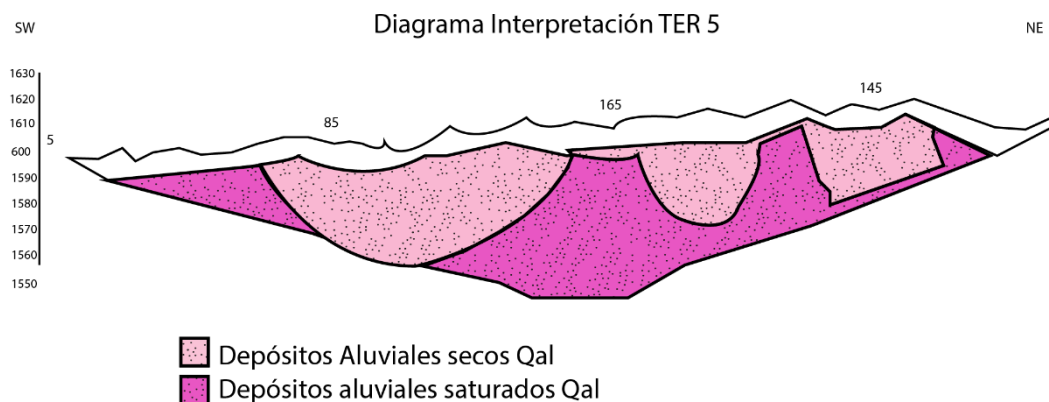


Figura 28. Modelo conceptual de materiales TER-05. Elaboración propia



### 6.3.5.9 Tomografía 6

En esta tomografía se realiza un reprocesamiento y una reinterpretación del modelo de inversión basados en el MGI y el MFR propuestos por el trabajo de grado Esta tomografía (Figura 29) consta de 2 capas, la primera capa con un espesor aproximado de entre 7 a 10 metros con resistividades de 7 a 280 ohm.m y colores naranja, amarillo y verde, asociados a materiales no consolidados secos de depósitos aluviotorrenciales (Qat). Se identifica una segunda capa con espesores de 10 a 12 metros, resistividades menores a 50 ohm.m y colores azules, se relaciona con materiales no consolidados parcialmente saturados, pertenecientes a depósitos de flujo de escombros (NQFII)

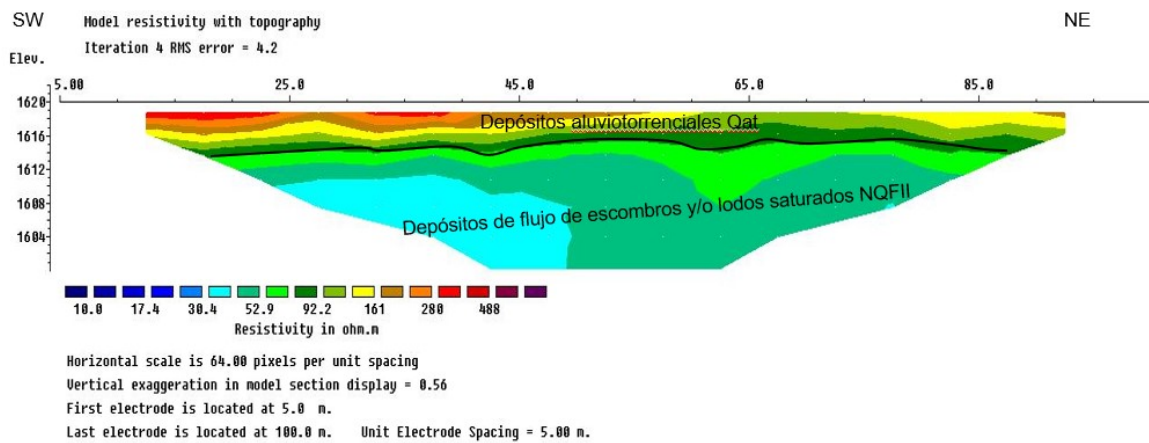


Figura 29. Modelo de inversión tomografía 6. Elaboración propia

La principal variación entre las interpretaciones del estudio AMVA y UdeA (2013) y la propuesta por el trabajo de grado se basa en la clasificación de las unidades litológicas y sus respectivos espesores. Mientras que el estudio AMVA y UdeA (2013) clasifica la unidad litológica Depósitos aluvio torrenciales (Qat) en los últimos 16 metros de profundidad, la interpretación propuesta por el estudio sugiere que la unidad litológica presente en estos últimos 12 metros se asocia a Depósitos de flujos de escombros (NQFII) (ver Tabla 9). Dichas diferencias son posibles mediante la aplicación del MGI y el MFR.

Tabla 9. Tabla comparativa de interpretación tomografía 6, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013).

AMVA y UdeA, 2013 – Tomografía 4				Trabajo de grado – Tomografía 6			
Espesor (m)	Rango de resistividad (Ohm.m)	Materiales	Unidad litológica	Espesor (m)	Rango de resistividad (Ohm.m)	Materiales	Unidad litológica
2 a 5	121 a 303	Bloques, arcillas, limos y arenas secas	Depósitos aluvio torrenciales (Qat)	7 a 10	100 – 488	Bloques, arenas, limos y arcillas secos	Depósitos aluvio torrenciales (Qat)

16	35 a 89	Bloques, arenas, limos y arcillas saturados	Depósitos aluvio torrenciales (Qat)	10 a 12	30 – 60	Bloques, arenas, limos y arcillas saturados	Depósitos de flujos de escombros (NQFII)
----	---------	---	-------------------------------------	---------	---------	---	--

### 6.3.5.10 Modelo conceptual de materiales TER-06

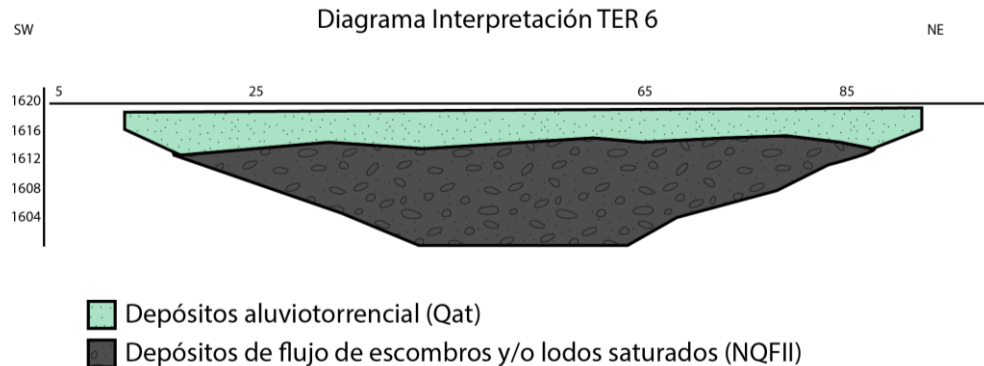


Figura 30. Modelo conceptual de materiales TER-06. Elaboración propia

### 6.3.5.11 Tomografía 7

En esta tomografía se realiza un reprocesamiento y una reinterpretación del modelo de inversión basados en el MGI y el MFR propuestos por el trabajo de grado. En esta tomografía (Figura 31) se pueden observar 2 capas, se observa una primera capa con un espesor de 10 metros, resistividades de 10 a 40 ohm.m y colores azules, se asocian a materiales no consolidados saturados, los cuales aparecen de nuevo a los 30 metros de profundidad, con un espesor aproximado de 30 metros, y se interpretan como depósitos aluviales saturados (Qal). También se identifica una segunda capa a los 10 metros de profundidad, que se extiende aproximadamente con un espesor de 15 metros, dicha capa presenta colores verdes y resistividades de 50 a 90 ohm.m asociadas a materiales no consolidados parcialmente saturados. Esta capa ultima capa es discontinua lateralmente y se clasifica como depósito de flujo de escombros (QFIV).

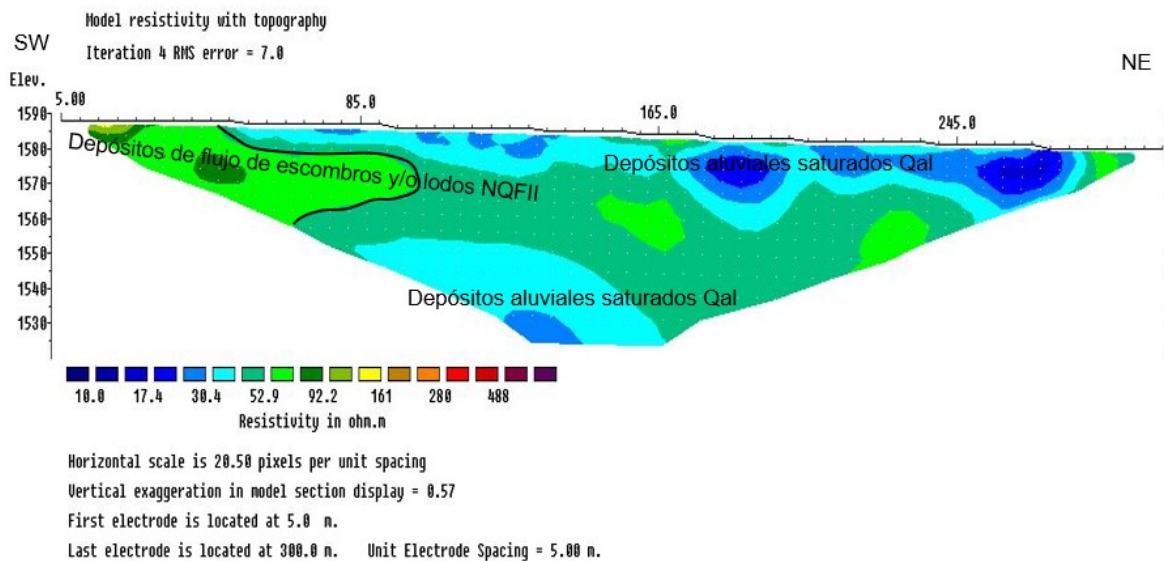


Figura 31. Modelo de inversión tomografía 7. Elaboración propia

La principal variación entre las interpretaciones del estudio AMVA y UdeA (2013) y la propuesta por el trabajo de grado se basa en la clasificación de las unidades litológicas y sus respectivos espesores. Mientras que el estudio AMVA y UdeA (2013) clasifica la unidad litológica Depósitos aluviales (Qal) en las profundidades de 15m a 20m aproximadamente, la interpretación propuesta por el estudio sugiere que la unidad litológica presente en estos metros se asocia a Depósitos de flujos de escombros (QFIV) (ver Tabla 10). La discontinuidad horizontal de la capa de depósitos de flujo de escombros se asocia a la deposición de este en sus zonas más distales de la cabecera del flujo. Dichas diferencias son posibles mediante la aplicación del MGI y el MFR.

Tabla 10. Tabla comparativa de interpretación tomografía 7, estudio previo vs trabajo de grado. Elaboración propia información tomada de AMVA y UdeA (2013)

AMVA y UdeA, 2013 – Tomografía 5				Trabajo de grado – Tomografía 7			
Espesor (m)	Rango de resistividad (Ohm.m)	Materiales	Unidad litológica	Espesor (m)	Rango de resistividad (Ohm.m)	Materiales	Unidad litológica
5 a 20	12 a 150	Arcillas, limos y arenas secas	Depósitos aluviales (Qal)	10	1 – 50	Arenas, limos y arcillas saturados	Depósitos aluviales (Qal)
20 a 30	33 a 119	Gravas, arenas, limos y arcillas saturados	Depósitos aluviales (Qal)	15	50 - 92	Gravas, arenas, limos y arcillas parcialmente saturados	Depósito de flujo de escombros (QFIV).
30 a 40	12 a 24	Arcillas, limos y arenas	Depósitos aluviales (Qal)	30	1 – 50	Arenas, limos y arcillas saturados	Depósitos aluviales (Qal)

### 6.3.5.1 Modelo conceptual de materiales TER-07

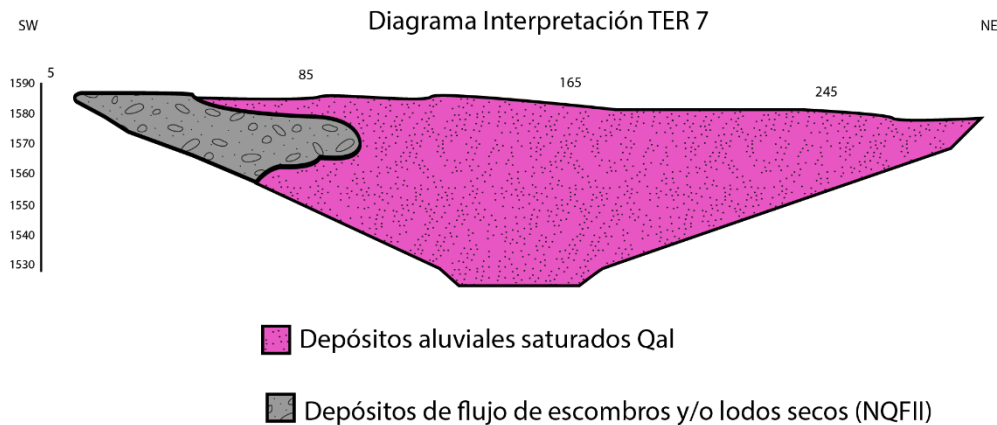


Figura 32. Modelo conceptual de materiales TER-07. Elaboración propia.

## 6.4 Caracterización hidrogeológica del subsuelo a partir de la interpretación de TER

Después del análisis de la información geológica y geofísica se procede con asignar características hidrogeológicas a cada una de las unidades litológicas someras encontradas en la zona de estudio. Dicha selección de unidades hidrogeológicas se realiza mediante la identificación de propiedades geológicas como tipo de roca, tamaño de grano, tipo de matriz, selección, discontinuidades y permeabilidad (Ver Tabla 11).

Tabla 11. Unidades hidrogeológicas de la zona de estudio

Unidad litológica	Subunidad Hidrogeológica	Tipo de roca	Tamaño de grano	Tipo de matriz	Selección	Discontinuidades	Permeabilidad	Capacidad para almacenar y/o pasar agua.
Depósito de flujo de escombros y/o lodos (NQFII)	UHG - 1	Sedimentos no consolidados-Clástica	Bloques, gravas, limos y arcillas	Limo y arcilla (40%)	Mala	N. A	Primaria y secundaria (meteorización)	Media-Baja
	UHG - 2	Sedimentos no consolidados-Clástica	Bloques, gravas, arenas, limos y arcillas	Limo y arena (40%)	Mala	N. A	Primaria y secundaria (meteorización)	Media
Depósito de flujo de escombros y/o lodos (NFI)	UHG - 3	Sedimentos no consolidados-Clástica	Bloques, gravas, limos y arcillas	Limo arcilloso (>50%)	Mala	N. A	Primaria y secundaria (meteorización)	Media – Baja
Depósito de flujo de escombros y/o lodos (NFprel)		Sedimentos no consolidados-Clástica	Bloques, gravas, limos y arcillas	Limo arcilloso (>70%)	Mala	N. A	Primaria y secundaria (meteorización)	Media – Baja
Depósito aluvio torrencial (Qat)	UHG - 4	Sedimentos no consolidados-Clástica	Bloques, gravas, limos y arcillas	Areno limoso (50%)	Mala	N. A	Primaria	Media – Alta

Unidad litológica	Subunidad Hidrogeológica	Tipo de roca	Tamaño de grano	Tipo de matriz	Selección	Discontinuidades	Permeabilidad	Capacidad para almacenar y/o pasar agua.
	UHG - 5	Sedimentos no consolidados-Clástica	Bloques, gravas, limos y arcillas	Arcillosa a limo arenosa (>60%)	Mala	N. A	Primaria y secundaria (meteorización)	Media
Depósito aluvial (Qal)	UHG - 6	Sedimentos no consolidados-Clástica	Arenas y limos	Areno limosa (>60%)	Media - Buena	N. A	Primaria y secundaria (meteorización)	Alta – Muy alta

Los depósitos de flujo de escombros y/o lodos (NQFII) se dividen en dos unidades hidrogeológicas debido a sus cambios en el tamaño de grano de la matriz; pasando de limo y arcilla a limo y arena. Los depósitos de flujo de escombros y /o lodos NFprel y NFI son clasificados como una misma unidad hidrogeológica debido a que sus propiedades texturales son similares. Los depósitos aluviotorrenciales (Qat) se dividen en dos unidades hidrogeológicas debido a sus cambios en el tamaño de grano de la matriz; pasando de areno limoso a arcilloso.

## 7. Discusión

A partir del diagnóstico, la recopilación, análisis y procesamiento de información geológica y geofísica, recopilada de estudios anteriores realizados en el Valle de Aburrá, se elaboró un modelo geológico inicial (MGI) y de física de rocas (MFR). Dichos modelos iniciales se implementaron en el procesamiento de tomografías eléctricas, logrando disminuir la no unicidad presente en la inversión e interpretación de las tomografías eléctricas.

La caracterización de los depósitos no consolidados mejora la resolución de las capas saturadas y no saturadas, y da información de los cambios texturales a lo largo de las unidades litológicas, ayudando a entender las características hidrogeológicas de los materiales que componen el acuífero libre en la parte sur occidental del Valle de Aburrá. Dichos depósitos no presentan las mismas propiedades de almacenamiento y transmisión de agua subterránea en la zona de estudio.

El MGI y el MFR, se realizó, a través de procesamiento, análisis y correlación de: TER, perforaciones y cartografía geológica. La implementación de estos modelos en el procesamiento de las TER permitió el desarrollo de nuevos modelos de inversión que pudieron ser comparados con los modelos existentes dando como resultado variaciones en las unidades litológicas, grado de saturación, espesores y características texturales de los materiales no consolidados que componen el acuífero libre de la zona suroccidental del Valle de Aburrá.

Para la realización de cualquier MGI y MFR, es importante utilizar la mayor cantidad de información geológica y geofísica disponible. Estos modelos iniciales son necesarios en el desarrollo de cualquier proyecto para obtener resultados más acordes a la geología del subsuelo presente en la zona de estudio. Además de los resultados esperados, se puede llegar a encontrar información adicional, que permita proponer zonas para diferentes estudios como: La clasificación de zonas con potencial de recarga, nuevos pozos exploratorios y cualquier tipo de método geofísico que suministre información para disminuir la incertidumbre en zonas con vacíos de información geofísica en el modelo.

Nuestro principal producto, se basa en la aplicación de MGI y MFR para el procesamiento de TER disminuyendo el problema de la no unicidad en la interpretación de modelos de inversión. Todo esto con la intención de mostrar, cómo, a partir de la integración de los datos ya existentes de múltiples estudios, se puede llevar a la consolidación y uniformidad de conceptos que ayuden a mejorar la comprensión de la geología y la geofísica de la zona de estudio.

Pese a contar con una base de datos geofísica (SEV, TER, Sísmica) y geológica (perforaciones, cartografía geológica) tomados en el Valle de Aburrá entre los años 2002 y 2014, la información aún no cuenta con una uniformidad ni parametrización clara, lo que puede llevar, a veces, a interpretaciones y sesgos en las posibles correlaciones e interpretaciones. También, es de mencionar la importancia de realizar una cartografía geológica más detallada para delimitar el basamento en el Valle de Aburrá ya que hay muchos vacíos asociados a su relieve irregular.

Con base en la información adquirida en la zona de estudio asociada a: pendiente, cobertura del suelo, geología y clima, se sugiere una ampliación en el conocimiento de estos parámetros con el objetivo de determinar la recarga en dicha zona. También se recomienda ampliar la información geológica e hidrogeológica del Valle de Aburrá a profundidades mayores de 100 metros, con el fin de determinar la posible conexión entre el acuífero libre y el acuífero semi confinado.

## **8. Conclusiones**

La recopilación y análisis de la información secundaria permite identificar zonas con mayor cantidad de datos disponibles, como: Las inmediaciones del Río Medellín a lo largo de su curso por el Valle, La ladera Sur occidental (La Estrella, Itagüí y San Antonio de Prado), y la ladera Noroccidental (Medellín) del Valle de Aburrá., los cuales a su vez presentan una caracterización geológica e hidrogeológicas más detallada. Los vacíos de información están asociados a las laderas oriental, sur oriental, y occidental. La principal limitación en el Valle de Aburrá es la falta de información geológica e hidrogeológica a profundidades mayores de 100 metros.

La definición del MGI presenta información relevante acerca de la disposición, grado de saturación y granulometría de los diferentes depósitos no consolidados que componen el acuífero libre en el sur occidental del Valle de Aburrá. Además, el MFR brinda información relevante acerca del comportamiento geoeléctrico de las diferentes capas litológicas, con o sin presencia de fluidos. El trabajo conjunto del MGI y el MFR da como resultado una caracterización estratigráfica e hidrogeológica somera con mayor detalle de la zona de estudio.

La implementación del MGI y MFR en el procesamiento de tomografías eléctricas genera interpretaciones con menor grado de incertidumbre, más acordes a las propiedades físicas de los materiales presentes en la zona. La comparación de las TER procesadas en el proyecto de grado respecto a las TER realizada por los estudios, indican en algunos casos, resultados diferentes tanto en la asociación de unidades litológicas, como en su grado de saturación, geometría y espesor.

Según las caracterizaciones hidrogeológicas de las unidades litológicas se puede concluir que una sola unidad litológica puede tener dos comportamientos hidrogeológicos diferentes, mientras que en algunos casos una unidad hidrogeológica puede agrupar dos unidades litológicas debido a sus características hidrogeológicas similares.



## 9. Referencias Bibliográficas

- Abdul-Nafiu, A. K., Nordin, M. N. M., Abdullah, K., Saheed, I. K., & Abdullah, A. (2013). Effects of electrode spacing and inversion techniques on the efficacy of 2D resistivity imaging to delineate subsurface features. *American Journal of Applied Sciences*, 10(1), 64. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.64.72>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad de Antioquia (2012). Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el norte del Valle De Aburrá. Contrato 405 de 2011.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad de Antioquia (2013). Determinación y Protección de las Potenciales Zonas de Recarga en el Centro y Sur del Valle de Aburrá. Contrato 254 de 2013.
- Área Metropolitana Del Valle de Aburrá. (2002). Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá.
- Área Metropolitana Del Valle de Aburrá. (2007). Microzonificación sísmica detallada de los municipios del Valle de Aburrá. Consorcio Microzonificación.
- Ariyo, S. O., Folorunso, A. F., & Ajibade, O. M. (2011). Geological and geophysical evaluation of the Ajana area's groundwater potential, southwestern Nigeria. *Earth Sciences Research Journal*, 15(1), 35-40.
- Butler, D. K. (2005). *Near-surface geophysics*. Society of Exploration Geophysicists.
- Chaudhuri, A., Sekhar, M., Descloitres, M., Godderis, Y., Ruiz, L., & Braun, J. J. (2013). Constraining complex aquifer geometry with geophysics (2-D ERT and MRS measurements) for stochastic modelling of groundwater flow. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 288-297. [doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.09.005)
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Aburrá – nss (2701-01), localizada en el departamento de Antioquia jurisdicción de la corporación autónoma regional del centro de Antioquia CORANTIOQUIA)- contrato no. 1504 -168 de abril 6 de 2015
- Cutillas, P. P., Martínez-Pagán, P., Estrella, T. R., García, C. C., & Hervás, F. N. (2015). La tomografía eléctrica como técnica de apoyo para la identificación y reconocimiento de meandros abandonados: caso de estudio de La Vega Media del Segura (Murcia). In *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 1833-1842). Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio.

- Day-Lewis, F. D., Slater, L. D., Robinson, J., Johnson, C. D., Terry, N., & Werkema, D. (2017). An overview of geophysical technologies appropriate for characterization and monitoring at fractured-rock sites. *Journal of environmental management*, 204, 709-720. doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.033
- Empresas Públicas de Medellín, Universidad de Antioquia, (2014). Disponibilidad del Recurso Hídrico Subterráneo para el Abastecimiento de Agua de los Circuitos Atendidos por Fuentes Menores: Aguas Frías, Caldas, Barbosa, San Cristóbal, La Montaña, La Cascada y San Antonio de Prado y Algunos Sectores de Bombeo Representativo Fase II.
- Franco, O., García, M., Vargas, O., González, M., & Jaramillo, O. (2010). Estudio nacional del agua. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- García, M., Vargas, O., Santos, A. C., Bernal, F., Olaya, G., Roser, C., Ceballos, J. L., ... Aguirre, S., (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Gattinoni, P., Pizzarotti, E. M., & Scesi, L. (2014). Geological Conceptual Model for Underground Works Design. In *Engineering Geology for Underground Works* (pp. 53-96). Springer, Dordrecht.
- Gómez Camargo, D. S. (2018). Determinación de la unidad hidrogeológica y estimación de la recarga potencial del sistema hidrogeológico del Valle de San Nicolás (Proyecto de grado Escuela de Ingeniería de Antioquia). <http://repository.eia.edu.co/handle/11190/2251>
- Günther, T. (2005). Inversion methods and resolution analysis for the 2D/3D reconstruction of resistivity structures from DC measurements (Tesis Doctoral, TU Bergakademie Freiberg).
- INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1984). Geología y geoquímica de las planchas 130 (Santafé de Antioquia) y 146 (Medellín occidental), escala 1: 100.000, memoria explicativa.
- Loke, M. H., Acworth, I., & Dahlin, T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration geophysics*, 34(3), 182-187. <http://doi.org/10.1071/EG03182>
- Olayinka, A. I., & Yaramanci, U. (2000). Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 45(2), 63-81. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00019-7)

- Rendón, D. A., Toro, G. E., & Hermelin, M. (2006). Modelo Cronoestratigráfico para el Emplazamiento de los Depósitos de Vertiente en el Valle de Aburrá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (18), 103-118. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1695/169517424010>
- Restrepo, J.J., 1991. Datación de algunas cenizas volcánicas de Antioquia por el método de trazas de fisión. AGID report, Vol 16: pp 148-157
- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation 1. *Geophysical prospecting*, 40(4), 453-463. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1992.tb00536.x>
- Shelmon, R. (1979). Zonas de deslizamientos en los alrededores de Medellín, Antioquia (Colombia). *Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS*. 45 pp
- Tapias, J. C., Himi, M., & Casas, A. (2005). Estimación de la distribución espacial de las propiedades texturales de los suelos por tomografía eléctrica: Principios y Aplicaciones. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 7, 191-196.
- Toro, G., (1999). Téphrocronologie de la Colombie centrale (département d'Antioquia et abanico de Pereira). Tesis Doctoral. Universidad Joseph Fourier, Grenoble-Francia, 250 P