



Libertad y Orden

**INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
INGEOMINAS**

**INFORME HIDROGEOLÓGICO DEL MACIZO
DE SANTANDER**

Bogotá, septiembre 2009

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA



Libertad y Orden

**REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA INGEOMINAS
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
INGEOMINAS**

RECURSOS DEL SUBSUELO

**INFORME HIDROGEOLOGICO DEL MACIZO
DE SANTANDER**

**Por
Gloria Hincapié
Jairo Veloza**

Bogotá, septiembre 2009

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	7
1. MARCO GEOLÓGICO.....	9
1.1 ESTRATIGRAFÍA	9
1.1.1 Proterozoico	9
1.1.2 Paleozoico.....	11
1.1.3 Mesozoico	12
1.1.4 Cenozoico	16
1.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	17
1.2.1 Sistema de fallas de orientación NS.....	17
1.2.2 Sistema de fallas de orientación E-W	20
1.2.3 Sistema de fallas y pliegues de la cobertera sedimentaria	21
1.2.4 Pliegues.....	22
2.1 CORTES GEOELÉCTRICOS.....	24
2.1.1 Cortes Geoeléctricos N - E	25
2.1.2 Cortes Geoeléctricos N - W	28
2.1.3 Corte Geoeléctrico W - E	31
2.2 MAPAS DE ISO-RESISTIVIDADES	33
2.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	34
2.4 CONCLUSIONES.....	38
3. HIDROLOGÍA	40
4. MARCO HIDROGEOLOGICO	51
4.1 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	51
4.1.1 ROCAS METAMÓRFICAS	53

4.1.2 Rocas Ígneas	56
4.1.3 Rocas Sedimentarias	59
4.2 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	63
5.2.1 Rocas Metamórficas.....	63
4.2.2 Rocas ígneas	65
4.2.3 Rocas sedimentarias.....	67
4.2.4 Rocas sedimentarias calcáreas	68
4.2.5 Depósitos recientes	69
5. HIDROGEOQUÍMICA.....	71
5.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	71
5.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA.....	72
5.2.1 Rocas ígneas y metamórficas	74
5.2.2 Rocas sedimentarias.....	76
6.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA	78
6.3.2 Rocas sedimentarias.....	80
7. CALIDAD DEL AGUA SUBTÁRRANEA.....	82
8. ESQUEMA HIDROGEOLOGICO PRELIMINAR	85
BIBLIOGRAFÍA	89

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del área de estudio	7
Figura 2. Mapa geológico del Macizo de Santander	10
Figura 3. Mapa Estructural del Macizo de Santander	19
Figura 4. Mapa geológico sector de Berlín con ubicación de SEV's y cortes geoelectricos	25
Figura 5. Corte Geoelectrico NE-01	26
Figura 6. Corte Geoelectrico NE-02	27
Figura 7. Corte geoelectrico Nw-01	29
Figura 8. Corte geoelectrico NW-02	30
Figura 9. Corte geoelectrico W-E	32
Figura 10. Mapas de iso-resistividades a diferentes profundidades	34
Figura 11. Manantial a partir de la roca meteorizada	35
Figura 12. Superficie con resistividad de 1008 ohm-m donde se manifiestan quiebres con dirección noroeste	37
Figura 13. Superficie con resistividad de 5000 ohm-m donde se manifiestan escalones con dirección noroeste	37
	38
Figura 14. Planos de iso-resistividad a 3250 y 3350 msnm donde se manifiestan los trazos de las fallas noreste y los escalones con dirección noroeste	
Figura 15. Localización espacial de las estaciones Hidroclimáticas	44
Figura 16. Distribución de la Precipitación Multianual en mm/año	45
Figura 17. Distribución espacial de la Evapotranspiración	46
Figura 18. Distribución espacial de la Escorrentía	47
Figura 19. Distribución espacial de la Recarga Potencial	49

Figura 20. Distribución recarga potencial en límites de la cartografía geológica	51
Figura 21. Mapa geológico con inventario de puntos de agua	53
Figura 22. Relación conductividad eléctrica- altura	54
Figura 23. Relación caudal- altura	55
Figura 24. Relación Conductividad eléctrica- altura	55
Figura 25. Relación caudal- altura	56
Figura 26. Relación conductividad eléctrica- altura	56
Figura 27. Relación caudal- altura	57
Figura 28. Relación Conductividad Eléctrica- Altura	57
Figura 29. Relación caudal- altura	58
Figura 30. Relación conductividad eléctrica- altura	58

Figura 31. Relación caudal - altura	59
Figura 32. Relación conductividad eléctrica- altura	59
Figura 33. Relación caudal- altura	60
Figura 34. Relación Conductividad eléctrica- altura	61
Figura 35. Relación caudal- altura	61
Figura 36. Relación conductividad eléctrica- altura	62
Figura 37. Relación caudal- altura	62
Figura 38. Relación conductividad eléctrica - altura	64
Figura 39. Relación conductividad eléctrica - altura	64
Figura 40. Relación caudal - altura	65
Figura 41. Tipos geoquímicos de agua	74
Figura 42. Mapa de tipos Geoquímicos de aguas subterráneas	75
Figura 43. Diagrama Piper. Rocas ígneas y metamórficas	78
Figura 44. Diagrama Piper. Rocas sedimentarias	80
Figura 45. Mapa de concentración de bicarbonatos HCO ₃ (mg/l)	81
Figura 46. Diagrama de Schoeller. Rocas Ígneas y Metamórficas	82
Figura 47. Diagrama de Schoeller. Rocas sedimentarias	83
Figura 48. Concentraciones no admisibles de Calcio	84
Figura 49. Concentraciones no admisibles de Hierro	85
Figura 50. Concentraciones no admisibles de Manganeso	85
Figura 51. Concentraciones no admisibles de Aluminio	86
Figura 52. Esquema hidrogeológico Sector de Berlín	89
Figura 53. Esquema hidrogeológico Sector de Berlín	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones hidroclimáticas en la cuenca Superior del río Lebrija	Pág. 42
Tabla 2. Pérdidas por efecto antrópico	48
Tabla 3. Valores promedio de las componentes hidrológicas de la CSRL	48
Tabla 4. Escala de recarga potencial	50
Tabla 5. Tipos geoquímicos de agua subterránea. Rocas metamórficas	74
Tabla 6. Tipos geoquímicos de agua subterránea. Rocas ígneas	75
Tabla 7. Tipos geoquímicos de agua subterránea. Rocas sedimentarias	77

INTRODUCCIÓN

El Macizo de Santander se encuentra localizado en la parte central del departamento de Santander sobre el flanco occidental de la Cordillera Oriental, constituido esencialmente por rocas ígneas y metamórficas, y en menor proporción por rocas sedimentarias y sedimentos no consolidados.

El área de este trabajo cubre una extensión de 464 km² y comprende parte de la denominada Cuenca Superior del Río Lebrija, se encuentra enmarcada por los ríos Tona al norte y Río de Oro al sur y desde la Falla de Bucaramanga al occidente hasta el Páramo de Berlín al oriente (**Figura 1**).

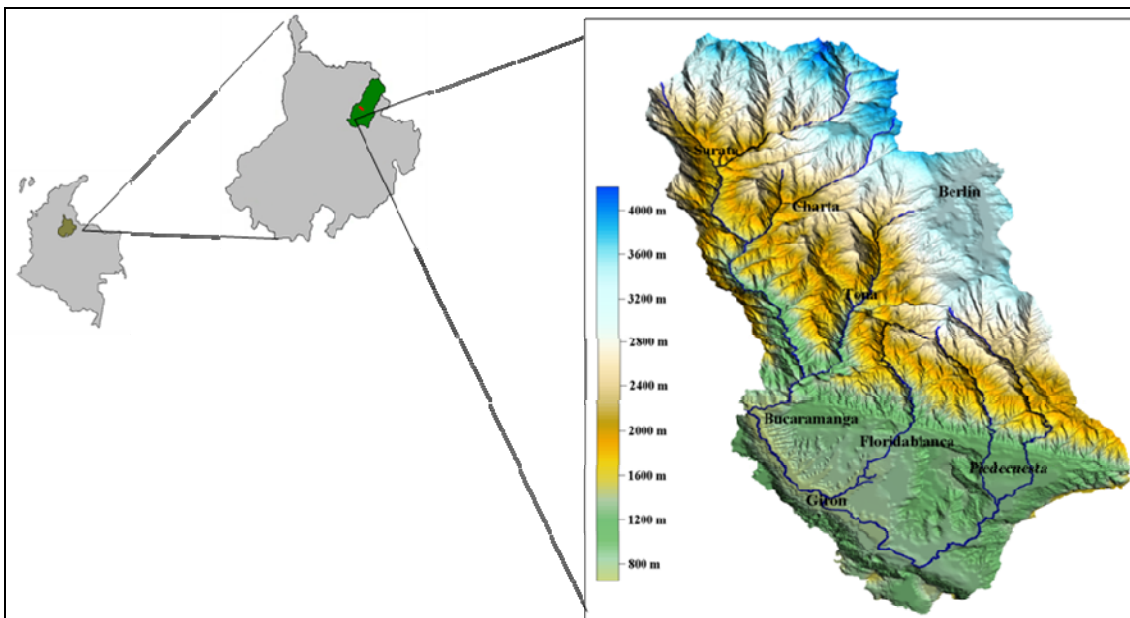


Figura 2. Localización del área de estudio.

En el área correspondiente al Macizo de Santander se inventariaron durante los meses de junio y julio de 2006 un total de 126 puntos de agua, correspondientes a manantiales y algunas fuentes superficiales, distribuidos en las unidades geológicas aflorantes, Neis de Bucaramanga, Ortoneis de Berlín, Formación Silgará, Plutón de Páramo Rico, Cuarzomonzonita de La Corcova, Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, formaciones Girón, Los Santos, Rosablanca, Paja, Tablazo, y los depósitos Coluviales o de Ladera, Aluviales y Fluvioglaciares,

de los cuales algunos están dando origen a los drenajes que alimentan las cuencas de los ríos Tona y Río de Oro.

Los criterios utilizados en la selección de los puntos de agua subterránea a muestrear para la fase de hidrogeoquímica, fueron principalmente la unidad geológica captada y su distribución espacial. Se recolectaron 72 muestras durante el mes de febrero y principios de marzo de 2007, correspondientes al periodo seco, con el fin de que la muestra fuera lo más representativa del cuerpo de agua a caracterizar.

La mayor importancia hidrogeológica de las rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias aflorantes en el área de estudio, se concentra en la zona fracturada. La mayoría de los manantiales inventariados están asociados con las zonas de alteración y diaclasamiento, con espesores que generalmente no superan los cinco metros y con posibilidades de almacenamiento poco significativo.

Con la escasa información hidrogeológica aportada por los manantiales y su caracterización físico química se plantea un esquema hidrogeológico del área de estudio.

1. MARCO GEOLÓGICO

1.1 ESTRATIGRAFÍA

En esta zona afloran rocas desde el Precámbrico hasta el Cretácico inferior, cubiertas en algunas partes por depósitos sedimentarios de edad reciente y de origen diverso. Las rocas metamórficas están representadas por el Neis de Bucaramanga considerado de edad Proterozoica, la Formación Silgará de edad Paleozoica al igual que el Ortoneis de Berlín; las rocas intrusivas son preferentemente cuarzomonzónicas (La Corcova y Santa Bárbara) de edad Juratriásico y que cortan la secuencia metamórfica. El conjunto de rocas sedimentarias comprende la Formación Girón del Jurásico tardío y las formaciones cretácicas de Los Santos, Rosablanca, Paja y Tablazo. Los sedimentos recientes están representados por depósitos fluvio-glaciares, coluviales y aluviales. En la **Figura 2** se presenta el mapa geológico del Macizo de Santander (UIS, INGEOMINAS. 2007).

1.1.1 Proterozoico

1.1.1.1 Neis de Bucaramanga

Constituye la parte basal del Macizo de Santander, se identifican rocas metamórficas de alto grado y origen sedimentario.

El Neis de Bucaramanga en la zona de estudio presenta una gran extensión con marcadas variaciones en su topografía, sin embargo sobresalen sus pendientes abruptas, (entre 25 - 35°) y un patrón de drenaje subdendrítico a subparalelo. Esta unidad se caracteriza por presentar variaciones composicionales (cuarzofeldespático, biotítico, anfibólico, migmatítico), cuyo grado de meteorización es variable (escala grado de meteorización de roca del British Geological Survey). En general, el neis de tipo cuarzofeldespático se caracteriza texturalmente por presentar cristales de tamaño de grano medio a muy grueso, con bandas claras de cuarzo y plagioclasa, intercaladas con bandas máficas muy delgadas; muestra un grado medio de meteorización, conformando perfiles de tipo arenoso.

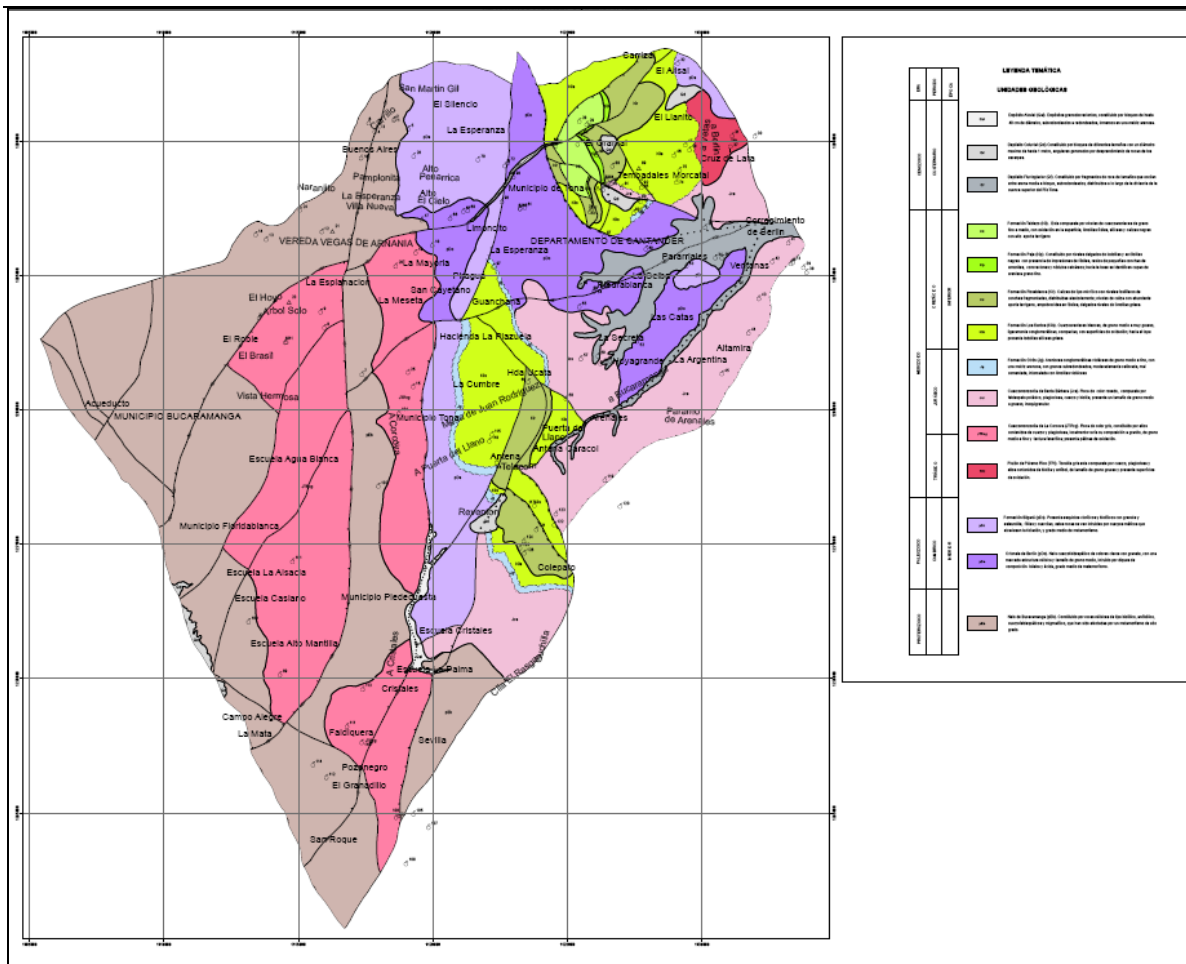


Figura 2. Mapa geológico del Macizo de Santander.

El neis biotítico se presenta finamente laminado, con una textura esquistosa, de grano fino, en colores verdes amarillentos, muy oxidados, mientras que el neis anfibólico se caracteriza texturalmente por ser de grano grueso a muy grueso, con bandas oscuras ricas en minerales máficos, intercaladas con bandas claras de cuarzo y plagioclasa de color gris-verdoso; presentan una meteorización de grado moderado a alto, cuyo perfil es arcilloso de tipo caolinítico, debido a la alteración química de los feldespatos y minerales máficos, dichos perfiles son característicamente rojizos y de un espesor considerable.

El neis migmatítico de color blanco o rosado, presenta una composición de plagioclasa 47%, se observan estructuras bandeadas que indican la plasticidad extrema durante la deformación.

1.1.2 Paleozoico

1.1.2.1 Ortoneis de Berlín (pDo)

Inicialmente definido por Ward y Goldsmith en 1973, como un cuerpo metamórfico de origen ígneo, con estructura neísica, aspecto masivo y composición félsica a intermedia. El Ortoneis de Berlín se aprecia como un cuerpo alargado dispuesto en dirección NS, se extiende hacia la cuenca del río Tona presentando crestas afiladas de pendientes moderadas a altas. En el altiplano de Berlín constituye un relieve de colinas redondeadas y pendientes bajas a moderadas. Esta afectado por fallas regionales de tipo normal como La Cristalina y la Falla de Tona; al NE se presenta en contacto fallado con rocas cretácicas de las formaciones Los Santos y Rosablanca y al W con la Formación Silgará; hacia el Páramo de la Lúcura, el Ortoneis de Berlín aparece cortado por diques de composición intermedia a pegmatítica.

Composicionalmente esta unidad se define como un neis cuarzofeldespático con presencia de cuarzo en un 30%, plagioclasa 35%, biotita 15%, estaurólita 10% y granate 10%; tiene textura granoblástica y color que varía entre blanco y gris. Se observa muy oxidado en superficie y desarrolla perfiles de suelo granular, producto de la meteorización. Cerca de la quebrada la Lúcura (parte alta de la cuenca del río Tona) se encuentra muy alterado y fracturado, debido a procesos mecánicos producto de los fuertes cambios de temperatura en la zona de El Alto y Tierra Negra.

1.1.2.2 Formación Silgará (pDs)

Nombre propuesto por Ward y Goldsmith en 1973, para referirse a una secuencia de rocas clásticas metamorizadas, de estratificación delgada, compuestas por pizarras, filitas, metalimolitas, cuarcitas, metawacas y esquistos en la facies esquisto verde filitas, cuya sección tipo se localiza en la quebrada Silgará, afluente del río Salamanca, al occidente de Cáchira.

La Formación Silgará se presenta en la parte central de la zona de estudio como fajas discontinuas con orientación NS. En general presentan una estructura esquistosa bien definida, comprende principalmente esquistos micáceos de biotita y moscovita, con variaciones a rocas de textura granoblástica de composición cuarcítica y marmórea, ubicadas hacia la parte alta de la cuenca del río Tona. Superficialmente aparecen muy oxidadas y donde se encuentra meteorizada desarrolla un tipo de suelo areno arcilloso de color amarillo naranja.

En toda la zona estas rocas se observan intruidas por cuerpos ígneos de edades Triásicas y Jurásicas. Geomorfológicamente la unidad aparece como un relieve ondulado, de pendientes moderadas, el cual contrasta con las crestas afiladas de las rocas con las que se encuentra en contacto.

1.1.3 Mesozoico

1.1.3.1 Plutón de Páramo Rico (TRt)

Es un cuerpo intrusivo tonalítico de color gris, con afloramiento al E de la cuenca del río Tona en un área de aproximadamente 3 km². Muestra una composición intermedia, con textura porfirítica y tamaño de grano medio a grueso, un contenido importante de máficos 30%, cuarzo 20%, plagioclasa 40%, feldespato potásico 10%. Los componentes máficos están uniformemente distribuidos en una matriz de plagioclasa equigranular. Los afloramientos encontrados en el área de estudio muestran la roca fresca y estructuralmente poco afectada (Coronado, Mejía, 2006).

1.1.3.2 Cuarzomonzonita de La Corcova (TRJc)

Esta unidad tiene variaciones de Cuarzomonzonita gris, Granodiorita y Diorita; se le ha asignado una edad relativa Jurásica y/o Triásico – Jurásica obtenida a partir de relaciones de campo y determinaciones radiométricas. Se caracteriza por ser una roca equigranular, de grano fino a medio, de textura sacaroides, con biotita uniformemente diseminada de color gris. Se identifica regionalmente como el Plutón de La Corcova y se observa sobre las vías, Bucaramanga-Pamplona y Los Curos-Guaca. La unidad está compuesta por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y moscovita; los accesorios son apatito, óxidos de hierro y zircón. Como minerales de alteración presenta clorita, epidota y sericita (Clavijo y Royero, 1995).

En el Macizo de Santander la Cuarzomonzonita de La Corcova se observa como dos cuerpos de forma alargada, con una orientación NS. Estos cuerpos han sido separados por efectos tectónicos y presentan leves variaciones composicionales, las rocas se encuentran en contacto intrusivo con las unidades del Neis de Bucaramanga, Ortoneis de Berlín y la Formación Silgará.

En la zona de estudio, la Cuarzomonzonita de La Corcova, se caracteriza por ser una roca de color gris, de grano fino a medio, de textura fanerítica, con presencia de patinas de oxidación y formación de dendritas de pirolusita en la superficie. Hacia el sector Las Palmas al SW del municipio de Tona, esta unidad presenta un mayor porcentaje de feldespato potásico, lo cual genera una variación de cuarzomonzonita a granito. Se presenta como una roca fresca hasta grados medio y alto de meteorización, donde los minerales máficos generan arcillas. En este tipo de roca, los perfiles de suelo originados por los procesos de meteorización tienen una textura arenosa.

1.1.3.3 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs)

Estas rocas conforman el Batolito de Santa Bárbara y afloran al oriente del departamento, en los sectores de Los Curos, Santa Bárbara, Baraya y en los

alrededores de Berlín. La cuarzomonzonita varía de color rosado, naranja a gris violáceo, es equigranular, compuesta por feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita, localmente hornblenda.

El área presenta una morfología de colinas redondeadas, se encuentra en contacto intrusivo con el cuerpo tonalítico de Páramo Rico en el sector Cruz de Lata en la vía Berlín – Vetas, e intruyendo al Ortoneis de Berlín; en la parte alta de la cuenca del río Tona, se encuentra en contacto fallado con la Formación Los Santos e inconforme con la Formación Girón.

Estas rocas presentan un alto grado de meteorización en la zona de estudio, siendo los feldespatos los más alterados formando arcillas. El perfil de meteorización es de carácter arenoso y de color crema, se evidencian cristales de cuarzo muy resistentes al intemperismo.

1.1.3.4 Formación Girón (Jg)

Langenheim (1954) fijó la sección tipo en la angostura del Río Lebrija y la dividió en tres miembros: uno inferior arenoso (750 m.), uno intermedio lodoso (1.250 m.) y el superior arenoso (1.500 m), para un espesor total de 3.500 m.

En Clavijo y Royero (2001) se nombra el estudio más detallado y completo de la Formación Girón realizado por Cediel (1968), quien en la sección tipo del Río Lebrija, describió y midió un total de 4.650 m y lo dividió en ocho conjuntos litológicos (A-H), que corresponden a las formaciones Girón (Conjuntos A-G) y Los Santos (H). Este espesor fue recientemente discutido por el mismo Cediel (2001) en el coloquio sobre el Triásico – Jurásico en Colombia, donde se define el espesor “verdadero” para la Formación Girón, este espesor puede ser la mitad del valor publicado anteriormente.

En la zona de estudio aflora hacia El Alto (Divisoria Cuenca Río Tona – Altiplano de Berlín), donde son areniscas conglomeráticas violáceas de grano fino a medio, con una matriz arenosa, granos subredondeados, moderadamente calibrada, mal cementada, que reposa discordantemente sobre el Ortoneis de Berlín. También se define por rasgos geomorfológicos y estratigráficos, en la parte alta de la cuenca del Río de Oro, en El Picacho, sobre la vía que conduce hacia Bucaramanga, ya que en la zona no se presentan afloramientos que permitan precisar mejor esta unidad. Aquí se encuentra constituida por areniscas de grano medio intercalado con limolitas violáceas, las cuales presentan una composición: cuarzo 50%, plagioclasa 30%, fragmentos de roca 18%, micas 2%. Texturalmente es una arenisca mal calibrada, de granos subangulares a redondeados, muy compacta y con baja porosidad.

1.1.3.5 Formación Los Santos (Kils)

Según Morales et al. (1958) este nombre fue dado por Hedberg (1931) a una sucesión de areniscas que afloran en el Cañón del Río Lebrija a lo largo del ferrocarril de Bucaramanga a Puerto Wilches, entre los km 92 y 93, cerca del caserío de El Tambor. Cediell (1968) revisa el término Formación Tambor, prefiriendo como localidad tipo, la Mesa de Los Santos, donde los estratos de esta formación están bien expuestos y propone se denomine “Formación Los Santos”. En la Mesa de Los Santos y zonas vecinas está constituida por tres niveles: uno inferior de areniscas arcosas de colores rojizos; otro medio arcilloso con intercalaciones de areniscas rojizas o rosado; y otro superior de areniscas blancas, mejor estratificadas que el nivel inferior. El espesor total es de más de 200 m en el borde W de la Mesa de Los Santos y de 120 m en el borde E, es decir que se adelgaza hacia el Macizo de Santander.

La Formación Los Santos en el Macizo de Santander aflora en la microcuenca de la quebrada Río Sucio y el alto El Picacho, se encuentra compuesta por cuarzoareniscas blancas, ligeramente gravosas y conglomeráticas, de grano muy grueso a fino, muy compactas, con superficies de oxidación en la parte intermedia. Hacia el techo los niveles de areniscas se encuentran intercalados con lodolitas silíceas oxidadas, de colores naranja a rojizos, que se tornan grisáceas en el contacto con la Formación Rosablanca.

En el sector de Río Sucio, la unidad está afectada por una serie de fallas menores de tipo normal e inverso, las cuales repiten la secuencia y aumentan su distribución areal (Ulloa, Rojas 2005). Hacia la parte SE de la cuenca del río Tona, en el sector de la finca La Esperanza, la Formación Los Santos presenta fuertes escarpes desarrollados a partir de las fallas que la ponen en contacto con el Ortoneis de Berlín.

Hacia el sector de El Picacho y El Alisal se midió el espesor de la Formación Los Santos, con un acumulado de 120 m.

1.1.3.6 Formación Rosablanca (Kir)

Descrita originalmente por Wheeler (1939), la Formación Rosablanca ha sido cartografiada por Julivert (1958) en toda la región de Mesas y Cuestas, por otro lado, Zamarreño de Julivert (1963) estudió en detalle la estratigrafía de esta formación en una sucesión ubicada en el cañón del río Sogamoso al W de La Mesa de Los Santos. También ha sido estudiada en detalle por Cardozo y Ramírez (1985) en la región de Villa de Leiva (Boyacá) y Gámbita (Santander). Está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso con oolitos, ostrácodos y dolomías; hacia la parte superior se encuentra constituida por areniscas y lodolitas calcáreas. En la parte inferior presenta depósitos evaporíticos, como yeso y polihalita que indican una hipersalinidad y tranquilidad en las condiciones de depositación; el resto de la secuencia se depositó en un

medio marino somero en condiciones neríticas. El espesor de la formación varía entre 150 y 425 m.

El rasgo geomorfológico más representativo de la unidad son los escarpes y paisajes cársticos ubicados en la parte oriental del área de estudio, que muestran grandes paquetes de calizas micríticas de color gris en los sectores de alto El Peñón, alto Peña Alta, alto Las Cruces y alto El Picacho, sector Llano de Adentro.

Debido a la composición química tanto de la roca como del agua, se observan zonas de alta disolución en las pendientes estructurales ubicadas hacia el alto El Peñón (parte alta de la cuenca del Río Tona) y en la carretera que conduce de Bucaramanga – Cúcuta, sector del Peaje.

En la zona de escarpes las capas son de espesores desde 50 hasta 150 cm, aquí las calizas presentan una alta densidad de diaclasas, que en la mayoría de los casos se encuentran abiertas, favoreciendo el flujo de agua a través de ellas, confiriéndole un alto grado de permeabilidad secundaria, incrementado por la meteorización de grado media – alta que muestran.

Hacia el sector de El Alisal se midió un espesor acumulado de la Formación Rosablanca de 240 m.

1.1.3.7 Formación Paja (Kip)

De acuerdo con Julivert (1958), se trata de una sucesión de shales negros, fosilíferos, ligeramente calcáreos y micáceos, el segmento inferior contiene concreciones calcáreas, septarias y venas de calcita. El espesor de esta formación varía entre un mínimo de 125 m y un máximo de 625 m. La Formación Paja ha sido cartografiada por Jimeno y Yepes (1963), en toda la región de Mesas y Cuestas, donde frecuentemente presenta niveles de yeso, rasgo particular del ambiente de sedimentación propio de la zona.

En el Macizo de Santander se caracteriza por definir pendientes suaves; está compuesto por niveles delgados de limolitas, lodolitas y arcillolitas negras, con presencia de impresiones fósiles, restos de pequeñas conchas, concreciones y nódulos calcáreos; presenta como minerales accesorios la moscovita y la pirita. Los shales negros se hacen ligeramente carbonáceos y se encuentran intercalados con areniscas de grano muy fino, silíceas. Hacia el sector de Río Sucio y El Gramal el espesor de la Formación Paja es de 60 m.

1.1.3.8 Formación Tablazo (Kit)

Descrita por Wheeler (1958) como una sucesión de calizas grises a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas, en capas medianas a gruesas, con intercalaciones de areniscas grises, de grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas, en capas delgadas; el ambiente de depósito parece corresponder a condiciones neríticas, poco profundas. El espesor varía entre 150 y 325 m. La Formación Tablazo se encuentra en contacto concordante con la infrayacente Formación Paja y la suprayacente Formación Simití.

En el área del Macizo de Santander esta unidad se encuentra en la parte alta de la cuenca del río Tona, conformando escarpes y plegamientos amplios. Composicionalmente se caracteriza por la presencia de niveles de cuarzoarenitas, limolitas fisiles, silíceas y calizas. Los niveles arenosos están constituidos por areniscas de grano fino a medio, con oxidación superficial y bajo a moderado grado de meteorización, presentando cierta porosidad primaria. Las calizas son de color negro con gran aporte terrígeno y venas de calcita. El espesor en el sector El Gramal es de 100 m.

La Formación Tablazo reposa concordantemente sobre la Formación Paja en la quebrada Los Arcos; hacia el sector de la quebrada Los Pantanos se encuentra en contacto con la formación Los Santos, debido a fallamiento de tipo inverso, que produce un gran plegamiento. En el sector del Alto al NW de la zona, se observa una estructura sinclinal donde la formación Tablazo hace parte su núcleo.

1.1.4 Cenozoico

Están representados en la zona de estudio por depósitos recientes, dentro de los cuales se diferencian los siguientes:

1.1.4.1 Depósitos Coluviales o de Ladera (Qd)

Son depósitos acumulados por lo general en la base de los escarpes, provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes debido a la acción de la gravedad. Estos depósitos se encuentran dispersos por toda el área del Macizo de Santander y se relacionan con rocas muy fracturadas del Neis de Bucaramanga en los municipios de Floridablanca y Piedecuesta; en la parte alta de la cuenca del río Tona por bloques de gran tamaño provenientes del Ortoneis de Berlín y las formaciones Los Santos y Rosablanca; en el sector de El Picacho por rocas de la Formación Los Santos, con bloques angulares de 2 m de diámetro en matriz de arena gruesa a grava. Estos depósitos tienen extensiones variables y espesor aproximado de 15 m.

1.1.4.2 Depósitos aluviales (Qal)

- Torrenciales

Estos depósitos corresponden a acumulaciones de carácter heterométrico, transportados por escorrentía superficial y ocasionados por eventos mayores de lluvias, se pueden observar en la cabecera de la quebrada Río Sucio.

- Terrazas

Acumulaciones de antiguos eventos de inundación, reconocibles en el río Tona, a lo largo de tres kilómetros y ubicados en la unión de las quebradas Los Arcos y Río Sucio. Las terrazas y depósitos aluviales del río Tona de aproximadamente 4 m de altura, están conformadas por bloques y cantos redondeados de entre 0.5 y 1.5 m de diámetro en una matriz arenosa.

- Depósitos de Flujo de Escombros (Qfe)

Se presentan sobre el piedemonte oriental del área metropolitana, entre el casco urbano de Floridablanca y Piedecuesta. Son depósitos de origen aluvial torrencial y pluvial gravitacional, provenientes de la denudación de los materiales alterados que componen el Macizo de Santander, los cuales son transportados a lo largo de las corrientes de agua que nacen en él. Estos depósitos forman abanicos y conos de deyección compuestos por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, con tamaño de grava y bloque en matriz areno-limosa.

1.1.4.3 Depósitos Fluvioglaciares (Qf)

Se encuentran localizados en la parte alta de la cuenca del río Tona, hacia el páramo de Berlín, donde se diferencian depósitos morrénicos en los sectores de las cabañas de Frailejones, en Arenales y en El Alto, compuestos por material heterométrico de formas angulares a subredondeadas, formando un relieve de colinas suaves a semiplano. Los depósitos presentan extensiones que van desde 50 a 200 m.

1.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

A partir del análisis y relación del marco tectónico regional, con los aspectos estructurales observados en campo, fueron definidos tres sistemas de fallas en forma jerárquica, los cuales presentan rangos en cuanto a escala y evolución de las estructuras.

1.2.1 Sistema de fallas de orientación NS

En el Macizo de Santander son evidentes los lineamientos de dirección NS, que corresponden a las estructuras principales en el sistema compresivo, debido a que se caracterizan por ser de tipo sinistral e inverso. A partir de la actividad de estas

fallas se generan bloques estructurales que presentan fallas de rumbo con una orientación NE-SW y EW (Figura 3).

- **Falla de Bucaramanga**

Es considerada un sistema de fallas de rumbo (Campbell, 1965; Vargas y Niño 1992), con movimiento sinistral, cuyo desplazamiento es calculado por Campbell (1965) y Tschanz et al (1969, 1974) en unos 100 a 110 km. Tiene una componente vertical importante, según Julivert (1958, 1961), Ward y Goldsmith (1973), Royero (1994), que hace que esta falla se comporte en algunos sectores como inversa y en su extremo meridional como de cabalgamiento (Boinet, 1985, Clavijo y Royero, 2001).

Esta falla en la zona de estudio se distingue en fotografías aéreas e imágenes de satélite, y se hace evidente desde el punto de vista geomorfológico debido a que enfrenta dos litologías diferenciadas por su resistencia a la erosión, al E el Macizo de Santander y al W la zona de abanicos de Bucaramanga y los valles de los ríos Frío, Oro, Tona, Quebradas Zapamanga y Aranzoque – Mensulí.

En datos de campo se encuentran estrías de falla con componentes sinistral – inversa, con una dirección aproximada de N30°W, además se observa alta densidad de diaclasas en las zonas cercanas a la falla. A partir del análisis de diaclasas se obtiene una dirección de esfuerzos EW que ha generado la falla de Bucaramanga y todo el fracturamiento de la zona (Mora y Quintero, 2006), acorde con Toro y Osorio (2005).

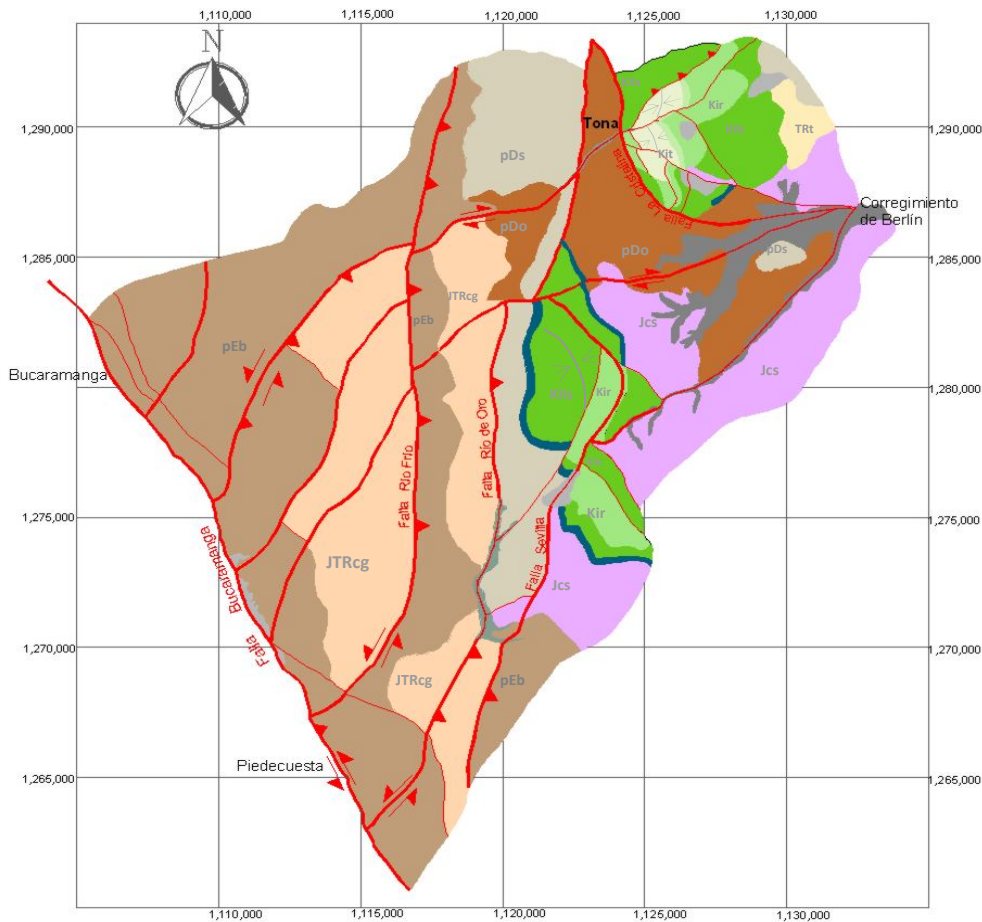


Figura 3. Mapa Estructural del Macizo de Santander.

- **Falla Río Frío**

La Falla Río Frío con un rumbo N5°W, es una estructura inversa con componente sinistral, el bloque E levantado, pone en contacto las rocas metamórficas del Neis de Bucaramanga de edad Proterozoica con las rocas ígneas Jurásicas de la Cuarzomonzonita de La Corcova. En la carretera Bucaramanga- Cúcuta y en el cauce del Río Frío y sus afluentes, pueden verse estrías de falla con direcciones de 170/ 70 (Mora, Quintero, 2006) y roca muy fracturada.

- **Falla Morrorico**

Falla paralela a la de Bucaramanga, presenta desplazamiento sinistral; esta fallas ha sido descrita anteriormente por González y Quintero (1990), Beltrán y Rey (2002), Vergara (2003). Los rasgos observados en campo fueron espejos y estrías en los planos de fallas, así como brechas de falla.

- **Falla Río de Oro**

Es una falla de tipo inverso con el bloque E levantado, poniendo en contacto rocas metamórficas de edad Paleozoica de la Formación Silgará con rocas ígneas Jurásicas de la Cuarzomonzonita de La Córcova; su trazo es paralelo a la Falla Río Frío y sigue el curso del Río de Oro, con una longitud aproximada de 21 km desde la Falla Bucaramanga hasta chocar con la falla de rumbo dextral La Cocalina, hacia el norte de la zona de estudio.

- **Falla Sevilla**

Con una longitud aproximada de 20 km y una dirección N20°E, se define como una falla inversa con el bloque E levantado. Esta estructura se desprende de la Falla de Bucaramanga, en el sector comprendido entre Los Curos y Piedecuesta y sigue el curso de la quebrada Sevilla. Más al norte, sobre la margen izquierda de Río de Oro, se evidencian saltos importantes de hasta 500 m con el bloque E levantado, afectando las calizas de la Formación Rosablanca y areniscas de la Formación Los Santos.

1.2.2 Sistema de fallas de orientación E-W

Un segundo orden en el proceso deformativo de la zona de estudio se ha considerado a partir de la presencia de fallas que cortan la zona de estudio en dirección E-W.

- **Falla Zapamanga**

Se denomina así a la estructura que sigue el curso de la quebrada Zapamanga, tiene una dirección aproximada de N30°E. Presenta un movimiento sinistral e inverso con el bloque SE levantándose sobre el bloque NW. Los criterios geomorfológicos para el trazo de estas fallas son los cambios de direcciones de las quebradas y la saliente de los cerros con litología del Neis de Bucaramanga hacia la zona de abanicos.

- **Falla La Cocalina**

Falla de rumbo dextral con una dirección N72°E. Esta falla rompe la pendiente estructural de la Formación Los Santos que viene desde El Picacho, formando dos bloques. Hacia el W la falla pone en contacto la Formación Silgará con el Ortoneis de Berlín.

- **Falla Casiano**

Se observa en la quebrada del mismo nombre, los indicios de esta falla se hallan en el modelo digital de elevaciones, las imágenes satelitales y las fotografías aéreas; en la zona aparece una topografía abrupta y alta densidad de fracturamiento y meteorización de las rocas.

- **Falla Mensulí**

La falla es precedente al sistema de falla sinistral inversa de Bucaramanga y Río Frío, ya que es cortada y desplazada por esta última. Esta estructura se hace evidente por lineamientos fotogeológicos; en campo se observan cambios de dirección de drenajes, facetas triangulares y alineación de quebradas. Se comporta como una falla vertical que corta las rocas del Neis de Bucaramanga y las pone en contacto con la Cuarzomonzonita de La Corcova.

1.2.3 Sistema de fallas y pliegues de la cobertera sedimentaria

La cobertera sedimentaria en el área del Macizo difiere del patrón estructural de éste, debido a la naturaleza de las rocas. Aquí se encuentran rocas afectadas por fallamiento de diferente tipo y por plegamientos.

- **Falla La Cristalina**

El contraste de las rocas cristalinas del Macizo de Santander con las rocas sedimentarias de esta zona es debido a esta falla, que es una estructura regional de tipo normal, con rumbo N25W y una inclinación aproximada de 70° al NE. Esta falla se distingue fácilmente por el contraste litológico, presencia de facetas triangulares, escarpes y estrías de falla.

- **Falla Río Sucio**

Falla de rumbo sinistral con componente de tipo inverso, presenta inclinación de 60° al E, poniendo en contacto las formaciones Los Santos y Tablazo. Esta estructura se hace evidente a partir de observaciones de campo, en fotografías aéreas, imágenes satelitales y modelo digital de elevaciones, y se traza siguiendo el curso de la quebrada Río Sucio.

- **Falla Colmillona**

Es una falla de tipo inverso de bajo ángulo, observándose el cabalgamiento de la formación Los Santos sobre las formaciones Rosablanca, Paja y Tablazo; con dirección N55E e inclinación de 30° al norte, tiene una extensión de 3.25 km.

- **Falla Antenas de Caracol**

Su rumbo es semiparalelo a la falla El Picacho N26E, el plano de la falla se encuentra inclinado al W y presenta componente normal. Esta falla afecta la Formación Rosablanca y más hacia el sur, pone en contacto las formaciones Los Santos y Rosablanca. Tiene extensión de aproximadamente 4 km.

1.2.4 Pliegues

- **Sinclinal El Alto**

Es una estructura sobresaliente al NE del área, cuyo eje presenta un rumbo variable de N55W a N25W; el núcleo del sinclinal lo constituyen rocas de la Formación Tablazo. El flanco occidental se encuentra disectado por la falla La Colmena. En el flanco oriental aparecen las formaciones Rosablanca, Paja y Tablazo.

- **Sinclinal El Gramal**

Localizado hacia el centro de la secuencia sedimentaria. Es una estructura abierta, asimétrica cuyo eje presenta un rumbo N23W. En el núcleo aparece la Formación Tablazo, truncado al sur por la Falla La Loma.

- **Sinclinal Pantanos**

Localizado al NE del área, su eje presenta un rumbo N28W. El núcleo de la estructura lo constituye la Formación Tablazo, desviado al W por la Falla Otuel. En ambos flancos E, se encuentran las formaciones Paja y Rosablanca y en el flanco W, aflora la Formación Los Santos al norte y la Formación Rosablanca al sur.

2. GEOELÉCTRICA

La toma de información geoelectrica se llevó a cabo en gran porcentaje sobre la zona elevada del Páramo de Berlín, orientada a verificar el espesor de los depósitos cuaternarios, así como el espesor de la zona meteorizada principalmente. En la zona de trabajo afloran unidades litológicas tales como la Formación Silgará (pDs), el Ortoneis de Berlín (pDo), las cuarzomonzonitas de Santa Bárbara (Jcs) y de La Corcova (JTRcg), y sedimentos cuaternarios pertenecientes a los depósitos Fluvio-glaciares.

La distribución espacial de SEV en la zona de estudio se realizó sobre el modelo digital de terreno de la NASA, con resolución de 10' (30.7598 m). Se llevaron a cabo las mediciones de resistividad eléctrica con miras a elaborar perfiles de información del subsuelo mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), utilizando el arreglo simétrico tipo Schlumberger, con un AB/2 máximo de 700 m.

Un análisis de las resistividades encontradas a partir de una muestra de 128 capas interpretadas (18 SEV's), permite agruparlas en *Rangos de Resistividades* de acuerdo a la correlación litológica tanto para materiales saturados con porosidad primaria, como para rocas con porosidad secundaria con varios grados de afectación; se involucran en las altas resistividades los diferentes materiales secos, ubicados principalmente en superficie, así como los muy consolidados a profundidad. Para efectos prácticos de esta primera aproximación regional, se propone una escala simplificada para tres rangos principales, las cuales se correlacionan así:

- Resistividades entre 5 y 210 ohm•m: materiales desde arcillosos, hasta arenosos y saprolito, saturados.
- El rango de 210 a 1008 ohm•m: rocas ígneas y metamórficas fracturadas, las cuales tendrían permeabilidad secundaria.
- Por último, resistividades altas (desde 1008 y hasta 24331 ohm•m, en este caso): rocas ígneas y metamórficas compactas, cuya resistividad es mayor cuanto menor sea su grado de fractura.

Con la información tomada en campo mediante los 18 SEV, se elaboraron cinco

cortes geoelectricos y mapas de iso-resistividad a diferentes profundidades. En los cortes geoelectricos se observa una marcada diferencia entre las zonas de porosidad primaria que se presentan sobre los valles aluviales, aunados a las zonas meteorizadas, con la saturación de los materiales con porosidad secundaria por efectos de foliaciones, diaclasamientos y fracturas, los cuales pasan a resistividades mucho más altas en profundidad, denotando la roca compacta. Los mapas de resistividad muestran la variación vertical de la distribución de resistividades, cuyas zonas potencialmente acuíferas van desapareciendo a profundidad.

2.1 CORTES GEOELÉCTRICOS

En el área se elaboraron 5 cortes geoelectricos, de los cuales dos de ellos tienen dirección noreste, uno con dirección cercana a W-E y los dos restantes con dirección noroeste. La Figura 4 ilustra la ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV's) realizados y los cortes geoelectricos planteados sobre la litología del área.

Apoyados en el Modelo Digital de Terreno y teniendo en cuenta los rangos de resistividades de acuerdo con las correlaciones litológicas, se entra a considerar la distribución de resistividades en cada uno de los cortes geoelectricos que se describen a continuación.

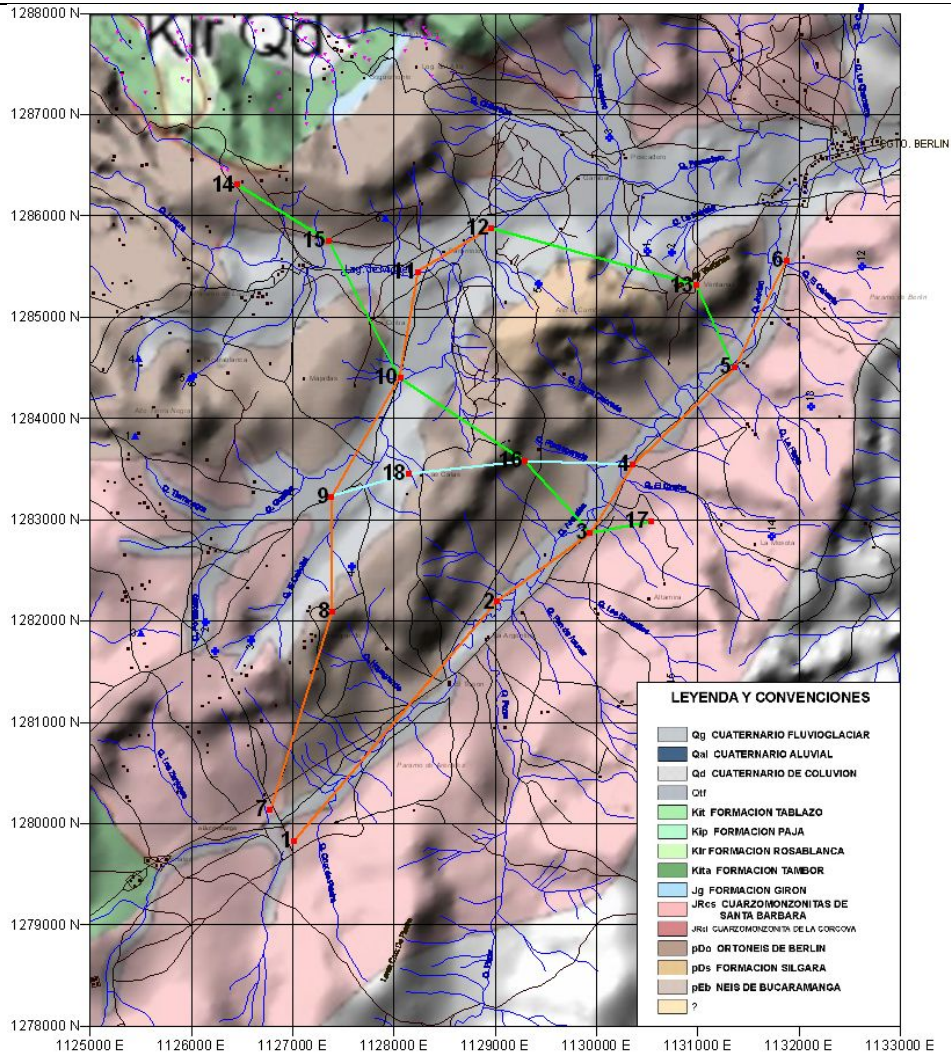


Figura 4. Mapa geológico sector de Berlín con ubicación de SEV's y cortes geoelectricos.

2.1.1 Cortes Geoelectricos N - E

Dos cortes geoelectricos se elaboraron longitudinalmente a las estructuras regionales, orientadas aproximadamente N42°E y N27°E.

2.1.1.1 Corte Geoelectrico NE-01

Atraviesa las planchas 121-I-A y 110-III-C; se inicia al suroeste del área, a lo largo de la vía que conduce al corregimiento de Berlín. Involucra los sondeos G1-08 B1, G1-08 B2, G1-08 B3, G1-08 B4, G1-08 B5 y G1-08 B6 y tiene una longitud de 7600 m (Ver Figuras 4 y 5).

Se aprecian resistividades en la parte superior hasta de 2881 ohm-m que se asocian a materiales secos. Una primera capa con resistividades entre 30 y 161

ohm-m se encuentran a profundidades entre 0 y 80 m, con espesores variables desde 17 m en el sondeo G1-08 B1 hasta 80 m aproximadamente en el sondeo G1-08 B4, correspondientes a sedimentos cuaternarios y roca meteorizada, posiblemente saturadas y pertenecientes al Ortoeis de Berlín.

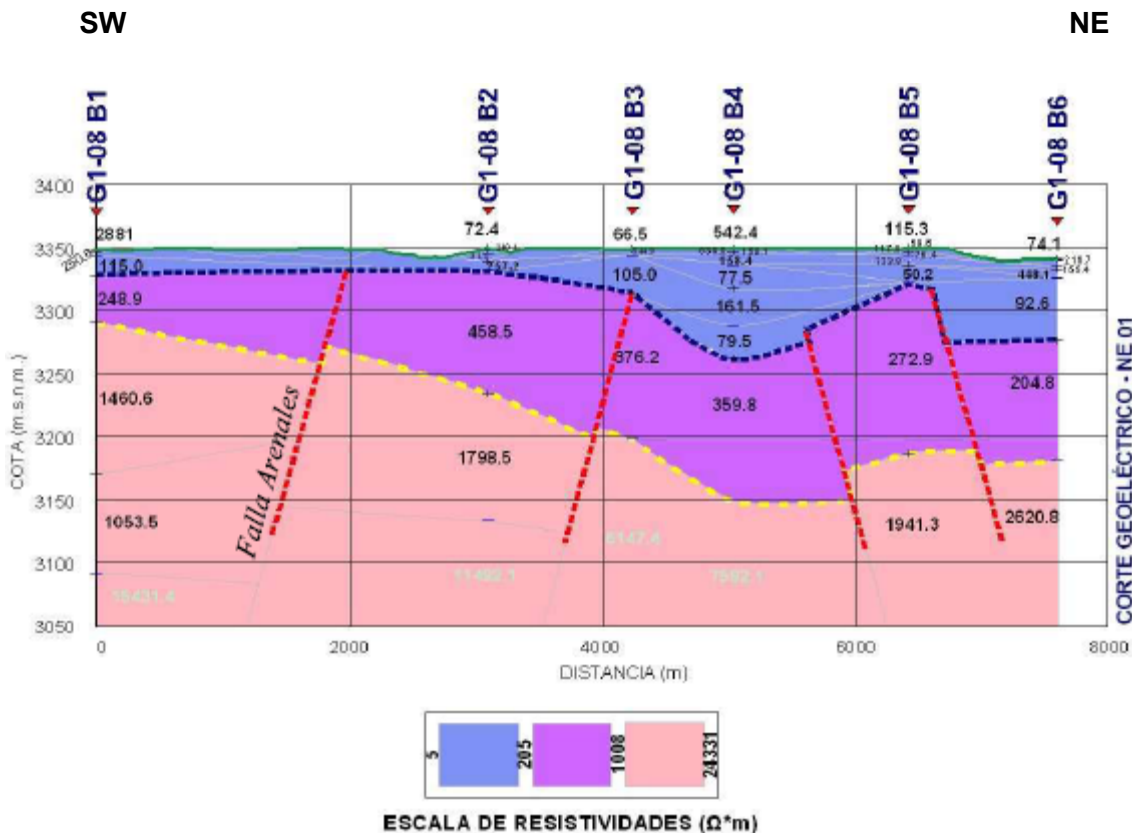


Figura 5. Corte Geoelectrico NE-01.

Una segunda capa continua se encuentra desde los 20 m aproximadamente de profundidad en el sondeo G1-08 B1 hasta 200 m de profundidad en el sondeo G1-08 B4, con resistividades desde 204.8 hasta 458.5 ohm-m y espesores variables desde 38.5 hasta 82.5 m, correspondientes a roca fracturada de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. Se estima que en esta franja pueden aparecer algunas zonas saturadas debido a fracturas y diaclasas ya que superficialmente se aprecian fallas como la de Arenales y lineamientos que están afectando el área.

La última capa a partir de los 50 m de profundidad en el extremo SW del corte y cada vez más profunda hacia el NE, donde alcanza los 150 m de profundidad, presenta resistividades desde los 1053.5 hasta 15431.4 ohm-m, correspondiente a

rocas con bajo a muy bajo grado de fracturas, pertenecientes posiblemente al Ortoneis de Berlín?

2.1.1.2 Corte Geoelectrico NE-02

Se ubica en la plancha 110-III-C, desde el sur de la vereda Ucatá y cruzando la divisoria de aguas hasta el valle de la quebrada La Ceiba. Lo conforman los sondeos G1-08 B7, G1-08 B8, G1-08 B9, G1-08 B10, G1-08 B11 y G1-08 B12, los cuales se ubican principalmente sobre los depósitos Cuaternarios, con una longitud de 6448 m (Ver Figuras 4 y 6). En este corte superficialmente se aprecian resistividades desde 17.1 hasta 6098.7 ohm-m correspondientes posiblemente a materiales secos Cuaternarios (Qg) o al Ortoneis de Berlín poco fracturado en algunas partes.

Se aprecia una primera capa desde los 9 m hasta los 40.5 m de profundidad en el extremo SW del corte, con resistividades de 52.9 hasta 216.8 ohm-m, adelgazándose en el sondeo G1-08 B8, para alcanzar su mayor espesor hacia el extremo NE del corte en el sondeo G1-08 B12, con 108 m de espesor y resistividades desde 50.5 hasta 101.2 ohm-m. Corresponden a sedimentos cuaternarios y posiblemente a una parte meteorizada del Ortoneis de Berlín, potencialmente saturadas.

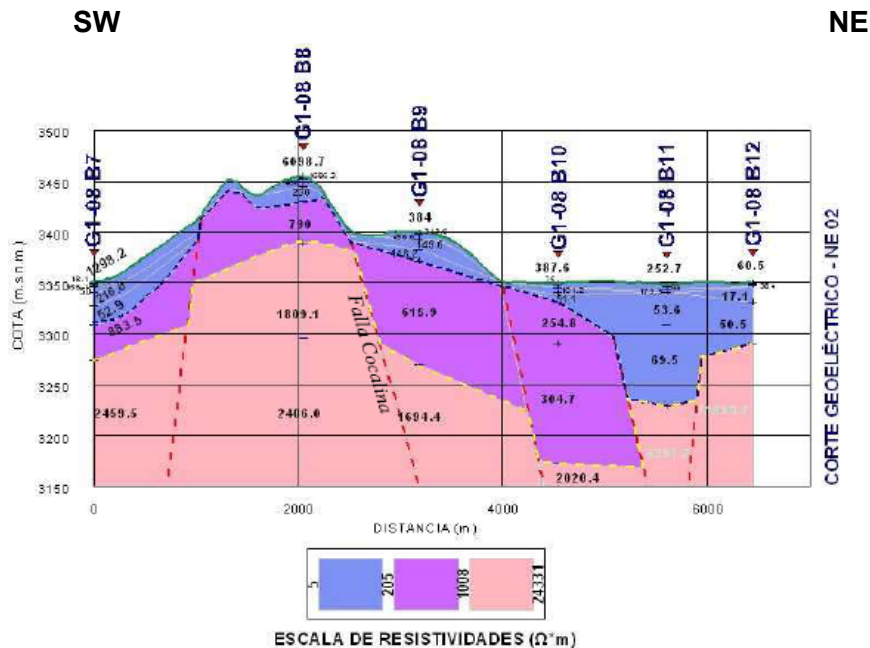


Figura 6. Corte Geoelectrico NE-02.

Una segunda capa continua desde los 40.5 hasta los 75 m de profundidad en el extremo SW, y desde los 19.5 hasta los 177 m de profundidad hacia el NE del corte, con resistividades entre 254.8 y 883.5 ohm-m, los espesores son variables y

siempre crecientes hacia el extremo NE del corte, desde 34.5 hasta 157.5 m. Esta segunda zona corresponde a rocas fracturadas del Ortoneis de Berlín, posiblemente con saturación por fracturas.

La última capa con resistividades desde 1694.4 hasta 21630.7 ohm-m representa rocas con muy baja a ninguna fractura, pertenecientes posiblemente al Ortoneis de Berlín y Formación Silgará.

Se observa en el corte, la amplitud de la zona asociada con los depósitos cuaternarios y saprofitos potencialmente saturados en los alrededores de la población de Berlín, donde se presenta el cruce de fallas que se insinúan en las discontinuidades geoelectricas, entre los sondeos G1-08 B10, G1-08 B11 y G1-08 B12, correlacionadas con las fallas La Cocalina y La Cristalina.

2.1.2 Cortes Geoelectricos N - W

2.1.2.1 Corte Geoelectrico NW-01

Ubicado en la plancha 135-II-C, cubre desde el valle de la quebrada Chitabara hasta la quebrada Jordán, cruzando la divisoria de aguas al suroeste de Berlín. Lo conforman los sondeos G1-08 B12, G1-08 B13 y G1-08 B5, ubicados sobre los depósitos cuaternarios y el Ortoneis de Berlín, con una longitud de 2992 m (ver figuras 4 y 7).

El corte geoelectrico muestra resistividades superficiales entre 484 y 2641.5 ohm-m, correspondientes a materiales secos. Hacia el extremo NW del corte, en el sondeo G1-08 B12 se aprecia una resistividad de 50.5 ohm-m entre los 17.4 y 58.6 m de profundidad, en un pequeño sector de 220 m en la horizontal y que se extiende hacia el NW, con un espesor de 41.2 m, pertenecientes a los depósitos fluvio-glaciares. Hacia la parte media y SE del corte se registran nuevamente resistividades de 71.6 ohm-m en el sondeo G1-08 B13 y desde 50.2 hasta 133.8 ohm-m en el sondeo G1-08 B5, hasta los 26 m de profundidad, para un espesor entre 28.5 y 38.6 m de los materiales con porosidad primaria saturados.

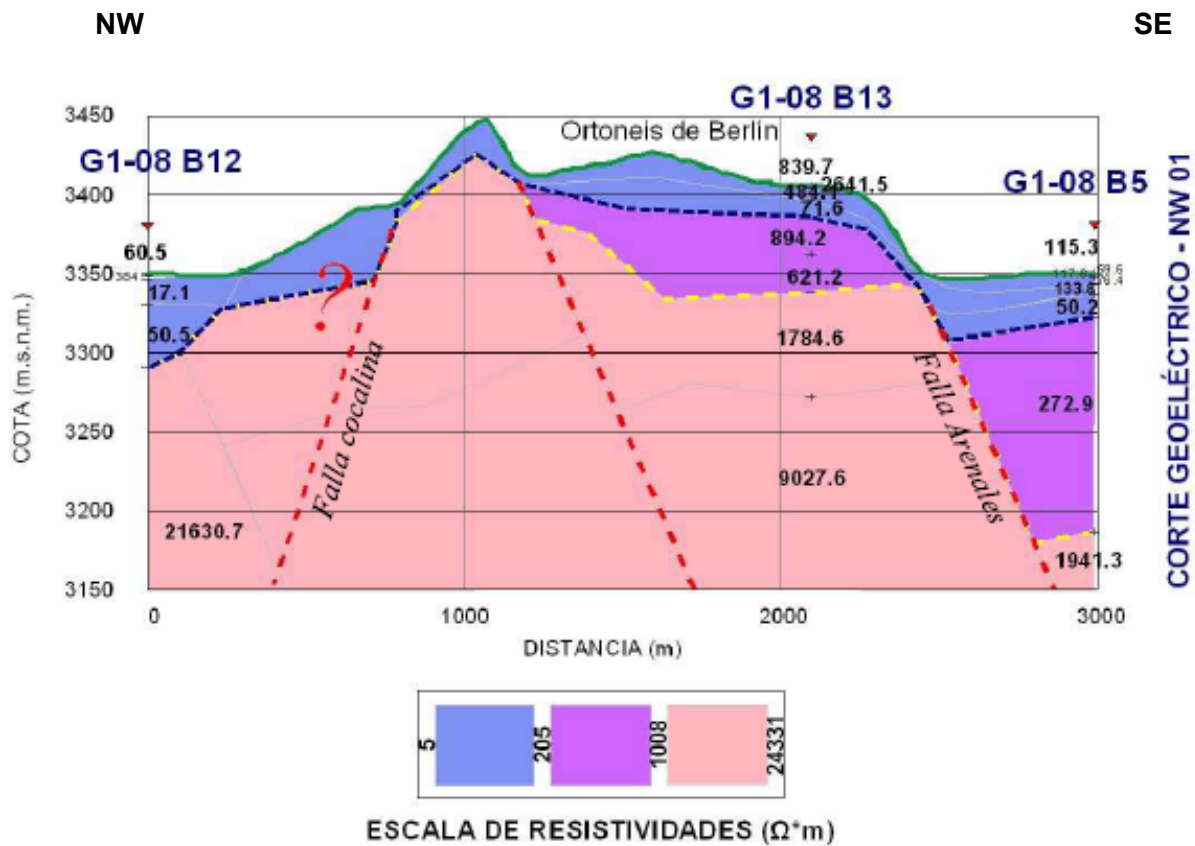


Figura 7. Corte geoelectrico Nw-01.

La capa correspondiente a rocas fracturadas del Ortoneis de Berlín, presenta resistividades entre 272.9 y 894.2 ohm-m y aparece en forma discontinua, profundizándose en el extremo SE del corte, siendo afectada por una falla en sentido suroeste. Se halla entre 27.5 y 164 m de profundidad bajo el sondeo SEV G1-08 B5, para 136.5 m de espesor, y entre 19 y 67.5 m en el sondeo G1-08 B13, para 48.5 m de espesor. Hacia el extremo NW del corte, estas resistividades se encuentran a pocos metros de la superficie, entre 6 y 14 m.

La tercera capa se presenta con resistividades desde los 1784.6 hasta los 21630.7 ohm-m, correspondiendo a materiales cada vez menos fracturados del Ortoneis de Berlín y la Formación Silgará, los cuales se ubican a partir de los 50 m de profundidad en el extremo NW del corte; desde los 67.5 m en el sondeo G1-08 B13, y desde los 165.8 m en el sondeo G1-08 B5.

2.1.2.2 Corte geoelectrico NW-02

Cruza la vereda Ucatá desde el noroeste hacia el sureste, uniendo los valles de las quebradas La Ceiba, El Cebollal y Jordán. Involucra los sondeos G1-08 B14, G1-08 B15, G1-08 B10, G1-08 B16, G1-08 B3 y G1-08 B17, ubicados sobre los depósitos Cuaternarios, el Ortoneis de Berlín y finalmente la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, con una longitud de 5637 m y localizados en la plancha 110-III-C (Ver Figuras 4 y 8).

En el corte geoelectrico aparece una capa superficial con resistividades variables desde 8 hasta 1674.1 ohm-m, que pueden corresponder a materiales secos o poco fracturados. La primera capa de interés hidrogeológico, es una capa continua hacia el NW del corte, con una extensión de unos 3000 m en la horizontal, con resistividades bajas aportadas en los sondeos G1-08 B14, G1-08 B15 y G1-08 B10, correspondientes a los depósitos Cuaternarios y rocas meteorizadas del Ortoneis de Berlín, posiblemente saturadas, que van desde los 44.4 hasta los 102.8 m de profundidad en el sondeo G1-08 B14, para un espesor de 58.4 m, y desde los 12.4 m hasta los 101 m de profundidad con resistividades desde 40 a 109.6 ohm-m en el sondeo G1-08 B15, para 88.6 m de espesor, la cual se va adelgazando hacia el SE en el sondeo G1-08 B10, hasta un espesor de 14.6 m.

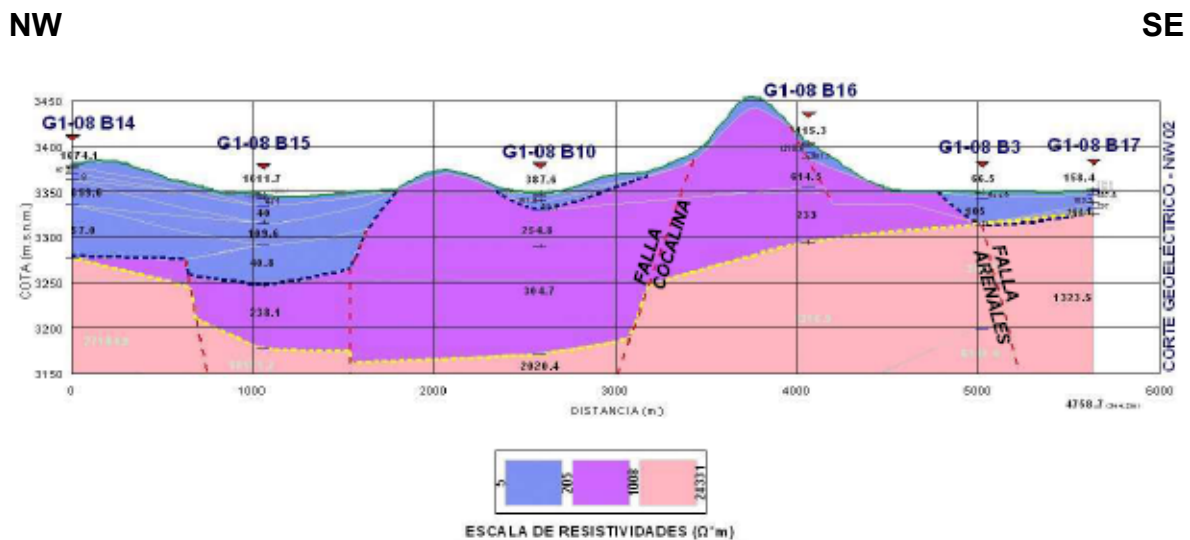


Figura 8. Corte geoelectrico NW-02.

Nuevamente estas resistividades bajas aparecen hacia el SE del corte en los sondeo G1-08 B3 y G1-08 B17 a partir de los 7.3 m y hasta los 37 m de profundidad, correspondientes a la parte superficial meteorizada de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara.

Una segunda zona, perteneciente al Ortoneis de Berlín, con resistividades entre 233 y 614.5 ohm-m aparece distribuida a todo lo largo del perfil, alcanzando su

mayor espesor de unos 156 m en la parte central del corte, bajo el sondeo G1-08 B10, en el cual se encuentra desde los 20 m de profundidad; esta capa se adelgaza hacia los sondeos G1-08 B14 y G1-08 B3 y prácticamente desaparece en el sondeo G1-08 B17. Los materiales dan respuesta a rocas fracturadas, posiblemente saturadas.

La última capa, con resistividades desde 1323.5 hasta 2020.4 ohm-m corresponde posiblemente a rocas con muy bajo a bajo fracturamiento del Ortoneis de Berlín y la Formación Silgará. A partir de aquí se aprecian resistividades desde 4316.9 y cada vez mayores hasta alcanzar 27144.9 ohm-m, correspondiendo a la roca fresca.

La ubicación de este perfil en el relieve, exhibe el poco espesor de los depósitos Cuaternarios; sin embargo, hacia el noroeste, donde la cuenca se empieza a rellenar con sedimentos Cretácicos y Cuaternarios, se muestran franjas potencialmente saturadas en la cuenca, enmarcadas por las discontinuidades geoelectricas asociadas posiblemente a fallas de distensión?

El modelo simplificado se presenta aquí, donde se dibuja el posible espesor del Ortoneis de Berlín con resistividades en el rango entre 210 y 1008 ohm-m y la amplitud de la zona potencialmente saturada hacia el noroeste, con resistividades menores de 210 ohm-m.

2.1.3 Corte Geoelectrico W - E

Tiene su inicio en la cuenca de la quebrada El Cebollal, cruzando la divisoria de aguas hasta la quebrada Jordán, en la vereda Ucatá. Ubicado en la plancha 110-III-C, lo conforman los sondeos G1-08 B9, G1-08 B18, G1-08 B16 y G1-08 B4, con 3016 m de longitud (Ver Figuras 4 y 9). Se realizaron los sondeos sobre los depósitos Cuaternarios y rocas meteorizadas del Ortoneis de Berlín.

El corte geoelectrico presenta resistividades superficiales hasta 1035.4 ohm-m, correspondientes a materiales secos o poco fracturados. En la parte oeste del corte, se observan resistividades desde 90.6 hasta 149.6 ohm-m bajo los sondeos G1-08 B9 y G1-08 B18, formando una delgada capa de unos 26.2 m de espesor a partir de los 3.2 m de profundidad, correlacionada con los depósitos fluvio-glaciares y posiblemente con la parte meteorizada del Ortoneis de Berlín.

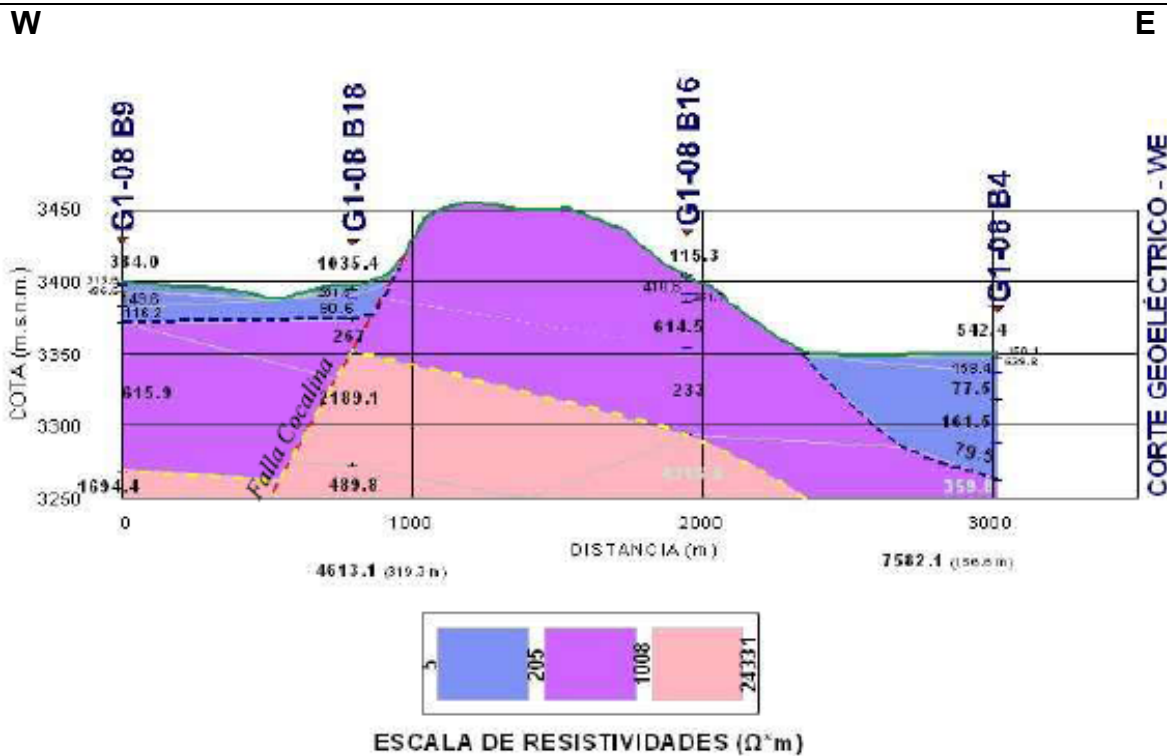


Figura 9. Corte geoelectrico W-E

En el extremo oriental del corte, se encuentran estas resistividades variando entre 77.5 y 161.5 ohm-m bajo el sondeo G1-08 B4, a partir de los 3.2 m de profundidad, para un espesor de 84.7 m. Estas resistividades se correlacionan con los depósitos cuaternarios y rocas meteorizadas del Ortoneis de Berlín, posiblemente saturadas, que aparecen como una zona discontinua la cual se adelgaza hacia el sondeo G1-08 B16.

Una zona continua en sentido horizontal, con resistividades desde 233 hasta 614.5 ohm-m, se presenta a partir de los 28.2 m de profundidad al oeste del corte, la cual va aumentando su espesor hacia el este, con un máximo de 92.7 m en el sondeo G1-08 B16; estas resistividades se relacionan con rocas fracturadas y posiblemente saturadas del Ortoneis de Berlín.

En la parte inferior de la capa con resistividades entre 2189.1 y 4316.9 ohm-m y que se presentan también en el extremo oeste del corte, se ubica una resistividad menor, con 489.8 ohm-m, a partir de los 124.2 m de profundidad en el sondeo G1-08 B18, con un espesor aproximado de 101.4 m; esta resistividad podría deberse a mayor grado de fracturas por efecto de la falla adyacente.

La capa con resistividades entre 2189.1 y 4316.9 ohm-m, se aprecia en el corte en una extensión de 2300 m aproximadamente en sentido horizontal, desde los 28.2 m de profundidad y profundizándose hacia el este; presenta su mayor espesor en

el sondeo G1-08 B18 con 79.8 m. Se correlaciona con rocas de bajo a muy bajo fracturamiento del Ortoneis de Berlín posiblemente.

2.2 MAPAS DE ISO-RESISTIVIDADES

Se presentan en la Figura 10 los mapas de iso-resistividades a diferentes profundidades, de acuerdo con la progresión geométrica de las aberturas AB/2. Se emplea para mayor sensibilidad de los cambios, los tres rangos de resistividades definidos.

En estos mapas de iso-resistividades se destaca la cuenca ubicada al oeste de la población de Berlín (Sondeos G1-08 B11, G1-08 B12 y G1-08 B15), donde desde la profundidad de 10 m hasta los 47 m, las resistividades son menores a los 121 ohm-m y consideradas en este modelo como materiales saturados, mientras que a mayor profundidad (247 m) disminuyen, posiblemente debido a la detección de las rocas cretácicas y particularmente característicos de la Formación Paja, cuyas aguas ácidas disminuyen los valores de resistividad (menores de 35 ohm-m).

Por el valle de la quebrada Jordán y con dirección aproximada N42°E, por donde atraviesa la vía, la profundidad de los depósitos Cuaternarios es muy escasa, al observar el mapa de profundidad de -30 m, donde las resistividades son superiores a los 349 ohm-m, consideradas altas para sedimentos saturados; corresponderían entonces posiblemente con materiales metamórficos fracturados.

Desde los 92 m de profundidad y en diferentes sitios, las resistividades se incrementan, superando los 1008 ohm-m, sugiriendo la aparición de las rocas ígneas, con excepción del nivel -227 m de profundidad donde se observa debajo de los sondeos G1-08 B11, G1-08 B12 y G1-08 B15 unas zonas de bajas resistividades asociadas posiblemente a los materiales sedimentarios que se presentan desde esta parte noroeste del área.

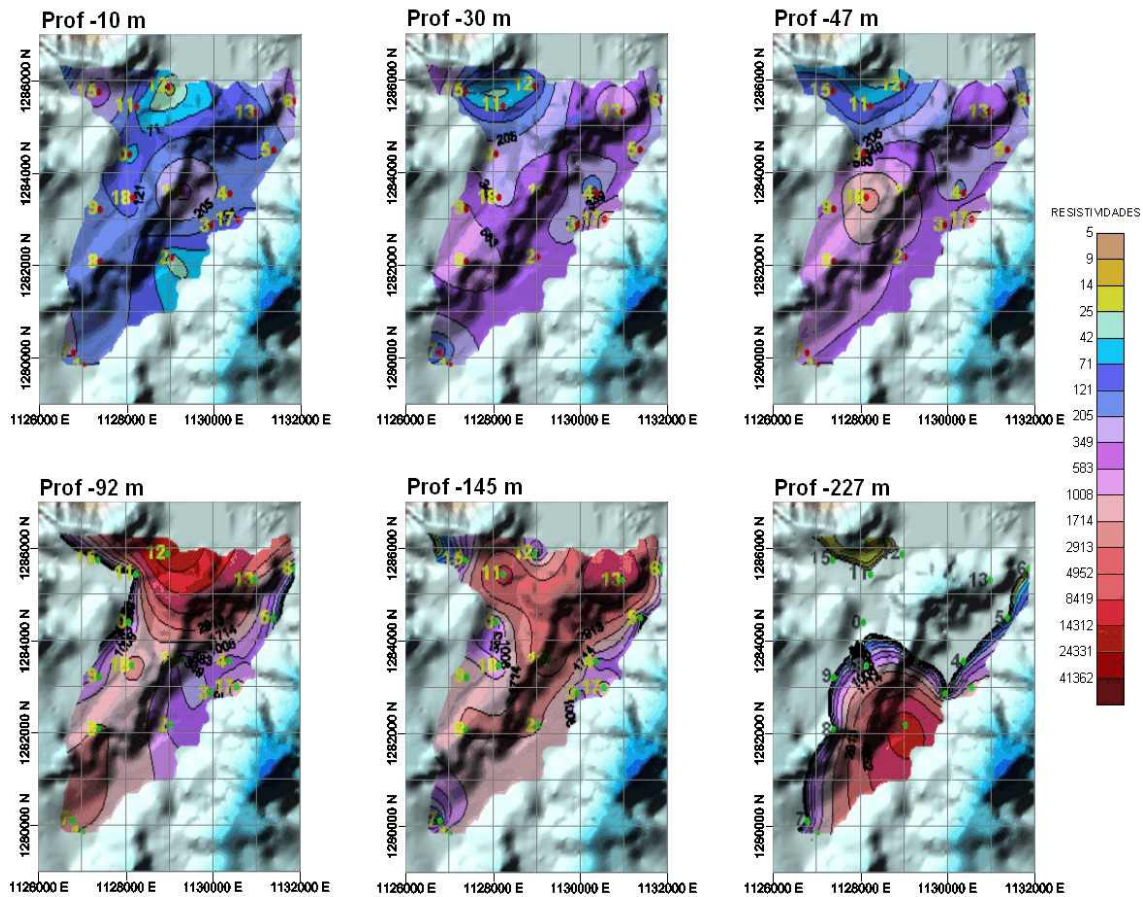


Figura 10. Mapas de iso-resistividades a diferentes profundidades.

2.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con los elementos expuestos en los capítulos anteriores, se retoman algunos de los fenómenos observados en la investigación geoelectrica llevada a cabo en la región del Páramo de Berlín, jurisdicción del municipio de Tona en Santander.

Se presentan a grandes rasgos tres categorías de resistividades que se han asociado de acuerdo con el objetivo de la investigación, conducente a la identificación de aguas subterráneas en estas Unidades y en primera instancia, al espesor de los depósitos Cuaternarios.

De las observaciones de campo, relacionadas con el estado de meteorización de las rocas aflorantes, se tiene que una gran parte de ellas son acuíferos potenciales y por su naturaleza, se comportan como sedimentos porosos, los cuales yacen en muchos sitios debajo de las unidades Cuaternarias, llegándose a confundir desde el punto de vista eléctrico, puesto que éstos depósitos se formaron a partir de las mismas Unidades de roca meteorizada, lo cual les confiere resistividades semejantes (Figura 4.1). Es por esta razón que los espesores de los depósitos Cuaternarios no siempre pueden diferenciarse de estas zonas de meteorización,

de tal forma que para este trabajo regional, se han fusionado en esta correlación litológica, como materiales granulares, con porosidad primaria y cuyas resistividades asociadas son del orden de 5 a los 205 ohm-m (Figura 11).



Figura 11. Manantial a partir de la roca meteorizada.

El segundo conjunto identificado corresponde a una franja relativamente amplia de resistividades, a partir de los 205 ohm-m hasta los 1008 ohm-m. Se clasificaron aquí materiales asociados con rocas metamórficas que por su esquistosidad y grado de fracturas poseen alguna saturación entre las grietas que dejan estos rasgos estructurales, por lo tanto sus valores de resistividad se han estimado que pueden estar cercanos a este rango, incluyendo materiales ígneos muy fracturados, según se observó en la geología realizada. Seguramente en la medida en que se verifiquen los valores de ésta propuesta con perforaciones en el área, podrá ajustarse mejor el rango asignado, el cual podrá ser diferente si se trata de rocas ígneas o metamórficas.

Una tercera franja o rango de valores se ubica arriba de los 1008 ohm-m y que en este trabajo se encontró como valor máximo de resistividad el de 27144.9 ohm-m, en una capa geoelectrica que se inició a los 102.1 m de profundidad bajo el sondeo G1-08 B14, ubicado en el extremo noroeste del área de trabajo. Estas resistividades se correlacionan entonces con rocas cristalinas (ígneas o metamórficas) compactas y cada vez más compactas según crezca su valor de resistividad.

Con relación a la parte estructural, se observaron en los cortes geoelectricos algunas discontinuidades geoelectricas que generalmente tienen su explicación, igualmente en discontinuidades litológicas, coincidentes muchas veces con fallas regionales y locales.

Regionalmente se presentan en el área fallas y lineamientos, quedando enmarcada la zona de trabajo por dos de ellas como son las fallas Arenales y La Cocalina, donde la Falla Arenales de tipo dextral y dirección cercana a los $N2^{\circ}E$, atraviesa en sentido noreste toda la zona de trabajo; la Falla La Cocalina ubicada al norte de la anterior es de tipo sinextral con rumbo $N72^{\circ}E$ y una extensión de 3.5 km; en la parte más occidental de la falla tiene un comportamiento E-W. Esta falla rompe la pendiente estructural de la Formación Los Santos que viene desde El Picacho formando dos bloques. Hacia el oeste pone en contacto la Formación Silgará y el Ortoneis de Berlín.

Estas dos estructuras se observaron en los cortes geoelectricos NE-01, NE-02 y W-E (Figuras 5, 6 y 9), sin embargo se hallaron una serie de discontinuidades en los cortes noreste, denotando estructuras transversales a las fallas principales, como se muestra en los cortes geoelectricos de las Figuras 5 y 6. Aquí cabe anotar que posiblemente, las discontinuidades que se presentan en el corte geoelectrico NE-01, obedecen al cruce sucesivo de la dirección del corte con la Falla Arenales, ya que los puntos hacen un zig-zag con el trazo de la misma; no obstante, en el corte NE-02 sí se manifiesta el escalonamiento descendente hacia el noreste de los bloques, formando una fosa bajo el sondeo G1-08 B11, donde se presenta la mayor profundidad de los materiales potencialmente saturados.

Con base en las tres zonas de resistividad planteadas, se presenta de manera muy general debido a la baja densidad de información, la superficie base de los materiales fracturados (Interfase con resistividad de 1008 ohm-m), en la cual se manifiestan las estructuras transversales a las fallas principales; aquí se aprecia un quiebre de esta superficie en dirección noroeste por el centro del área y escalones tanto al norte como al sur del quiebre central (Figura 12). Se observa además una discontinuidad paralela a la Falla Arenales y una depresión hacia el oeste, por el trazo de la Falla La Cocalina. Esta misma situación se traslada más abajo, en la superficie de resistividad 5000 ohm-m (Figura 13).

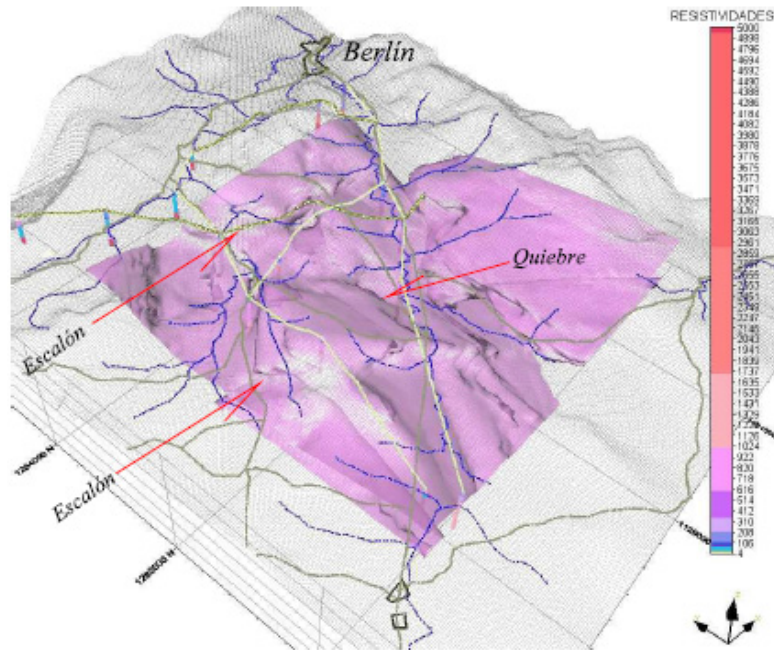


Figura 12. Superficie con resistividad de 1008 ohm-m donde se manifiestan quiebres con dirección noroeste.

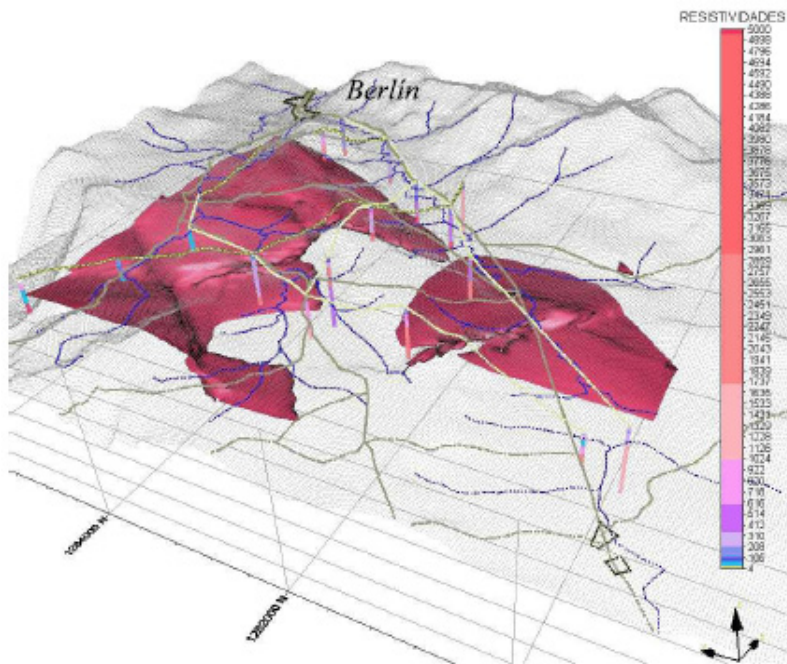


Figura 13. Superficie con resistividad de 5000 ohm-m donde se manifiestan escalones con dirección noroeste.

Los planos de resistividad a diferentes profundidades (figura 14), muestran también estas estructuras como es el caso de los niveles de resistividades a 3250 y 3350 msnm, donde la Falla Arenales es muy clara hacia superficie, mientras que en el plano más profundo, son las estructuras transversales las que empiezan a manifestarse.

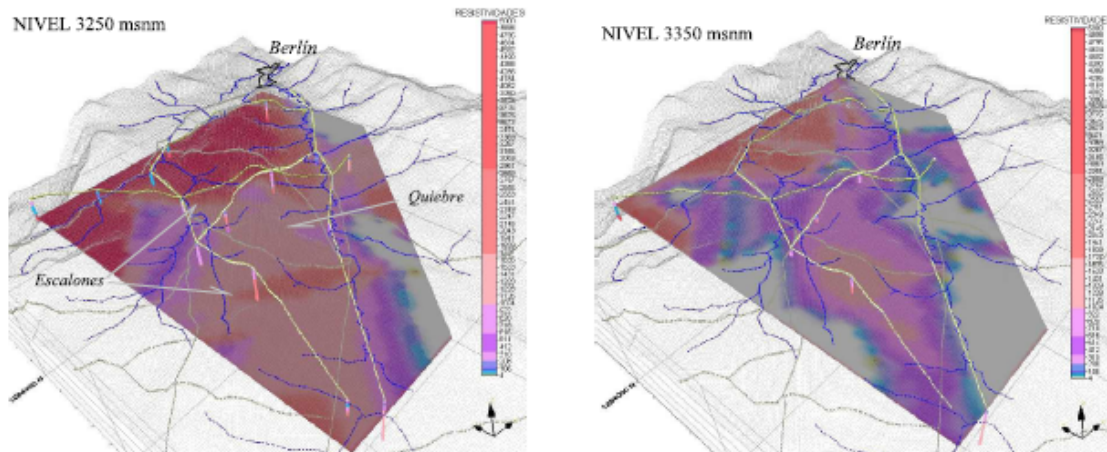


Figura 14. Planos de iso-resistividad a 3250 y 3350 msnm donde se manifiestan los trazos de las fallas noreste y los escalones con dirección noroeste.

2.4 CONCLUSIONES

Como conclusiones del trabajo geoelectrico realizado en la región del Páramo de Berlín, jurisdicción del municipio de Tona - Santander se tiene:

- Las resistividades encontradas en esta zona denotan que hay áreas potencialmente susceptibles para la explotación de aguas subterráneas.
- Se identificaron en forma general tres rangos o conjuntos de resistividades, asociadas con los diferentes estados de las rocas, sedimentos o depósitos Cuaternarios allí presentes. Estos rangos se correlacionaron así:

Resistividades entre 5 y 210 ohm-m: materiales desde arcillosos, hasta arenosos y saprolito, saturados.

El rango de 210 a 1008 ohm-m: rocas ígneas y metamórficas fracturadas, las cuales tendrían permeabilidad secundaria.

Por último, **resistividades altas** (desde 1008 y hasta 24331 ohm-m, en este caso): rocas ígneas y metamórficas compactas, cuya resistividad es mayor cuanto menor sea su grado de fractura.



La escala de resistividades diseñada de forma logarítmica permite realizar tanto correlaciones de grandes paquetes litológicos, así como sensibilizar al grado deseado las correlaciones litológicas; así vemos como los cortes geoelectricos simplificados dejan ver unas condiciones aptas para el objetivo propuesto, mientras que para el detalle estructural es más visible cuanto más se detalle la escala.

3. HIDROLOGÍA

Estudiar el comportamiento de las componentes del ciclo hidrológico en la escala de la cuenca hidrológica, ayuda a estimar cantidades disponibles de agua (en forma aproximada), visualizar las rutas y caminos que puede seguir el agua, así como identificar posibles almacenamientos y salidas. De esta forma la búsqueda de soluciones a los problemas relacionados con las limitaciones del recurso hídrico y las propuestas de proyectos de aprovechamiento del recurso pueden llegar a ser más efectivas. Igualmente el conocimiento de los sistemas físicos (geológicos e hidrológicos) que componen una región permite plantear proyectos sostenibles para las comunidades.

Los balances hídricos son herramientas que permiten cuantificar en forma aproximada los ingresos y egresos de agua en una región, instrumentos que se basan en la formulación de las ecuaciones de conservación de masa en un volumen de control de una columna de suelo, atmósfera y la unión de las dos. La ecuación de conservación al ser aplicada en diferentes escalas de tiempo presenta diversas connotaciones; la escala anual de largo plazo (promedios de decenas de años) permite minimizar el término de almacenamiento temporal y obtener una cantidad disponible del recurso en esa escala; sin embargo esta metodología limita y algunas veces ignora algunos efectos importantes, entre otros la infiltración y/o recarga que ocurren en escalas temporales menores.

El objetivo de realizar los balances hídricos de largo plazo en este trabajo es estimar el estado de la oferta hídrica y definir valores de recarga potencial a los acuíferos de la región de estudio. La validez de los resultados está basada en la disponibilidad y confiabilidad de la información.

En el caso de balance de largo plazo, el volumen de control sobre el que se aplica la ecuación de conservación de masa es la cuenca hidrológica, aquí la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL).

La ecuación aplicada tendrá como resultado un promedio multianual de agua disponible para infiltrarse, que es la RECARGA POTENCIAL.

$$P - Q - ETR - A \pm \varepsilon = \frac{ds}{dt}$$

Donde P es la precipitación, Q la escorrentía (involucra el flujo superficial, flujo subterráneo, flujos desde y hacia otras cuencas, etc) y ETR , la evapotranspiración real, todas estas variables son promedios de largo plazo, se supone que la variación en el almacenamiento o almacenamiento temporal, ds/dt , es nula en el largo plazo, siempre y cuando el sistema se encuentre en equilibrio.

El término ε , involucra los errores en las mediciones de los instrumentos y las componentes del sistema que no han podido ser tenidas en cuenta, como la interceptación, la evaporación desde la lluvia, salidas no cuantificadas, evaporación desde el nivel freático, etc.

El factor A involucra las pérdidas por efecto antrópico, definido como la cantidad de agua necesaria para desarrollar las actividades del hombre, que no retorna al sistema en la escala de tiempo considerada. Estas pérdidas se consideran como salidas del sistema.

De esta forma la Recarga Potencial (RP) se obtendrá de operar las siguientes variables promedias, bajo el supuesto de un sistema en equilibrio:

$$RP = P - Q - ETR - A \pm \varepsilon$$

A continuación se describirá cada una de las variables usadas para llevar a cabo el balance hídrico en la CSRL.

a. Precipitación

La precipitación en la zona de estudio se encuentra influenciada principalmente por su ubicación geográfica en el trópico y definida por las oscilaciones de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la influencia de los vientos alisios, la orografía local y regional (entre baja y muy altas pendientes), así como los frentes húmedos provenientes de los océanos Atlántico y la región Amazónica conforman los principales factores en el proceso de formación de la precipitación.

Se utilizaron 31 estaciones distribuidas en la cuenca y en cercanía a ella, estaciones que cumplen con características de resolución temporal y periodo de registro común (18 años). Estas estaciones han sido manejadas por diferentes entidades: Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Comité de Cafeteros (FNC) y Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB).

El IDEAM opera 22 estaciones, CENICAFE 4 estaciones, la CDMB 5 estaciones, el AMB maneja una estación. En la Tabla 1 se presenta la información general de las estaciones utilizadas para realizar este trabajo y se observa, ubicación, altitud y tipo de estación. En la Figura 15 se muestra la distribución espacial de dichas estaciones observándose que la zona posee una red aceptable de estaciones

climatológicas cubriendo buena parte del área de la cuenca. Existen varias clases de estaciones: SP: Sinóptica principal, CP: Climatológica principal, CO: Climatológica ordinaria, PG: Pluviográfica, PM: Pluviométrica.

Tabla 1. Estaciones Hidroclimáticas en la cuenca Superior del río Lebrija.

IDEAM										
No	Tipo	Estaciones	Periodo		Municipio	Coordenadas				Altura
			F. Inicio	F. Final		Este	Norte	Latitud	Longitud	
1	SP	Apto Palonegro	01/01/1982	31/12/2004	Lebrija	1099190	1279557	07 07 34	73 10 59	1189
2	CP	Berlín	01/01/1982	31/12/2004	Tona	1133945	1286396	07 11 14	72 52 06	3214
3	PG	Bucaramanga	01/11/1996	31/12/2004	Bucaramanga	1105512	1279816	07 07 42	73 07 33	1025
4	CO	Cachiri_2	01/01/1982	31/12/2004	Surata	1120243	1317948	07 28 22	72 59 30	1850
5	PM	El Naranjo	01/01/1982	31/12/2004	Lebrija	1086255	1288290	07 12 19	73 18 00	825
6	PM	El Pantano	01/01/1982	31/12/2004	Girón	1094399	1230084	06 40 44	73 13 38	1280
7	PM	El Picacho	01/01/1982	31/12/2004	Tona	1123563	1277828	07 06 36	72 57 45	3310
8	PG	Granja P/cuesta	01/06/1982	31/12/2004	Piedecuesta	1111958	1264897	06 59 36	73 04 04	1000
9	CP	Hda Trigueros	01/04/1996	31/12/2004	Girón	1079864	1274085	07 04 37	73 21 29	400
10	PM	Himat_R.11	13/06/1984	31/02/1989	Bucaramanga	1104686	1278524	07 07	73 08	1010
11	PG	La Floresta	01/01/1982	31/12/2004	Bucaramanga	1105735	1275607	07 05 25	73 07 26	925
12	PM	La Galvicia	01/01/1982	31/12/2004	Floridablanca	1113124	1279371	07 07 27	73 03 25	1779
13	PM	La Laguna	01/01/1982	30/11/2004	Lebrija	1095824	1274328	07 04 44	73 12 49	1050
14	PG	La Parroquia	01/01/1982	31/12/2004	Girón	1083087	1273906	07 04 31	73 19 44	267
15	CO	Llano Grande	01/01/1982	31/12/2004	Girón	1100961	1268438	07 01 32	73 10 02	777
16	PM	Matajira	01/01/1982	31/12/2004	Matanza	1112243	1289201	07 12 47	73 03 53	996
17	PM	Palmas	01/01/1982	31/12/2004	Lebrija	1095305	1288951	07 12 40	73 13 05	855
18	PM	Palogordo	01/01/1982	31/12/2002	Girón	1104708	1262055	06 58 04	73 07 58	950
19	CO	UIS	01/01/1982	31/12/2002	Bucaramanga	1105937	1281629	07 08 41	73 07 19	1018
20	PM	Vetas El Pozo	01/01/1982	31/12/2004	Vetas	1132805	1299852	07 18 32	72 52 42	3220

21	CO	Vivero Surata	01/01/1982	31/12/2004	Surata	1120671	1306120	07 21 57	72 59 17	1725
----	----	---------------	------------	------------	--------	---------	---------	----------	----------	------

CDMB										
No	Tipo	Estaciones	Periodo		Municipio	Coordenadas				Altura
			F. Inicio	F. Final		Este	Norte	Latitud	Longitud	
22	PG	CDMB	01/01/1987	31/12/2000	Bucaramanga	1105857	1279070	07 07 18	73 07 21	950
23	CO	Charta	01/01/1986	31/12/1999	Surata	1122280	1297072	07 17	75 28	1950
24	CO	El Rasgón	01/01/1987	31/12/2000	Piedecuesta	1119914	1270294	07 02 31	72 59 44	1950
25	PG	La Flora	01/01/1987	31/12/2000	Bucaramanga	1107543	1280894	07 08 17	73 06 27	1100
26	CO	PTAR	01/01/1987	31/12/2002	Girón	1104803	1273129	07 04 04	73 07 57	760

CENICAFE										
No	Tipo	Estaciones	Periodo		Municipio	Coordenadas				Altura
			F. Inicio	F. Final		Este	Norte	Latitud	Longitud	
27	PM	Bonanza	01/01/1987	31/12/2004	Girón	1101014	1272986	07 04	73 10	1250
28	PM	Ceylan	01/01/1987	31/12/2004	Bucaramanga	1105505	1282998	07 09 26	73 07 33	1300
29	PM	Miporal	01/01/1987	31/12/2004	Floridablanca	1108381	1273001	07 04	73 06	1237
30	CO	San Antonio	11/08/1992	31/12/2004	Floridablanca	1111733	1276956	07 06 08	73 04 11	1480

AMB										
No	Tipo	Estaciones	Periodo		Municipio	Coordenadas				Altura
			F. Inicio	F. Final		Este	Norte	Latitud	Longitud	
31	PM	La Granja	01/01/1987	31/12/2000	Charta	1112019	1293287	07 15	73 04	1240

Algunas estaciones, como Berlín y Cachiri se encuentran por fuera de la divisoria de agua de la cuenca, pero se tuvieron en cuenta porque ellas poseen información de variables climáticas necesarias para calcular los diferentes parámetros hidrológicos.

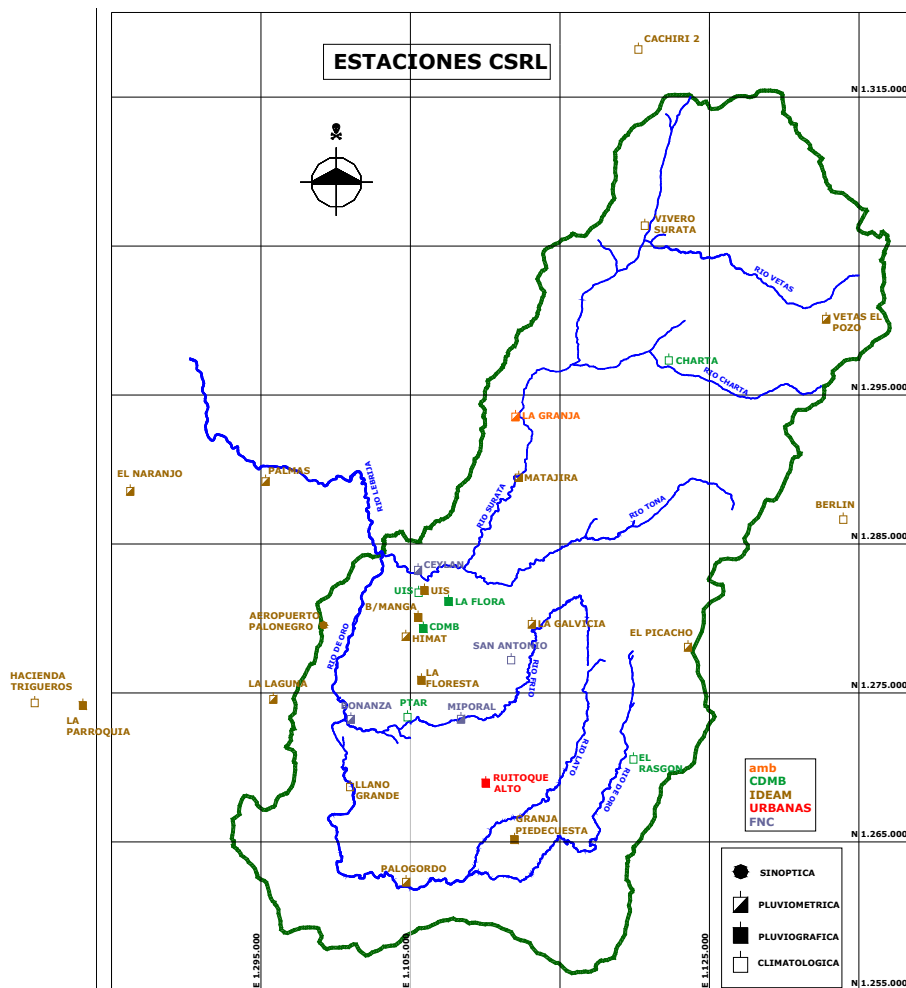


Figura 15. Localización espacial de las estaciones Hidroclimáticas.

La precipitación es una variable que presenta cambios en el espacio de la cuenca hidrológica (distribución espacial) de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y factores locales, es decir no llueve en forma constante en la cuenca, en zonas montañosas como la CSRL se presenta el efecto orográfico en donde por razón natural esta variación espacio-tiempo se observa más acentuado.

A partir de la distribución espacial se pudo estimar que en el área de estudio la precipitación se encuentra en un rango entre 770 y 1930 mm/año y una precipitación multianual promedio de 1217 mm/año, ver figura 16, valor utilizado en el balance hídrico.

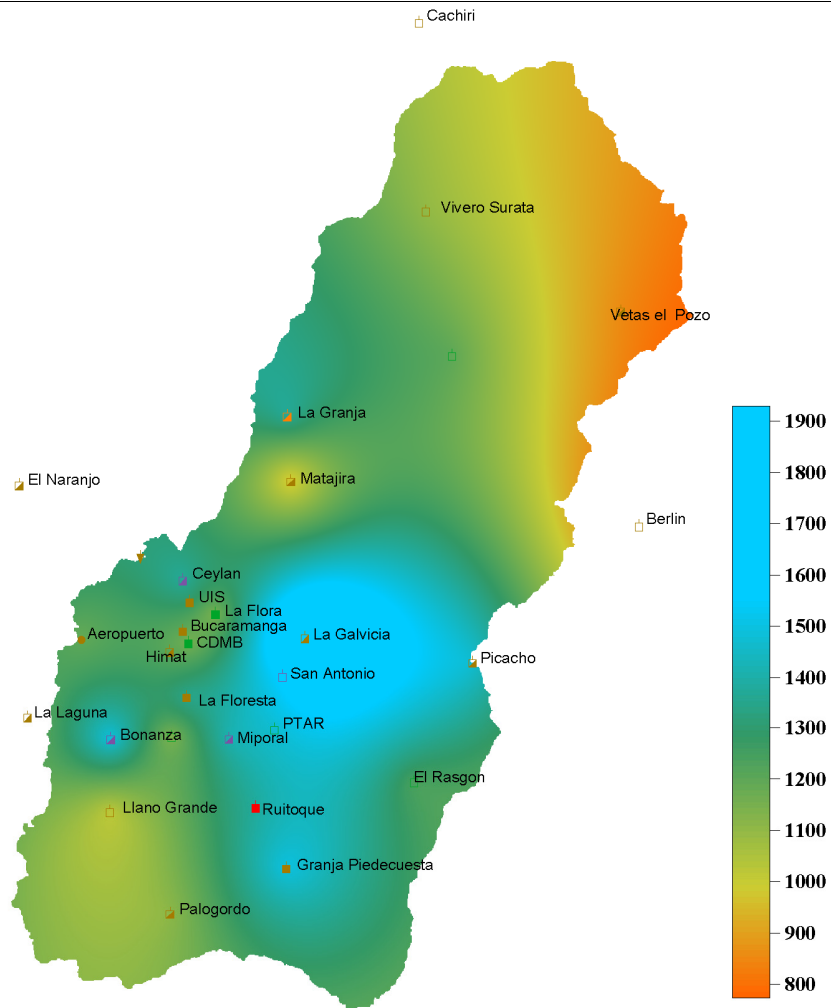


Figura 16. Distribución de la Precipitación Multianual en mm/año

b. Evapotranspiración

La evapotranspiración es el conjunto de los procesos de evaporación desde la superficie y la transpiración de las plantas. La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera y la evaporación es el fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor (Chow, 1994).

Como la evaporación y la transpiración son difíciles de medir por separado, se considera conjuntamente bajo el concepto de evapotranspiración, la cual es una salida de agua del sistema cuenca en un balance hídrico, por lo tanto es fundamental estimar adecuadamente esta componente.

En hidrología se distinguen dos conceptos de evapotranspiración, la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración potencial (ETP) es aquella que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas. La evapotranspiración real (ETR) es la que se produce en condiciones existentes de humedad, depende de la humedad disponible en el suelo. Estos dos valores serán iguales siempre que la humedad del suelo sea óptima, de lo contrario ETR será menor a ETP.

Los valores multianuales fueron distribuidos espacialmente y se obtuvo una ETR promedio de 690 mm/año (figura 17).

Al comparar los valores de ETR en la cuenca se tiene que estos oscilan entre los 690 y 780 mm/año, con un máximo del orden de 1.056 mm/ año.

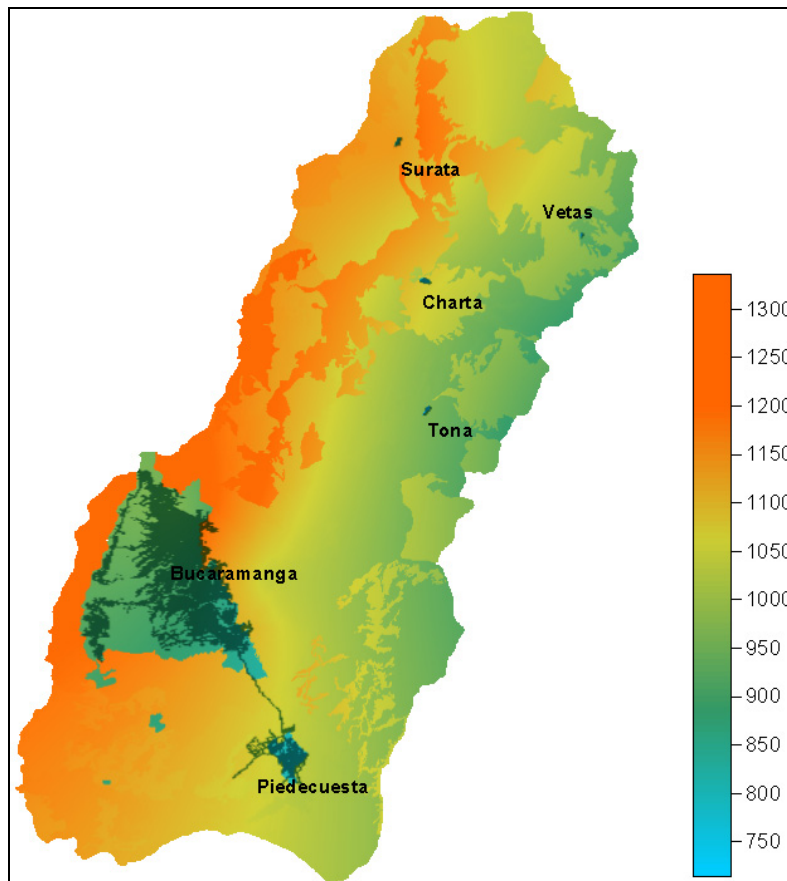


Figura 17. Distribución espacial de la Evapotranspiración

c. Escorrentía

La escorrentía directa es aquella parte de la precipitación que no es detenida en la superficie y tampoco se infiltra en el suelo; después de un evento de lluvia corre sobre la superficie y entra rápidamente al cauce de las corrientes. Igualmente existe el proceso de escurrimiento subterráneo y es aquél que debido a una profunda percolación del agua infiltrada en el suelo llega de manera mas lenta hasta la salida de la cuenca o hacia otras cuencas alimentando las corrientes cuando no se presentan eventos de lluvias, este tipo de escurrimiento constituye el caudal base de los ríos.

En la Cuenca Superior del Río Lebrija se cuenta con información de seis estaciones limnimétricas y limnigráficas con registros de caudales diarios, se encuentran ubicadas en la salida de las principales subcuencas.

Para aplicar y mostrar el ajuste de los algoritmos se usó la herramienta computacional Spell-BFS (Guzmán, 2006), con la cual se calculó la escorrentía directa del orden de 113 mm/año (valor medio multianual promedio en la cuenca) y un caudal base de 264 mm/año. En la figura 18 se presenta la distribución espacial de la escorrentía en la zona de estudio.

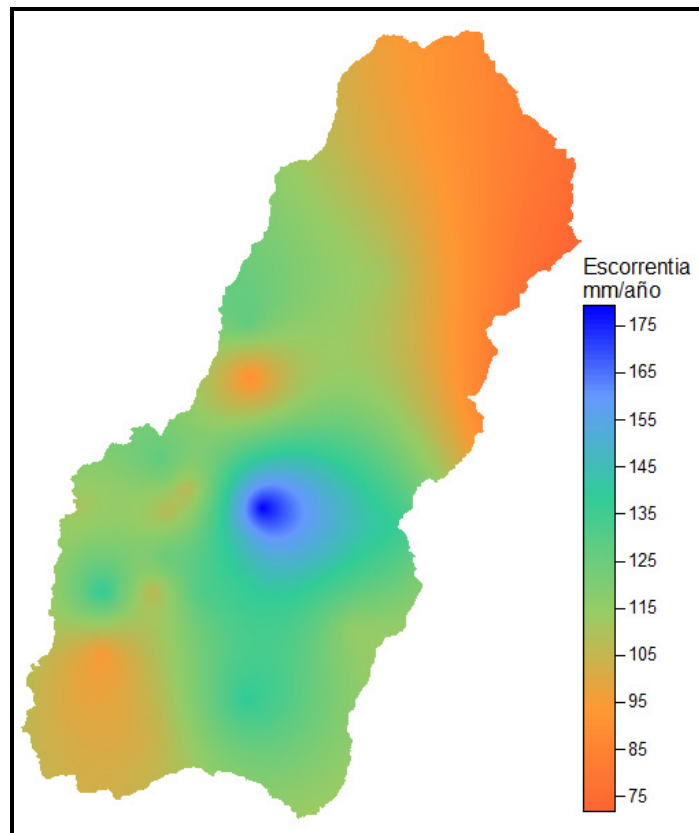


Figura 18. Distribución espacial de la Escorrentía.

d. Pérdidas por efecto Antrópico

Se entiende como pérdida por efecto antrópico, la cantidad de agua necesaria para consumo humano o para las actividades del hombre, que no retornan al sistema en la escala de tiempo considerada. Estas pérdidas se consideran como salidas del sistema.

Una estimación de las pérdidas por efecto antrópico en la Cuenca Superior del Río Lebrija se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Pérdidas por efecto antrópico.

PERDIDAS POR EFECTO ANTRÓPICO	MM/AÑO
Por Consumo humano	20.0
Por Consumo agrícola	87.9
Por uso de agua subterránea	6.0
Total perdidas	113.9

e. Recarga potencial

Este factor se obtiene de sacar de las entradas a la cuenca, las salidas representadas en evapotranspiración, escorrentía, y pérdidas por efecto antrópico, esto significa que recarga potencial es la parte de la lluvia que queda disponible sobre la superficie para infiltrarse. Estrictamente, el término de recarga potencial utilizado en este trabajo, no equivale a un estado del recurso hídrico subterráneo, sino a un volumen de agua disponible para alimentar el nivel freático.

En este proyecto se aplicaron conceptos de balance hídrico de largo plazo y se obtuvo un valor promedio de Recarga Potencial de 192 mm/año en la Cuenca Superior del Río Lebrija, como se muestra en la Tabla 3. Este valor corresponde aproximadamente al 16 % de la precipitación promedio que ocurre en la cuenca. La recarga potencial del área de estudio es baja, con los mayores valores en los municipios de Tona y Charta del orden de 400 y 500 mm/año como se observa en la figura 19.

Tabla 3. Valores promedio de las componentes hidrológicas de la CSRL.

COMPONENTE	VALOR (MM/AÑO)
Precipitación (P)	1217
ETR	690

Esorrentía (Q)	113
Factor Antrópico (A)	114
Error, ϵ	108
Recarga Potencial	192

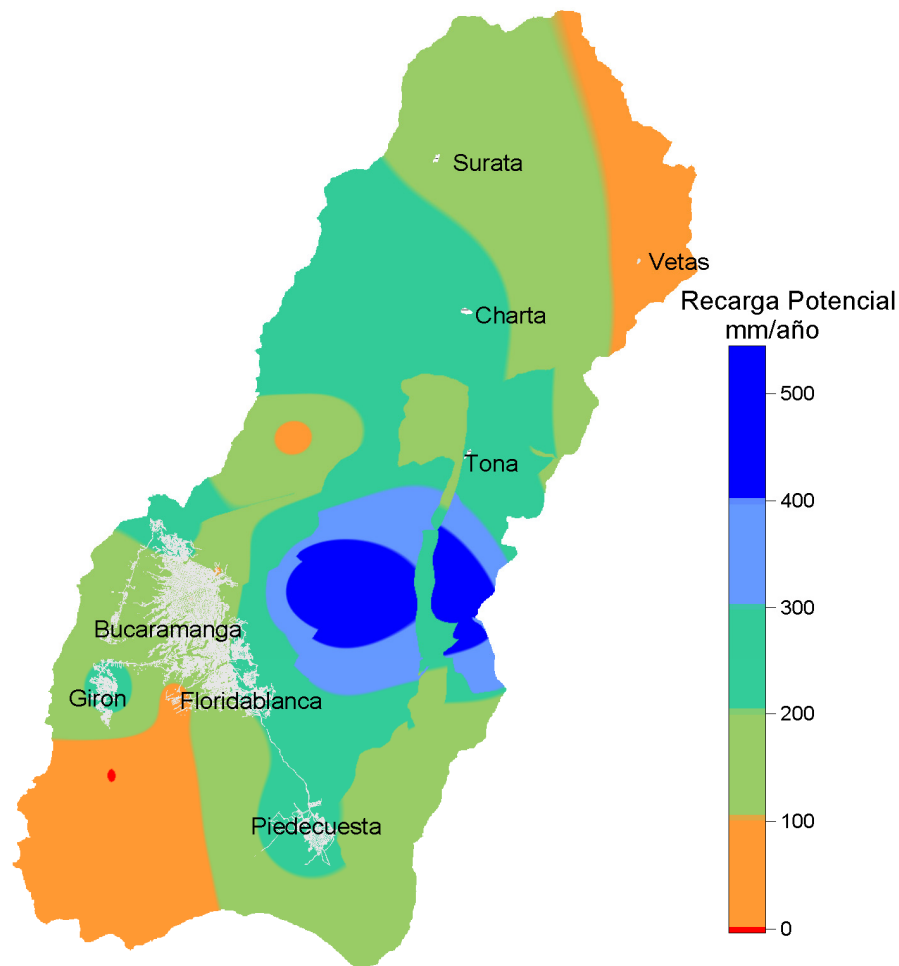


Figura 19. Distribución espacial de la Recarga Potencial.

Para caracterizar el estado del recurso se estableció la escala mostrada en la Tabla 4 (figura 20), donde los mayores valores se presentan en la zona media oriental de la cuenca y corresponde a las partes altas de los ríos Tona y Frío, los valores negativos se encuentran hacia el municipio de Girón que podrían reflejar zonas con déficit hídrico.

Tabla 4. Escala de recarga potencial.

Rango	Recarga Potencial	% de Área
Menor a 0	Nula	0
0 a 100	Baja	16
100 a 200	Media Baja	43
200 a 300	Media	30
300 a 400	Media Alta	6
Mayor a 400	Alta	5

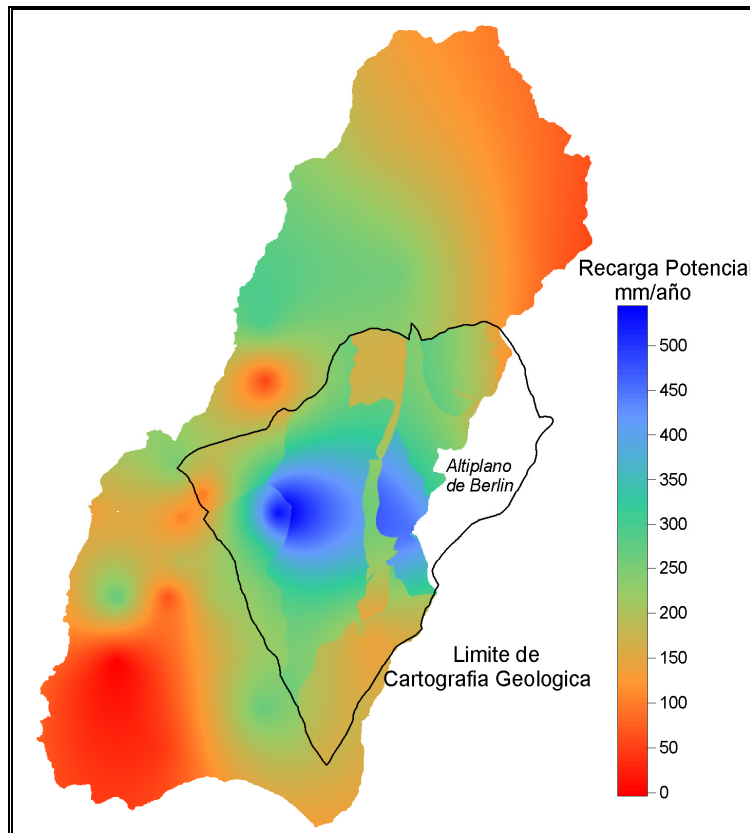


Figura 20. Distribución recarga potencial en límites de la cartografía geológica.

4. MARCO HIDROGEOLÓGICO

4.1 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

En el área correspondiente al Macizo de Santander se inventariaron un total de 126 puntos de agua, correspondientes a manantiales y algunas fuentes superficiales, distribuidos en las unidades geológicas aflorantes (pEb, pDs, pDo, TRt, JTRcg, Jcs, Jg, Kils, Kir, Kip, Kit, Qf, Qal, Qd), de los cuales algunos están dando origen a los drenajes que alimentan las cuencas de los ríos Tona y de Oro (figura 21).

Los datos fueron capturados en el formato de INGEOMINAS para inventario de manantiales. El inventario se realizó en los meses de junio, julio y principios de diciembre de 2006, coincidiendo con épocas lluviosas. En cada punto se tomaron los datos de las coordenadas, altura, nombre del sitio, características del punto y de unidad geológica captada, propiedades del agua (temperatura, pH, conductividad eléctrica, alcalinidad) y caudal de extracción, con cierto grado de imprecisión debido al método y las condiciones del aforo. En el Anexo 1 se presenta el inventario de puntos de agua y en el Mapa 1 “Inventario de puntos de agua subterránea”, la localización de los puntos y los rangos de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y caudal (l/s) de los mismos.

La cuenca alta del río Tona es mantenida por grandes quebradas como Los Arcos, Arnania, La Lúcura, Golondrinas y la quebrada Ucatá, entre otras. En ella se encuentran unidades precámbricas como el Neis de Bucaramanga, paleozoicas como la Formación Silgará y el Ortoneis de Berlín, mesozoicas dentro de las cuales se destacan la Cuarzomonzonita de La Corcova y las unidades cretácicas, y las formaciones recientes constituidas por depósitos cuaternarios. En las rocas del cretácico de esta cuenca, al NE del área, se ubica el mayor número de puntos de agua subterránea (26), los cuales conforman el nacimiento de las quebradas La Colmillona, La Chorrera y Río Sucio, afluentes de la quebrada Los Arcos; las rocas cretácicas de la parte centro oriente del área albergan manantiales que dan origen a la quebrada Ucatá. Los manantiales que se encuentran en el Neis de Bucaramanga al norte del área están alimentando la cuenca de la quebrada Arnania y los ubicados en la parte más septentrional del afloramiento de la

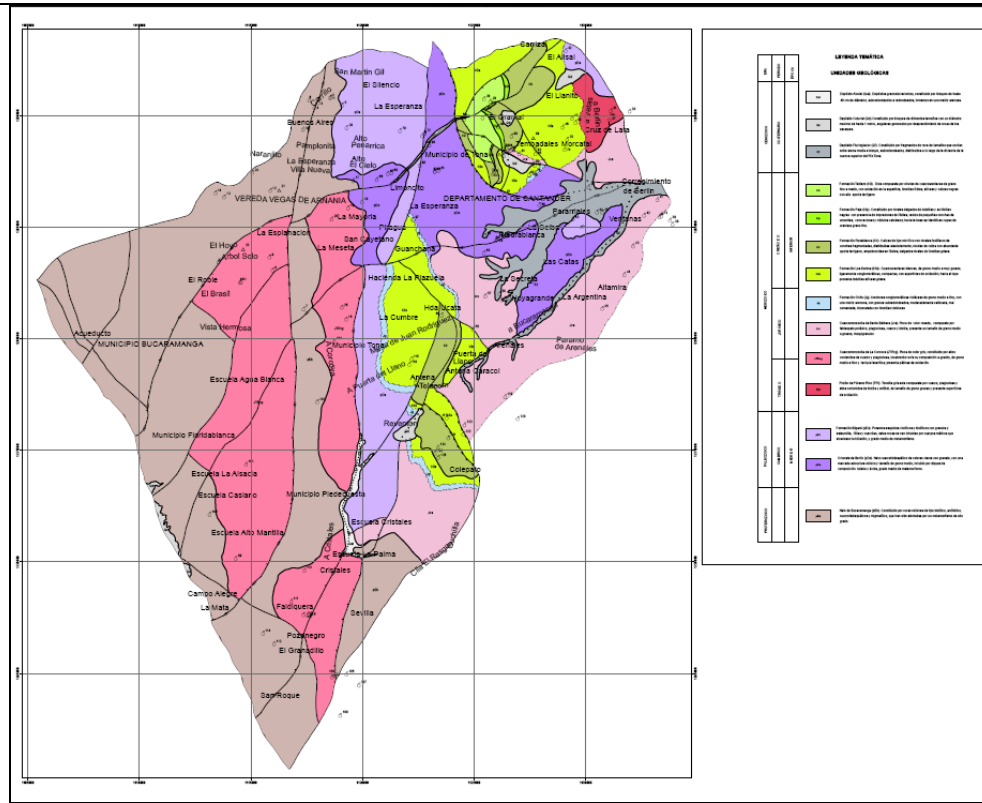


Figura 21. Mapa geológico con inventario de puntos de agua.

Cuarzomonzonita de La Corcova mantienen pequeños cauces que van al río Tona. Las unidades paleozoicas que afloran en la margen derecha del río Tona, dan origen a manantiales que van tanto a las quebradas Arnania y Los Arcos, mientras que las que se encuentran en la margen izquierda alimentan la quebrada La Lúcura.

La cuenca del río de Oro está conformada a su vez por las cuencas de los ríos Frío y Lato, con afluentes importantes como las quebradas El Rasgón y Colepato, entre otras, corrientes que bañan una zona compuesta por rocas cristalinas y sedimentarias precámbricas, paleozoicas y mesozoicas principalmente. En las formaciones cretácicas ubicadas al centro oriente del área, los manantiales sostienen los cauces que van al río de Oro. Al SE de la zona se encuentran manantiales tanto en la Cuarzomonzonita de La Corcova (Cuchilla Los Cristales), como en el Neis de Bucaramanga (sector de Sevilla y El Granadillo), que alimentan la cuenca del río de Oro.

Los manantiales localizados tanto en la Cuarzomonzonita de La Corcova (Loma El Tambo) como en el Neis de Bucaramanga que se encuentran hacia la parte media del área, dan origen a corrientes superficiales que van a las cuencas de los ríos Frío y Lato.

En la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs) los manantiales hallados están aportando a la cuenca de la quebrada Arenales y los manantiales que surgen en el Depósito Fluvioglacial de Berlín alimentan las quebradas Cebollal y Tierra Negra, afluentes del río Saladito que lleva sus aguas hacia el departamento de Norte de Santander. Ambas unidades geológicas afloran al extremo oriente del área de trabajo.

Es de anotar que los caudales tomados en los manantiales corresponden a la época lluviosa, pudiendo disminuir considerablemente en la época seca; con esta aclaración se puede decir que los mayores volúmenes pertenecen a manantiales que afloran en rocas ígneas como la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y la Cuarzomonzonita de La Corcova.

4.1.1 Rocas Metamórficas

5.1.1.1 Neis de Bucaramanga (pEb)

Se inventariaron 20 manantiales con pH entre 7.7 y 8.5, conductividad eléctrica hasta 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y caudales hasta 2.7 l/s, utilizados para abastecimiento público, doméstico y riego. En las **Figuras 22 y 23** se observa que no hay correlación entre la altura con la conductividad eléctrica y el caudal, debido a que las muestras que tienen caudales mayores que 1 l/s presentan CE desde 27 hasta 179 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando condiciones litológicas y de porosidad locales.

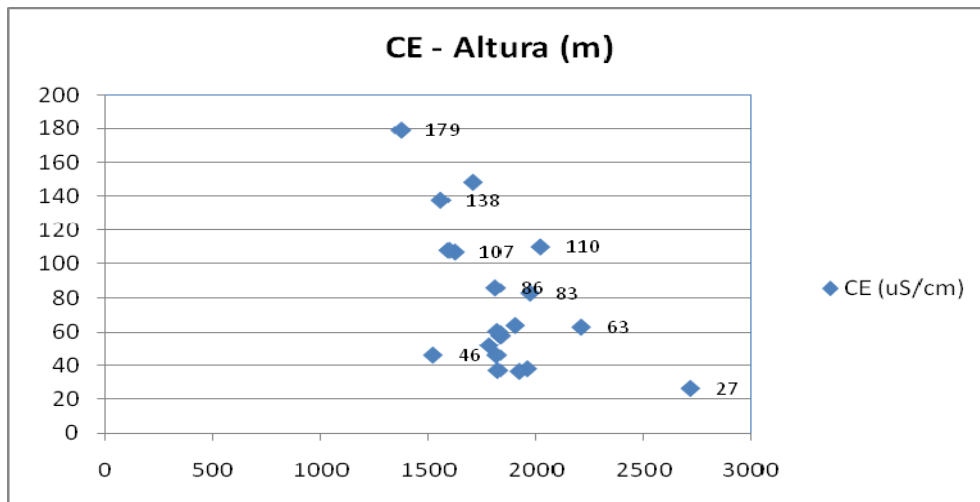


Figura 22. Relación conductividad eléctrica- altura

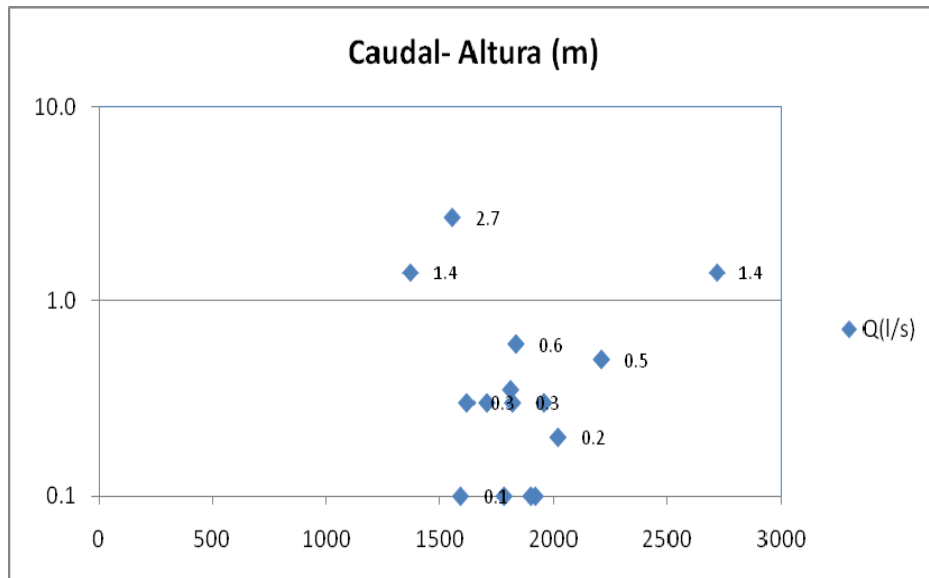


Figura 23. Relación caudal- altura

4.1.1.2 Ortoneis de Berlin (pDo)

Se inventariaron 15 puntos de agua subterránea correspondientes a manantiales con conductividades eléctricas entre 36 y 312 uS/cm, pH desde 7.0 hasta 8.3 y caudales entre 0.1 y 1.0 l/s, utilizados para abastecimiento doméstico y actividades agropecuarias. En las **Figuras 24 y 25** se observa que no hay correlación entre la altura con la conductividad eléctrica y el caudal, ya que la muestra que tiene menor caudal (0.1 l/s) presentan la mayor CE (312 uS/cm) por una litología más fina o condiciones muy locales de recarga posiblemente.

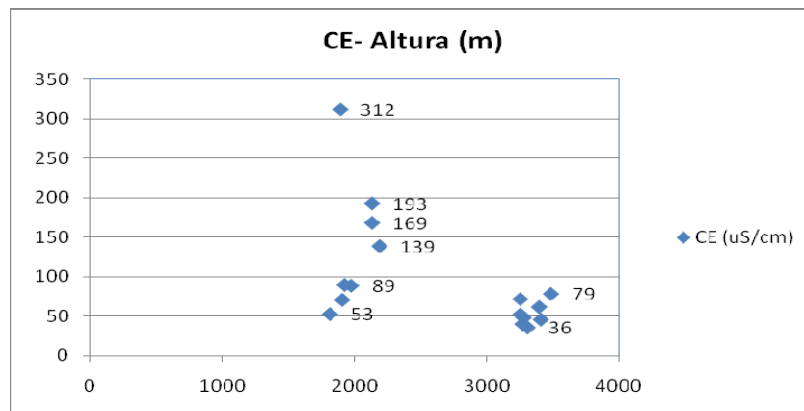


Figura 24. Relación Conductividad Eléctrica- Altura.

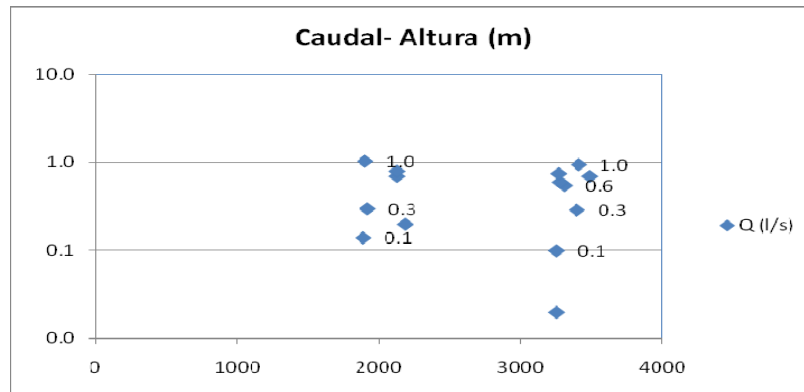


Figura 25. Relación caudal- altura

4.1.1.3 Formación Silgará (pDs)

Se inventariaron 6 puntos de agua subterránea correspondientes a manantiales con conductividades eléctricas entre 38 y 202 uS/cm, pH desde 6.46 hasta 7.91 y caudales menores a 1 l/s, utilizados para abastecimiento doméstico y ganadería. En las **Figuras 26 y 27** se observa que no hay correlación entre la altura con la conductividad eléctrica y una ligera tendencia con el caudal, a mayor altura menor caudal, posiblemente va aumentando con el recorrido del agua. En relación con la conductividad eléctrica y el caudal, vemos que la muestra de agua 110-III-C-40, que tiene menor CE (38 uS/cm) es la que tiene mayor caudal (1 l/s), posiblemente debido a condiciones muy locales de mayor porosidad y menor tiempo de residencia del agua; y la muestra que tiene mayor CE (202 uS/cm) presenta un caudal de 0.5 l/s, pudiéndose deber a una red hídrica no interconectada.

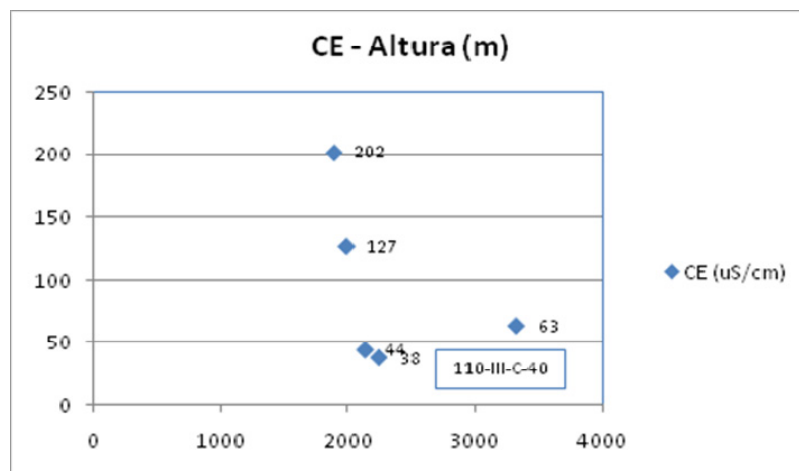


Figura 26. Relación conductividad eléctrica- altura

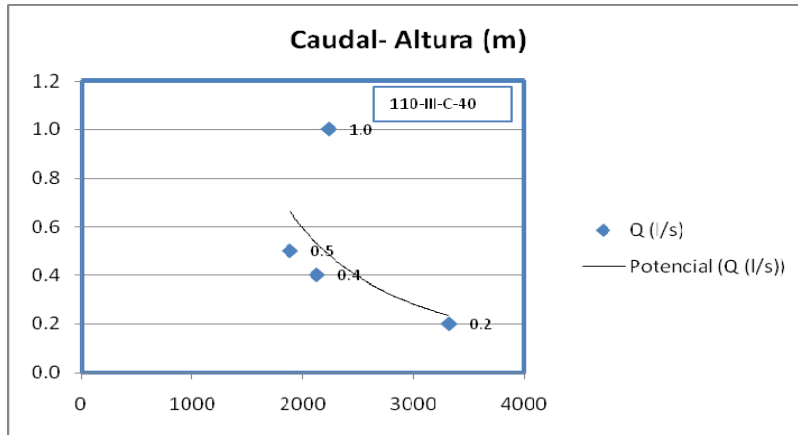


Figura 27. Relación caudal- altura

4.1.2 Rocas Ígneas

4.1.2.1 Plutón de Páramo Rico (TRt)

Solamente se inventariaron 3 manantiales incluida una cueva, con conductividades eléctricas entre 47 y 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH entre 7.5 y 7.8 y caudales menores a 1 l/s, utilizados para abastecimiento doméstico y público. En estos 3 manantiales se observa el flujo de agua subterránea a través de fracturas. Aunque con solo 3 datos no se pueden sacar conclusiones, se observa en las **Figuras 28 y 29** que el punto con mayor caudal (0.9 l/s) es el que tiene mas CE (71 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicando un tiempo de tránsito del agua subterránea mayor.

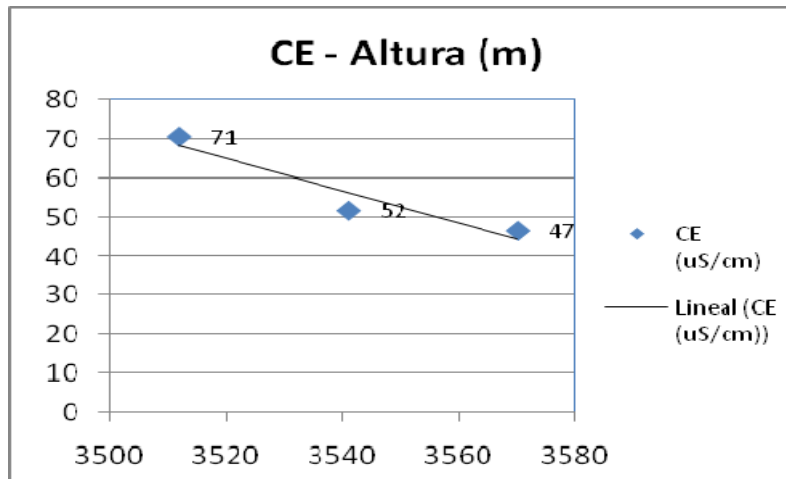


Figura 28. Relación conductividad eléctrica- altura

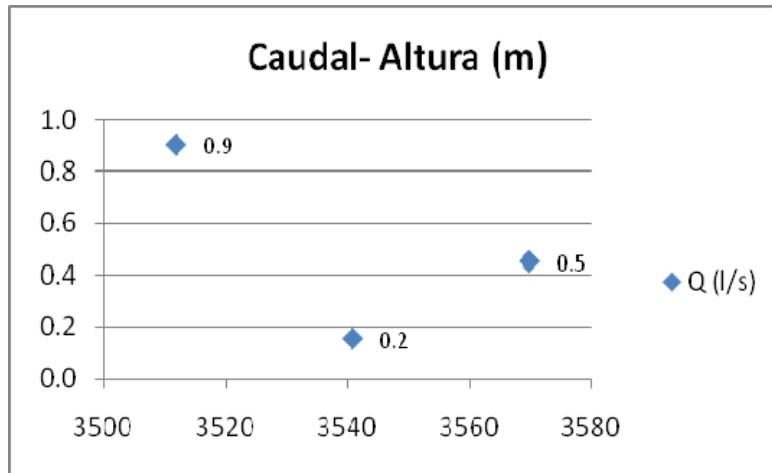


Figura 29. Relación caudal- altura.

4.1.2.2 Cuarzomonzonita de La Corcova (JTRcg)

Se inventariaron 20 puntos de agua correspondientes a 18 manantiales y 2 muestras de agua superficial, con conductividades eléctricas menores de 155 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH entre 5.42 y 8.7, con caudales inferiores a 2 l/s, a excepción de la muestra 109-IV-D-05 con caudal de 3 l/s, debido a condiciones muy locales de porosidad secundaria a través de diaclasas. El amplio rango de variación de la conductividad eléctrica y de los caudales, **Figuras 30 y 31**, indica condiciones muy variables de permeabilidad. En las dos muestras de aguas superficiales las conductividades eléctricas fueron de 79 y 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH de 7.6 y 8.29 y se midió un caudal de 5 l/s.

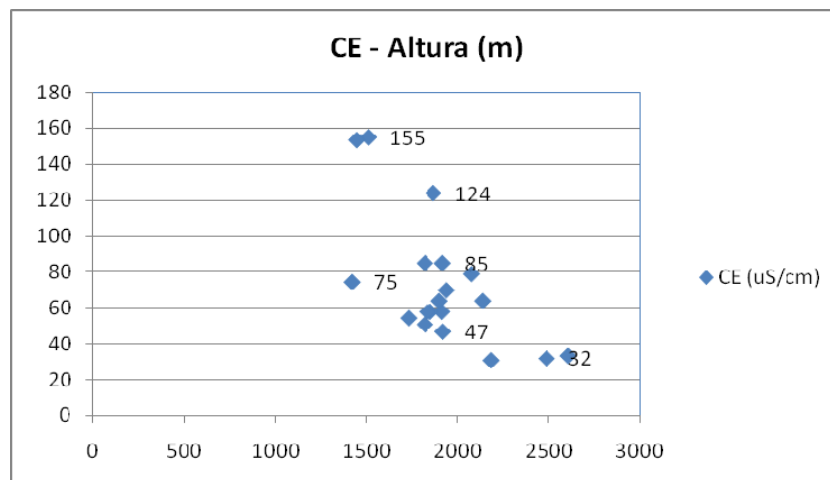


Figura 30. Relación conductividad eléctrica- altura

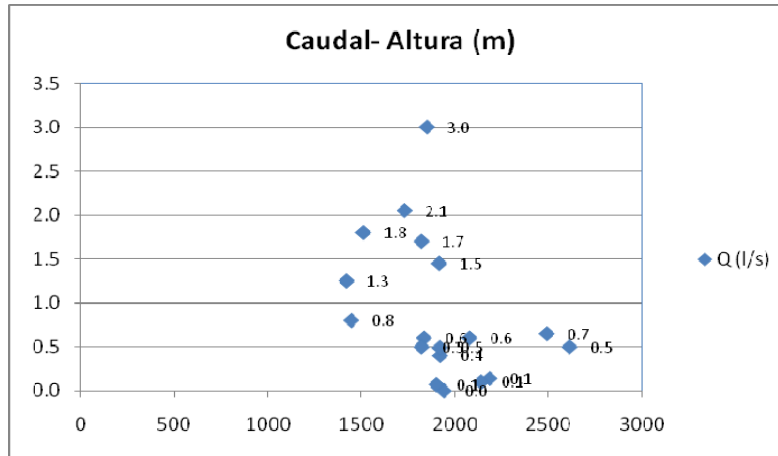


Figura 31. Relación caudal - altura

4.1.2.3 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs)

Se inventariaron 17 puntos de aguas subterránea correspondientes a manantiales con conductividades eléctricas menores de 592 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH desde 6.36 hasta 8.48 y caudales para la época lluviosa menores de 3.6 l/s, es muy probable que los caudales mayores correspondan al nacimiento de aguas superficiales en zonas fracturadas o diaclasadas. El amplio rango de variación en CE y caudal de los manantiales inventariados (**Figuras 32 y 33**) indican condiciones litológicas y de permeabilidad locales.

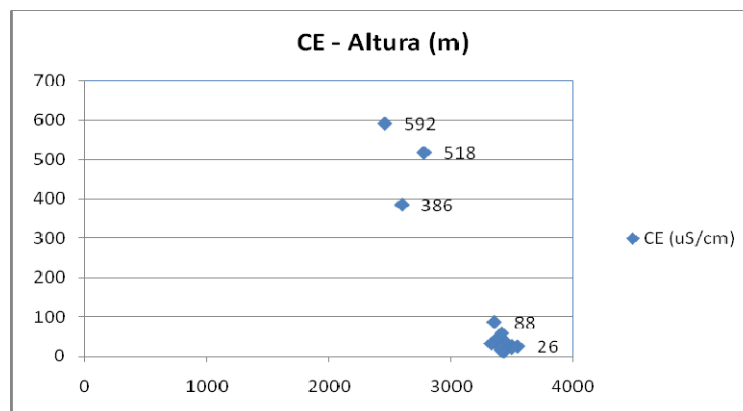


Figura 32. Relación conductividad eléctrica- altura

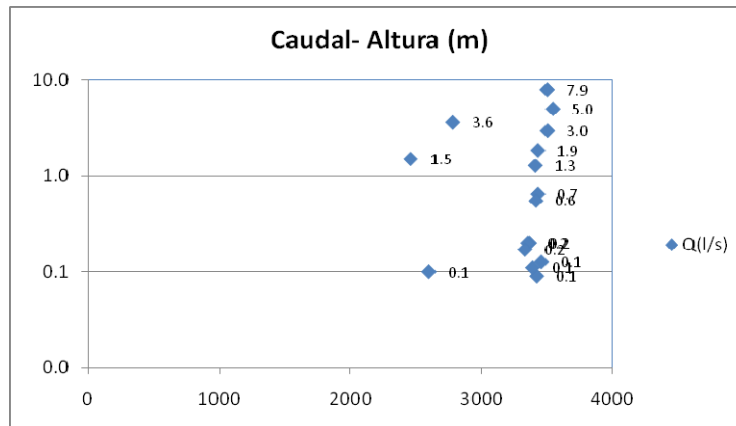


Figura 33. Relación caudal- altura

4.1.3 Rocas Sedimentarias

4.1.3.1 Formación Girón (Jg)

En esta formación se inventariaron 2 manantiales con conductividades eléctricas entre 203 y 335 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH entre 7.66 y 8.06 y caudal entre 0.2 y 0.9 l/s, utilizados para abastecimiento doméstico y riego.

4.1.3.2 Formación Los Santos (Kils)

Se inventariaron 15 manantiales con conductividades eléctricas hasta de 651 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH desde 6.15 hasta 8.23 y caudales desde 0.1 hasta 1.6 l/s. Los 3 puntos de agua superficial inventariados presentaron conductividades eléctricas de 94, 106 y 535 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH de 8.28, 8.35 y 6.8 y caudales de 2.4, 1.6 y 0.6 l/s. El amplio rango de variación de caudales y de la CE (figuras 34 y 35) con valores relativamente altos tanto en las aguas subterráneas como superficiales indican cambios litológicos y de permeabilidad locales.

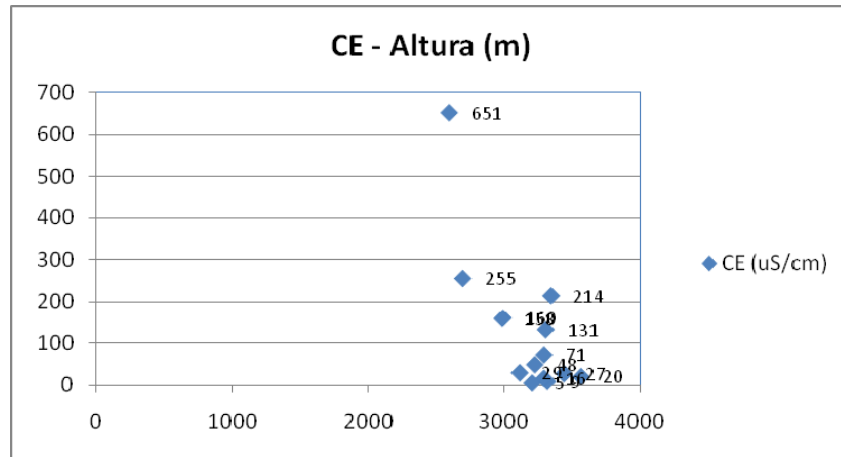


Figura 34. Relación conductividad eléctrica- altura.

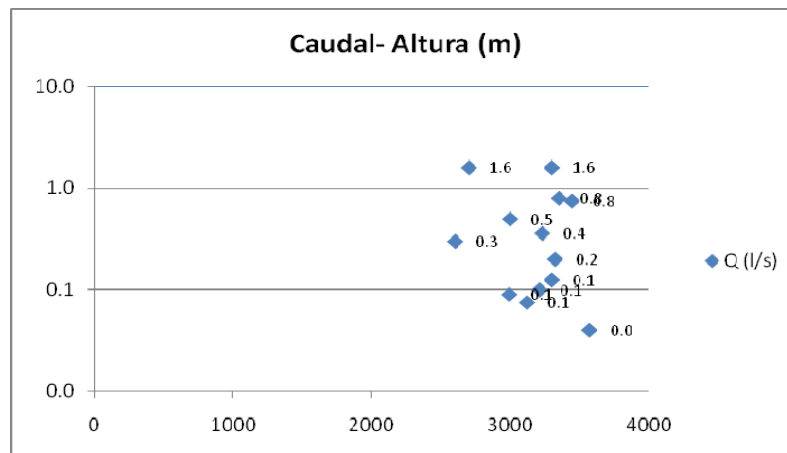


Figura 35. Relación caudal- altura.

4.1.3.3 Formación Rosablanca (Kir)

Se inventariaron 9 manantiales con conductividades eléctricas hasta 963 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH desde 6.6 hasta 8.25 y caudales desde 0.2 hasta 1.8 l/s. Los manantiales con menor conductividad se pueden relacionar con flujos subsuperficiales con poco tiempo de tránsito y bajos caudales. No se observa correlación entre la CE y el caudal con la altura y los rangos de variación amplios de estos dos parámetros, **Figuras 36 y 37**, son debidos posiblemente a cambios litológicos y de permeabilidad de la formación, como el caso del manantial 110-II-C-51 que presenta la mayor conductividad 963 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un caudal relativamente bajo (0.3 l/s).

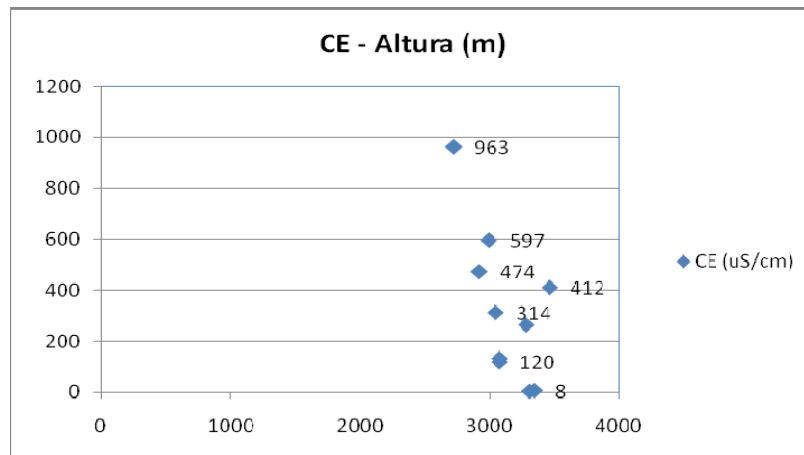


Figura 36. Relación conductividad eléctrica- altura

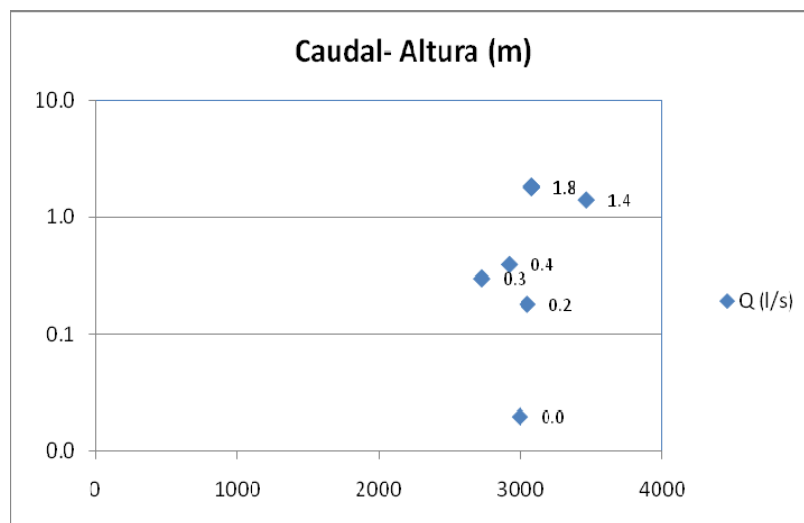


Figura 37. Relación caudal- altura

4.1.3.4 Formación Paja (Kip)

En la Formación Paja se inventariaron 4 puntos de agua correspondientes a 3 manantiales y una muestra de agua superficial, con conductividades eléctricas desde 306 hasta 800 uS/cm, pH desde 6.9 hasta 8.01, 8.4 en el agua superficial, y caudales desde 0.2 hasta 2.8 l/s.

5.1.3.5 Formación Tablazo (Kit)

En esta unidad se inventariaron 4 puntos de agua subterránea correspondientes a manantiales con conductividades eléctricas de 31 a 537 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH de 7.48 a 8.17. Se midieron 2 caudales de 0.2 y 0.4 l/s. Se observa una ligera tendencia del aumento de la CE a menor altura, **Figura 38**, con excepción del manantial 110-III-C-35 (31 uS/cm) que es de goteo y puede representar un flujo subsuperficial.

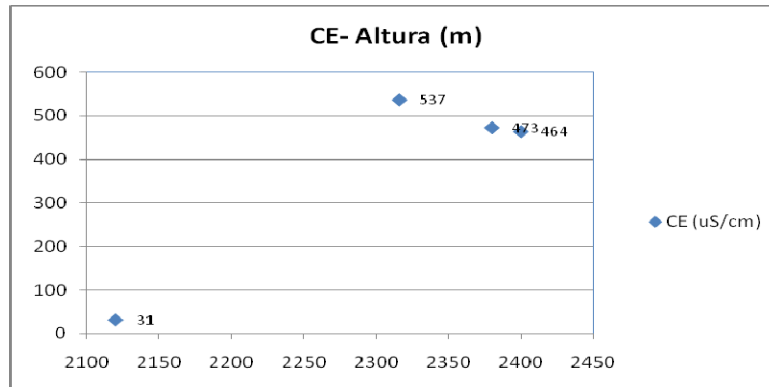


Figura 38. Relación conductividad eléctrica- altura

4.1.4 DEPÓSITOS RECIENTES

En estos depósitos se inventariaron 8 puntos de agua subterránea correspondientes a manantiales que captan los Depósitos Fluvioglaciares (Qf) y los Depósitos Coluviales (Qd), usados para abastecimiento doméstico y actividades agropecuarias. Los manantiales presentan conductividades eléctricas menores de 47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ubicados en alturas entre 3250 y 3500 msnm), indicando poco tránsito; solo el manantial 110-III-C-61 tiene CE= 644 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y capta los Depósitos Coluviales. Los caudales van hasta 1.1 l/s y el pH varía entre 7.2 y 8.59 (figuras 39 y 40).

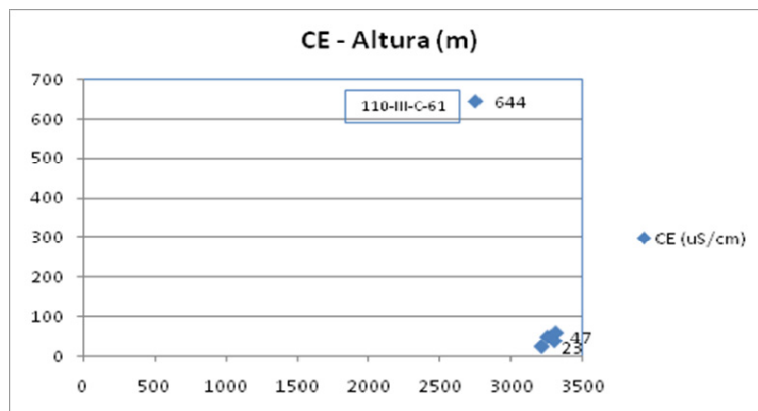


Figura 39. Relación conductividad eléctrica- altura

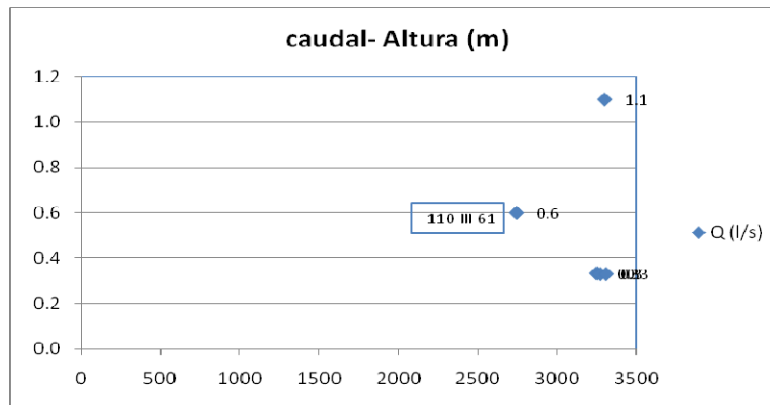


Figura 40. Relación caudal- altura

4.2 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

En el área de estudio afloran en su mayoría rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias y en algunos pequeños sectores depósitos fluvioglaciares, coluviales y aluviales. En el caso de las rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias fracturadas la capacidad de almacenar y transmitir agua está mas ligada a porosidades secundarias que a la propia roca. Sus propiedades hidráulicas, dimensiones y límites no son continuos, debido a la heterogeneidad del medio. La conductividad hidráulica por ejemplo, puede presentar diferencias de varios órdenes de magnitud entre puntos situados a distancias relativamente pequeñas, salvo en los casos de una alta densidad de fracturamiento.

Con base en la información geológica y estructural se clasifica de una manera preliminar la importancia hidrogeológica de las rocas y los depósitos recientes.

5.2.1 Rocas Metamórficas

5.2.1.1 Neis de Bucaramanga (pEb)

Constituye la parte basal del Macizo de Santander, se identifican rocas metamórficas de alto grado y de origen sedimentario. En la zona de estudio muestra una gran extensión con marcadas variaciones en su topografía, sobresalen las pendientes abruptas (entre 25 - 35°) y un patrón de drenaje subdendrítico a subparalelo. Esta unidad se caracteriza por presentar variaciones composicionales (cuarzofeldespático, biotítico, anfibólico, migmatítico), que al momento de la meteorización (escala British Geological Survey) le imprime a cada uno de los tipos, diferencias en sus características hidrogeológicas, así, las rocas cuarzofeldespáticas muestran un grado medio de meteorización produciendo niveles arenosos, con tamaño de grano arena fina a muy gruesa, en una matriz

limosa, formando perfiles de hasta 12 m de espesor. Los niveles superficiales de meteorización que se encuentran suprayaciendo a la roca fracturada, poseen porosidad primaria; estas dos particularidades son favorables a la hora de identificar zonas de interés hidrogeológico, en este caso someras donde se hallen este tipo de rocas.

En las zonas donde aparece el neis biotítico y anfibólico (NW del Macizo de Santander), la meteorización es de grado moderado a alto, exhibiendo un perfil de composición arcillosa de tipo caolinítico, con espesores aproximados entre 3 y 5 m, son típicamente rojizos y pueden constituirse en zonas hidrogeológicas de baja capacidad de infiltración de agua. Estos neises se encuentran altamente diaclasados, lo cual favorece la porosidad secundaria y por lo tanto podrían constituir zonas de interés hidrogeológico.

4.2.1.2 Ortoneis de Berlín (pDo)

Es un neis cuarzo feldespático de textura granoblástica el cual se encuentra muy alterado, con alto grado de fracturamiento y oxidación en superficie, desarrollando perfiles de meteorización granulares con tamaños de grano de hasta 3 cm de diámetro y espesores de 4 a 6 m. Se presenta en la zona como un cuerpo alargado dispuesto en dirección NS y se extiende hacia la cuenca del río Tona mostrando crestas afiladas de pendientes moderadas a altas. En el altiplano de Berlín constituye un relieve de colinas redondeadas y pendientes bajas a medias. Cerca de la quebrada La Lúcura (parte alta de la cuenca del río Tona) se encuentra muy alterado y fracturado; en el sector de la finca El Limoncito al SW del municipio de Tona se aprecia como un neis de grano fino, rico en anfíboles verdes, intruído por diques ácidos, concordante con la foliación. En los sectores de mayor pendiente, el neis presenta alto grado de meteorización formando cárcavas, sin embargo este fenómeno se evidencia también en el altiplano de Berlín con espaciamiento hasta de un metro.

Debido a la meteorización y a la densidad de diaclasamiento, esta unidad metamórfica muestra importantes grados de porosidad primaria y secundaria, lo cual podría definir zonas de interés hidrogeológico en el altiplano de Berlín, donde es usual encontrar áreas de encharcamiento. Los niveles más profundos se encuentran meteorizados y fracturados.

4.2.1.3 Formación Silgará (pDs)

Esta unidad se presenta en la parte central del área de estudio como fajas discontinuas con orientación NS entre el altiplano de Berlín y los valles de los ríos Oro, Frío y Tona. En general muestra una estructura esquistosa bien definida y muy fina, con variaciones a rocas de textura granoblástica de composición cuarcítica y marmórea, ubicadas hacia la parte alta de la cuenca del río Tona, las cuales se caracterizan por aparecer superficialmente muy oxidadas.

En la parte norte la formación está siendo afectada por fallas de rumbo con orientación aproximada E-W, las cuales podrían ser vías preferenciales del agua desde la zona alta del Macizo de Santander hacia las áreas mas bajas de Bucaramanga, Floridablanca y Piedecuesta.

Geomorfológicamente se caracteriza por presentar un relieve ondulado, de pendientes moderadas, el cual contrasta con las crestas afiladas, de las rocas y escarpes de las unidades con las que se encuentra en contacto. Hacia la finca La Esperanza, en la quebrada Pirgua, al norte de la cuchilla La Quincha y en el Alto Peña Rica, la Formación Silgará se muestra muy meteorizada lo cual permite observar niveles arcillosos, de color naranja, especialmente en las zonas de mayor grado de alteración. En estos sectores la unidad se encuentra cortada por diques de composición máfica.

En la cuenca del río de Oro, en el sector de la quebrada El Rasgón, aparece altamente meteorizada, presentando perfiles de suelo con una textura fina y colores que varían de rojo a naranja.

Los niveles de meteorización de la Formación Silgará pueden alcanzar espesores de 2 m compuestos por minerales arcillosos, por lo tanto la zona superficial definida por estos esquistos presenta muy baja permeabilidad y se pueden constituir como zonas de flujo lento de agua subterránea.

En general, se observa un fracturamiento bajo debido a la plasticidad de la roca, este factor desarrolla una porosidad secundaria incipiente. En los niveles arcillosos de la zona de máximo grado de meteorización es muy frecuente la presencia de deslizamientos y flujos de lodo.

4.2.2 Rocas ígneas

4.2.2.1 Plutón de Páramo Rico (TRt)

Este es un cuerpo intrusivo tonalítico de color gris, que tiene una extensión en el área de trabajo de alrededor de 3 km²; se encuentra al E de la cuenca del río Tona en el límite de la zona de estudio. Muestra una composición intermedia, con textura porfirítica y tamaño de grano medio a grueso, con un contenido importante de máficos, cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico. Los afloramientos encontrados muestran la roca fresca y estructuralmente poco afectada, por lo tanto es de poca importancia hidrogeológica.

4.2.2.2 Cuarzomonzonita de La Corcova (JTRcg)

Esta unidad rocosa se presenta como dos cuerpos de forma alargada en la parte central del Macizo de Santander, con una orientación NS, y separados entre si por efectos tectónicos con leves variaciones composicionales. Regionalmente se

identifica como el Plutón de La Corcova y se aprecia sobre las vías Bucaramanga-Pamplona y Los Curos-Guaca.

En la zona de estudio se caracteriza por ser una roca de color gris a blanco, de grano fino a medio, textura fanerítica, con presencia de pátinas de oxidación. Hacia el sector Las Palmas al SW del municipio de Tona, esta unidad presenta un mayor porcentaje de feldespato potásico, lo cual genera una variación de cuarzomonzonita a granito. Aflora como roca fresca cerca del río Tona, en el sector de Árbol Solo por la vía que conduce de Bucaramanga a Tona; en el cerro Ventanas se observa mayor alteración y en la vereda Guarumales aparecen sectores que varían su textura de porfirítica a equigranular con alto contenido de minerales máficos, los cuales tienen un grado de meteorización medio. En el sector del Carrizal en la vía Tona - km 18 se aprecia una roca de composición granítica, con un mayor contenido de hornblenda equigranular, fresca.

La Cuarzomonzonita de La Corcova, aflora también en la vereda Granadillos del municipio de Piedecuesta, donde presenta una topografía de pendientes moderadas, se observan afloramientos de roca cuarzofeldespática de colores claros, con un alto grado de meteorización, lo que origina la formación de minerales de arcilla (caolinitas principalmente).

La unidad presenta niveles de alteración de hasta 12 m de espesor, los cuales se caracterizan por tener una textura arenosa con alta porosidad primaria; las geoformas desarrolladas como cárcavas amplias generan porosidad secundaria, que pueden dar origen a zonas de interés hidrogeológico.

Al sur del área de estudio se ubican rocas de la Cuarzomonzonita de La Corcova que tienen un mayor porcentaje de minerales máficos y con un grado de meteorización superior, los perfiles toman un color rosado y una textura arcillosa, factor que disminuye la porosidad primaria, aunque con una mayor densidad de diaclasas, por lo cual al sur del Macizo de Santander los niveles superficiales de la Cuarzomonzonita de La Corcova pueden definir zonas de alguna importancia hidrogeológica.

4.2.2.3 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs)

Estas rocas conforman el Batolito de Santa Bárbara y afloran al oriente del departamento, en los sectores de Los Curos, Santa Bárbara, Baraya y en los alrededores de Berlín y llega hasta el sector de Arenales. La cuarzomonzonita es de color rosado, rosado naranja a gris violáceo, equigranular, compuesta por feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita. El área presenta una morfología de colinas redondeadas y la unidad se extiende en forma alargada con una orientación NS.

Estas rocas presentan un alto grado de meteorización en la zona de estudio, los feldespatos son los minerales que evidencian el mayor grado de alteración generando la aparición de arcillas. El perfil de meteorización observado es de carácter arenoso y de color crema. Hacia la parte alta de la cuenca del río de Oro, sobre la zona límite con el páramo de Berlín, esta unidad de roca es afectada por meteorización esferoidal y desarrolla suelos residuales arcillo limosos espesos, lo cual define un aumento moderado en la porosidad primaria de este cuerpo ígneo en su superficie.

El perfil de meteorización que se observa hacia la zona del altiplano de Berlín es de textura arenosa y de color claro, donde se evidencian los cristales de cuarzo muy resistentes a la alteración. Las características texturales y composicionales de la roca ígnea le otorgan a los niveles de mayor alteración una porosidad primaria, que puede facilitar el almacenamiento y circulación del agua y por lo tanto puede llegar a constituir zonas de interés hidrogeológico.

4.2.3 Rocas sedimentarias

4.2.3.1 Formación Girón (Jg)

En la zona de estudio se pueden distinguir dos sectores en los cuales aflora esta unidad, el primer sector se ubica hacia la zona de El Alto (divisoria cuenca río Tona-altiplano de Berlín), donde se compone de areniscas conglomeráticas violáceas de grano fino a medio, con una matriz arenosa, granos subredondeados, moderadamente calibrada, mal cementada.

El segundo sector se localiza hacia la parte alta de la cuenca del río de Oro, específicamente en El Picacho, sobre la vía que conduce a Bucaramanga. Aquí se encuentra constituida por areniscas de grano medio, subangulares a redondeados, mal calibradas y compactas, intercaladas con limolitas violáceas; presentan baja porosidad primaria.

Aunque arealmente no ocupa gran extensión, por sus propiedades litológicas podría constituir zonas de interés hidrogeológico.

4.2.3.2 Formación Los Santos (Kils)

En el Macizo de Santander esta formación se encuentra distribuida en la microcuenca de la quebrada Río Sucio y el alto El Picacho, donde aparece afectada por fallamiento. Está compuesta principalmente por cuarzoareniscas blancas, ligeramente gravosas y conglomeráticas de grano muy grueso a fino, muy compactas con superficies de oxidación en la zona intermedia. Hacia el techo, los niveles de areniscas están intercalados con lodolitas síliceas oxidadas, de colores naranja a rojizos.

Aflora en la carretera que conduce de Berlín al Gramal, en el sector de Cruz de Lata, en el Llanito y hacia Llano de Adentro.

Esta unidad debido a su porosidad primaria y grado de fracturamiento presenta gran interés hidrogeológico. En el sector de El Alto y en El Uvo se observa muy compacta disminuyendo su porosidad primaria, mientras que en el sector del Carrizal y la parte central de la cuenca de la quebrada Río Sucio se encuentra menos cementada, aumentando la porosidad primaria, por lo que podría constituir zonas locales de interés hidrogeológico. Hacia el contacto con la Formación Rosablanca, los niveles finos de la Formación Los Santos la hacen menos permeable y actúa como zonas de tránsito lento de agua subterránea. En las pendientes estructurales generadas hacia El Picacho y la parte alta de la cuenca del río Tona, esta unidad se ve afectada por un alto grado de fracturamiento, factor que aumenta la porosidad secundaria y podría constituirse en zonas de interés hidrogeológico.

4.2.4 Rocas sedimentarias calcáreas

4.2.4.1 Formación Rosablanca (Kir)

El rasgo geomorfológico más representativo de la Formación Rosablanca son los escarpes ubicados en la parte oriental del área de estudio, que muestran grandes paquetes de calizas micríticas de color gris en los sectores de alto El Peñón, alto Peña Alta, alto Las Cruces y alto El Picacho y en el sector de Llano de Adentro al centro oriente del área, llegando a tener un espesor acumulado de 240 m.

Las calizas de la Formación Rosablanca presentan niveles fosilíferos y venas de calcita, intercaladas con shales negros carbonosos hacia el techo, observados en la quebrada Los Arcos. Se aprecian zonas con alta disolución en las pendientes estructurales ubicadas hacia el alto El Peñón (parte alta de la cuenca del río Tona) y en la carretera que conduce de Bucaramanga – Cúcuta, sector del peaje.

Estas calizas presentan meteorización de grado medio-alto y se encuentran muy fracturadas como en el sector del Picacho, con presencia de diaclasas que en la mayoría de los casos se encuentran abiertas, favoreciendo de esta manera el flujo de agua a través de ellas, confiriéndoles mayor permeabilidad.

Cambios laterales de facies de estas rocas se presentan hacia el NE, donde si bien predominan los paquetes calcáreos, existen niveles con un porcentaje mayor de material terrígeno (margas), empobrecidas en fósiles y con un aumento de calcita recristalizada, que hacen que los procesos de disolución sean menores, lo cual se evidencia cerca de la zona de contacto entre las formaciones Los Santos y Paja.

La Formación Rosablanca puede definir zonas de interés hidrogeológico donde se encuentre fracturada.

4.2.4.2 Formación Paja (Kip)

Esta unidad en el área del Macizo de Santander se caracteriza por definir pendientes suaves, compuesta por niveles delgados de limolitas, lodolitas y arcillolitas negras, con presencia de impresiones fósiles, restos de pequeñas conchas, concreciones y nódulos calcáreos; presenta como minerales accesorios moscovita y pirita. Los shales negros se hacen ligeramente carbonáceos y se encuentran intercalados con areniscas de grano muy fino, silíceas. Hacia los sectores de la quebrada Río Sucio y El Gramal el espesor aproximado es de 60 m.

Desde el punto de vista hidrogeológico tanto su porosidad primaria como secundaria son bajas, dependiendo de las condiciones estructurales y de fallamiento que actúen sobre ella, por lo tanto las zonas con presencia de shales de la Formación Paja se comportan como de poca importancia hidrogeológica.

4.2.4.3 Formación Tablazo (Kit)

En el área del Macizo de Santander esta formación se encuentra distribuida en la parte alta de la cuenca del río Tona, conformando escarpes y pliegues amplios, con un espesor aproximado de 100 m. Composicionalmente se caracteriza por la presencia de niveles de cuarzoarenitas, limolitas fisiles, silíceas y calizas. Los horizontes arenosos están compuestos por areniscas de grano fino a medio, con oxidación en la superficie, se muestran poco a medianamente compactos y se disgregan fácilmente, desarrollando porosidad intergranular.

Las calizas en esta formación son de color negro, con venas de calcita y un alto aporte terrígeno. El afloramiento representativo en el área se encuentra ubicado en el sitio del pliegue de la quebrada Los Arcos; aparece también en la quebrada Los Pantanos y al NE de la zona en el sector del Alto, donde se observa un sinclinal en el cual la Formación Tablazo hace parte del núcleo de esta estructura.

Las características de esta unidad la hacen favorable para almacenar y transmitir agua subterránea, no solo por la porosidad primaria de las areniscas como por los procesos de disolución en las calizas, los cuales son acelerados por las fallas reconocidas en el área, sin embargo su limitada presencia en la zona disminuye el interés hidrogeológico de estas rocas.

4.2.5 Depósitos recientes

En el área se diferenciaron Depósitos Coluviales o de Ladera (Qd), Depósitos Aluviales (Qal) y Depósitos Fluvioglaciares (Qf), compuestos por acumulaciones de bloques y cantos en una matriz limo arenosa, los cuales conforman superficies



suavemente onduladas, de muy bajas pendientes, que de acuerdo con su exposición areal y espesor pueden llegar a tener importancia hidrogeológica.

5. HIDROGEOQUÍMICA

La clasificación hidrogeoquímica es la identificación de los patrones de composición en cada una de las diferentes unidades acuíferas, mediante el uso de diagramas Stiff, Piper y de Cajas (Custodio, 1996).

En el análisis y evaluación del agua subterránea es importante identificar la solubilidad de las diferentes unidades geológicas y condiciones antrópicas presentes en el área de estudio. Para consumo humano es primordial controlar la calidad del agua, pues algunas veces se puede clasificar como inservible a peligrosa para la salud.

5.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Los criterios para seleccionar los manantiales para el análisis físico-químico fueron la unidad geológica captada, la distribución espacial, el caudal y la conductividad eléctrica. Con estos criterios se colectaron en los meses de febrero y marzo de 2007 sesenta (60) muestras de manantiales y fuentes superficiales. Se siguió el protocolo de INGEOMINAS para el muestreo de aguas, determinando in situ pH, conductividad eléctrica, temperatura y alcalinidad como CaCO_3 (mg/l). Las muestras para el análisis de cationes se filtraron en campo en membrana de 0.45 micras y se acidularon a pH menor que 2.0.

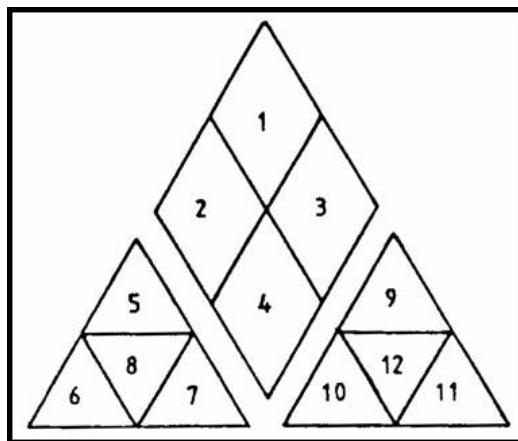
Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Aguas y Gases de INGEOMINAS y uno de los criterios de calidad analítica de los resultados fue el balance iónico. El laboratorio reporta un error analítico < 11%, para todas las muestras, error que se considera aceptable para la interpretación de los datos. Los diagramas para procesamiento e interpretación de los resultados se realizaron mediante el programa Aquachem, versión 4.0.

Para evaluar la calidad del agua subterránea se consideran las concentraciones medias de los iones en solución en mg/l, y las concentraciones máximas admisibles para agua potable (Decreto 1575 de 2007), Ministerio de Salud y Protección Social).

5.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

La interpretación geoquímica del agua subterránea se realizó mediante el diagrama de Piper (Figura 41) para 60 muestras en las diferentes unidades geológicas aflorantes en la zona de estudio.

La caracterización geoquímica de las 60 muestras de agua se realiza según el tipo de roca o sedimentos por donde transita. Los tipos geoquímicos de agua de los manantiales muestreados se presentan en la Figura 42.



- 1-Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas.
- 2-Aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
- 3- Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
- 4- Aguas bicarbonatadas sódicas.
- 5- Aguas magnésicas.
- 6- Aguas cálcicas.
- 7- Aguas sódicas.
- 8- Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas.
- 9- Aguas sulfatadas.
- 10- Aguas bicarbonatadas.
- 11- Aguas cloruradas.
- 12- Aguas sulfatadas, bicarbonatadas y cloruradas.

Figura 41. Tipos geoquímicos de agua

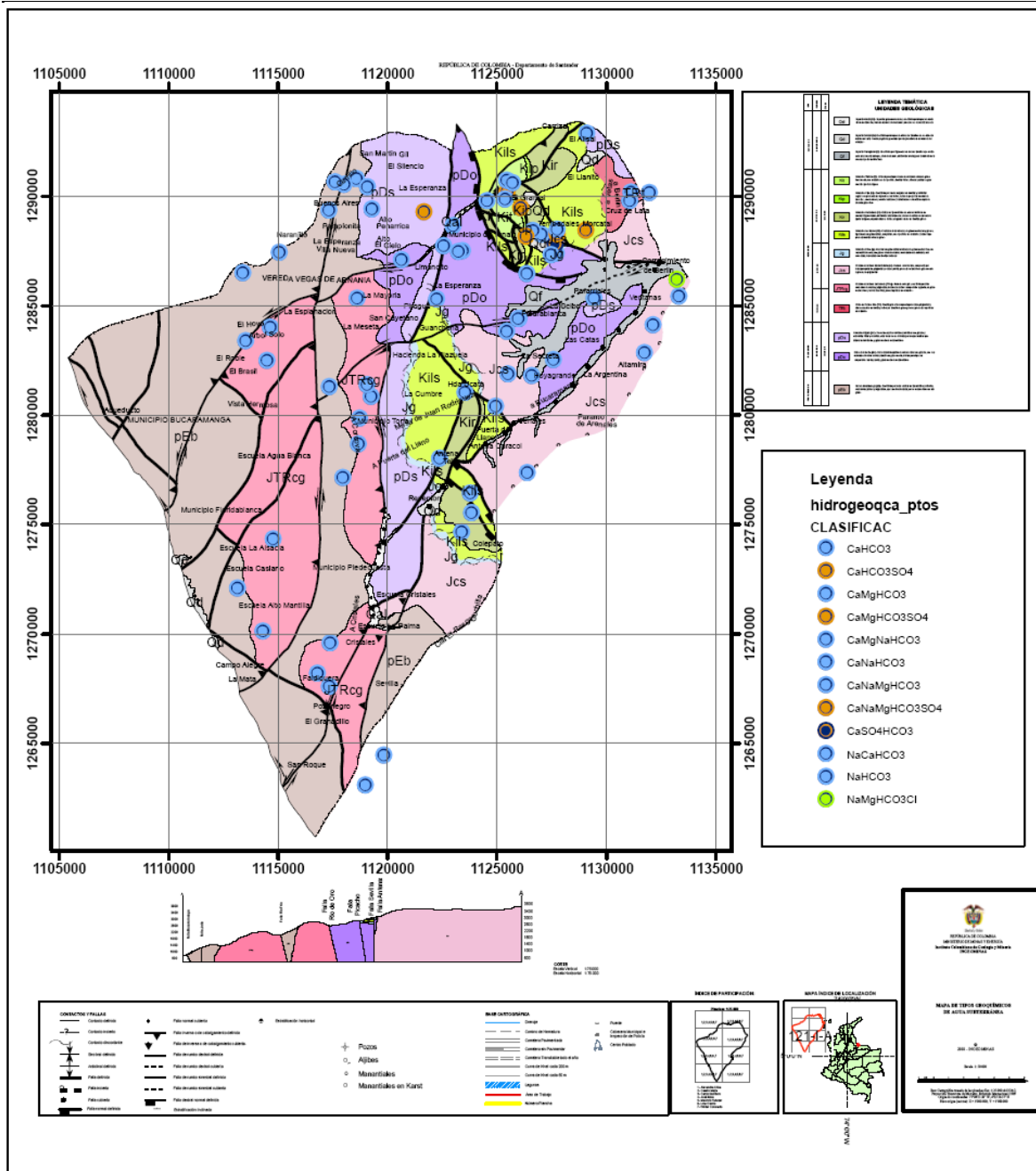


Figura 42. Mapa de tipos Geoquímicos de aguas subterráneas

Debido a que solamente se muestrearon 2 manantiales en los Depósitos Cuaternarios y su extensión lateral es mínima no se discuten sus resultados analíticos.

5.2.1 Rocas ígneas y metamórficas

En los manantiales de las rocas ígneas y metamórficas predominan las aguas mixtas de tipo CaMgHCO_3 , CaNaHCO_3 , NaCaHCO_3 , donde las aguas con mas alta conductividad eléctrica y contenido de HCO_3 son de tipo CaMgHCO_3 como se observa en las **Tablas 5 y 6**, y figura 43 debido probablemente a un mayor tiempo de residencia del agua y la disolución de los minerales ferromagnesianos presentes en este tipo de rocas. La presencia de los iones HCO_3 y Ca se puede atribuir a la disolución irreversible de los minerales silicatados. Esta hidrólisis de los silicatos viene sustentada por la relación molar $\text{HCO}_3 : \text{Ca}$ que suele ser mayor de 2.

Tabla 5. Tipos geoquímicos de agua subterránea. Rocas metamórficas.

Punto de agua	Clasificación Hidrogeoquímica	Formación	X	Y	Conductividad Eléctrica. (uS/cm)	HCO_3 (mg/l)
120-IID-003	Ca-Mg-Na- HCO_3	Neis Bucaramanga	1119832	1264449	106.4	63.4
109-IVB-003	Ca-Na- HCO_3	Neis Bucaramanga	1118025	1290544	97	65.9
109-IVD-10	Na-Ca- HCO_3	Neis Bucaramanga	1117332	1289353		29.3
109-IVD-16	Ca-Mg-Na- HCO_3	Neis Bucaramanga	1113539	1283393	178	116
120-IIB-02	Ca-Na-Mg- HCO_3	Neis Bucaramanga	1113150	1272100	40	48.8
109-IVD-08	Ca-Mg- HCO_3	Neis Bucaramanga	1115870	1286611	154	97.6
109-IVB-003	Ca-Na- HCO_3	Neis Bucaramanga	1118025	1290544	44	32.9
110-IIIC-033	Ca-Mg- HCO_3	Ortoneis Berlin	1123235	1287471	150	102
110-IIIC-023	Na-Ca- HCO_3	Ortoneis Berlin	1126016	1284410	46.9	34.2
110-IIIC-024	Ca-Na-Mg- HCO_3	Ortoneis Berlin	1126016	1284410	43.2	31.7
110-IIIC-031	Ca-Mg- HCO_3	Ortoneis Berlin	1123418	1287515	140	101
110-IIIC-025	Ca-Mg-Na- HCO_3	Ortoneis Berlin	1125442	1283819	80.4	48.8
110-IIIC-68	Ca- HCO_3	Ortoneis Berlín	1122990	1288644	312	195
110-IIIC-022	Na-Ca- HCO_3	Ortoneis Berlin	1127585	1282536	40	26.8
110-IIIC-029	Ca-Na-Mg- HCO_3	Ortoneis Berlin	1125981	1284395	44.2	31.7
110-IIIA-006	Ca- HCO_3	Silgara	1129101	1292875	67.3	46.6
110-IIIC-66	Na-Ca- HCO_3	Silgara	1122559	1287726	202	124
110-IIIC-040	Ca-Na-Mg- HCO_3 - SO_4	Silgara	1121675	1289291	12.5	12.2

Tabla 6. Tipos geoquímicos de agua subterránea. Rocas ígneas.

Punto de agua	Clasificación Hidrogeoquímica	Formación	X	Y	Conductividad Eléctrica uS/cm	HCO ₃ (mg/l)
120-IIB-01	Ca-Na-HCO ₃	Cuarzomonzomita Corcova	1114308	1270130	75.8	67.1
120-IIB-01	Ca-Na-HCO ₃	Cuarzomonzomita Corcova	1114308	1270130	75.8	67.1
109-IVD-04	Ca-Na-HCO ₃	Cuarzomonzonita Corcova	1113405	1286503	87	54.9
109-IVD-09	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Cuarzomonzonita Corcova	1119264	1280852	44	25.6
120-IID-06	Ca-Na-HCO ₃	Cuarzomonzonita Corcova	1117351	1267607	65.4	42.7
120-IIB-03	Ca-HCO ₃	Cuarzomonzonita Corcova	1114780	1274340	67	54.9
120-IID-004	Na-HCO ₃	Cuarzomonzonita Corcova	1119000	1263100	76	43.9
109-IVD-17	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Cuarzomonzonita Corcova	1114651	1284006	160	97.6
109-IVD-14	Ca-Mg-HCO ₃	Cuarzomonzonita Corcova	1118619	1285328	163	97.6
120-IIB-06	Ca-HCO ₃	Cuarzomonzonita Corcova	1118727	1279855	42.4	36.6
110-IIIC-014	Ca-Na-HCO ₃	Cuarzomonzonita Sta Barbara	1131731	1282840	61.9	35.4
110-IIIC-027	Na-Ca-HCO ₃	Cuarzomonzonita Sta Barbara	1125498	1281879	32.8	26.8
110-IIIC-013	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Cuarzomonzonita Sta Barbara	1132120	1284122	84.7	57.3
110-IIIC-010	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Cuarzomonzonita Sta Barbara	1133305	1285429	18.9	22
110-IIIC-051	Ca-Mg-HCO ₃	Cuarzomonzonita Sta Barbara	1127021	1288254	385	238
110-IIIC-060	Ca-Mg-HCO ₃	Cuarzomonzonita Sta Barbara	1126638	1288417	592	348
121-IA-05	Ca-Na-HCO ₃	Cuarzomonzonita Sta Barbara	1126389	1277367	31.2	28.1
110-III-A-004	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Plutón Paramo Rico	1131966	1290164	59	26.8
110-IIIA-005	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Plutón Paramo Rico	1131124	1290176	57.8	40.3

En el Diagrama Piper, **Figura 43**, se observa que la mayoría de las muestras de agua son de tipo bicarbonatada cálcica y/o magnésica, con excepción de 3 muestras pertenecientes a las formaciones Silgará, Neis de Bucaramanga y Cuarzomonzonita de La Corcova que tienen una mayor proporción de sodio (Na), aportado posiblemente por los minerales presentes en la roca y la muestra 110-III-C-40 de la Formación Silgará con un porcentaje mayor de SO₄ aportado probablemente por mezcla con aguas de otra procedencia.

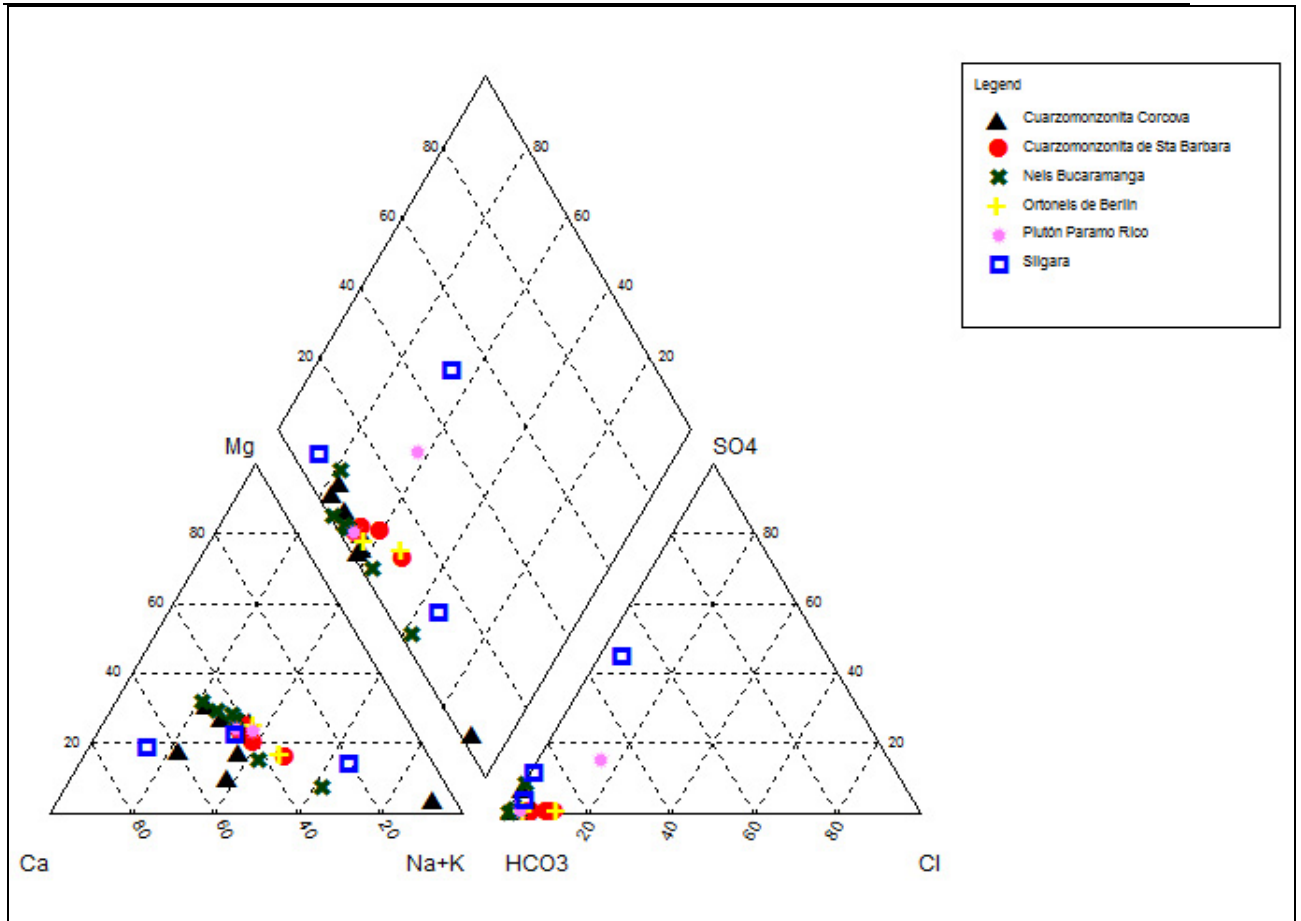


Figura 43. Diagrama Piper. Rocas ígneas y metamórficas.

5.2.2 Rocas sedimentarias

En los manantiales muestreados en las rocas sedimentarias predominan aguas mixtas de tipo CaMgHCO_3 , NaCaHCO_3 , $\text{CaSO}_4\text{HCO}_3$, $\text{CaMgHCO}_3\text{SO}_4$, como resultado de la disolución de los diferentes minerales presentes en ambientes oxidantes; en las rocas calcáreas prevalece el agua de tipo CaHCO_3 , **Tabla 7**, debido a la disolución de calizas con agua con cierto contenido en CO_2 , según las siguientes reacciones $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$.

Tabla 7. Tipos geoquímicos de agua subterránea. Rocas sedimentarias.

Punto de agua	Clasificación Hidrogeoquímica	Formación	X	Y	Conductividad Eléctrica uS/cm	HCO ₃ (mg/l)
110-III-C-48	Ca-Mg-HCO ₃	Girón	1127713	1287388	206	153
110-III-C-67	Ca-HCO ₃	Girón	1122256	1285308	335	220
121-IA-03	Ca-HCO ₃	Los Santos	1123775	1276425	127.6	92.7
121-IA-02	Ca-HCO ₃	Los Santos	1122378	1278027	155.1	140
110-III-C-63	Ca-HCO ₃	Los Santos	1127468	1287313	160	85.4
110-III-C-62	Ca-HCO ₃	Los Santos	1127745	1288486	158	104
110-III-C-44	Ca-HCO ₃ -SO ₄	Los Santos	1129056	1288444	12.5	7.3
110-III-C-26	Na-Ca-HCO ₃	Los Santos	1124951	1280395	32.8	25.6
110-III-C-055	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	Los Santos	1127750	1288254	651	305
110-III-C-56	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃	Los Santos	1126133	1288247	535	197
110-III-C-49	Ca-HCO ₃	Los Santos	1127723	1287729	255	162
110-III-C-50	Ca-SO ₄ -HCO ₃	Los Santos	1127657	1287810	332	97.6
110-III-C-64	Ca-HCO ₃ -SO ₄	Paja	1126081	1289469	680	386
110 IIIA 001	Ca-HCO ₃ -SO ₄	Paja	1125465	1290196	302	171
110-III-C-039	Ca-HCO ₃	Rosablanca	1123546	1281030	36	107
110-III-C-54	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	Rosablanca	1126462	1288520	963	348
121-IA-11	Ca-HCO ₃	Rosablanca	1123375	1275101	366	198
121-IA-08	Ca-HCO ₃	Rosablanca	1123844	1275529	427	256
110-III-C-47	Ca-HCO ₃ -SO ₄	Rosablanca	1125839	1287345	314	174
110-III-A-003	Ca-HCO ₃	Tablazo	1125719	1290607	464	293
110-III-A-002	Ca-HCO ₃	Tablazo	1125444	1290717	473	317
110-III-C-65	Ca-HCO ₃	Tablazo	1125382	1289867	537	332

En el Diagrama Piper, Figura 44, se observa que la mayoría de las muestras son de tipo bicarbonatada cálcica y/o magnésica, con excepción de la muestra 110-III-C-26 perteneciente a la Formación Los Santos que tiene una mayor proporción de sodio (Na), debido probablemente a procesos de cambio de bases, y algunas muestras que tienen una concentración mayor de SO₄, procedente de los minerales presentes en las formaciones Los Santos y Paja.

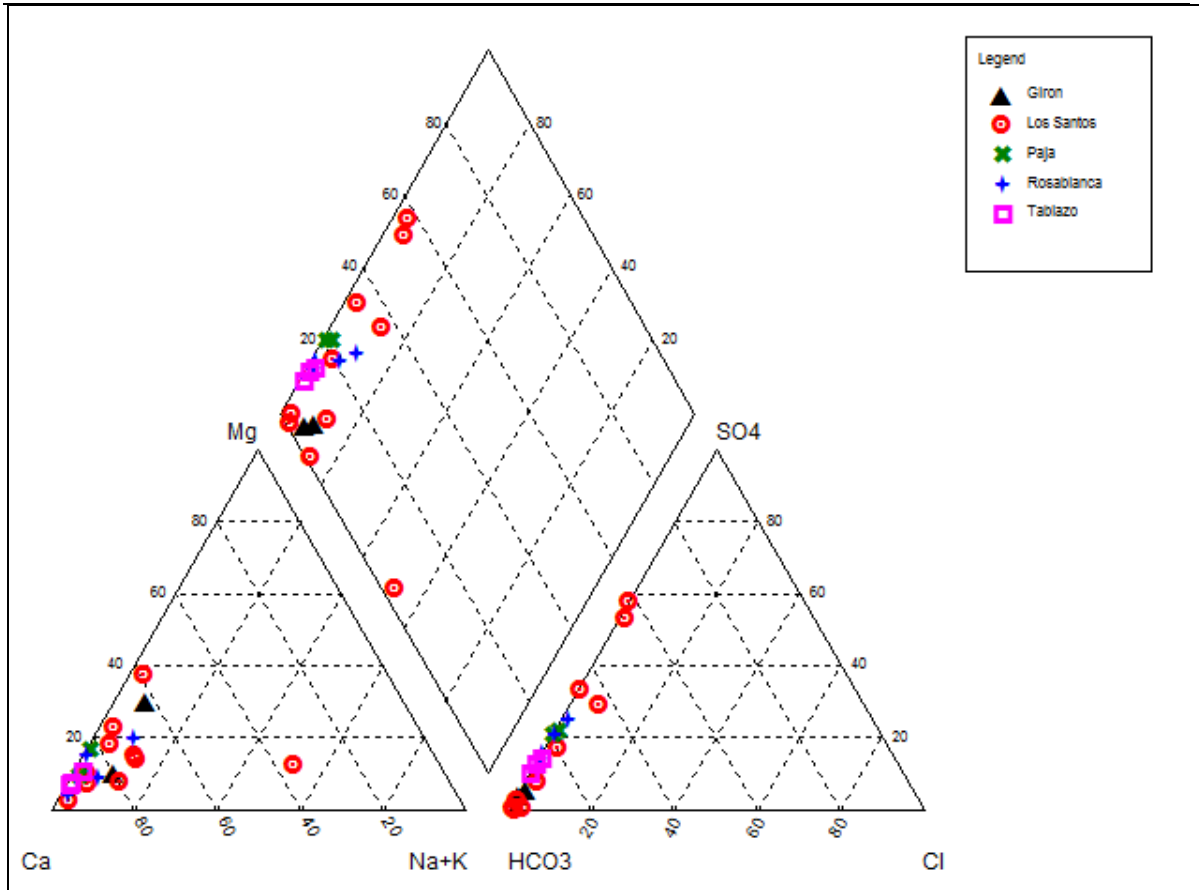


Figura 44. Diagrama Piper. Rocas sedimentarias.

6.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

Debido a que en todas las aguas muestreadas predomina el anión HCO_3 con concentraciones desde 7.1 hasta 386 mg/l, se presentan sobre el mapa geológico las concentraciones de HCO_3 con rangos desde < 50 mg/l hasta > 200 mg/l, Figura 45, donde se observa que los valores más altos se encuentran en la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y en las rocas sedimentarias. En todas las muestras de agua se aprecia una relación casi directa entre el ion HCO_3 y el contenido de sólidos disueltos totales, mayor concentración de Si en las rocas ígneas y metamórficas y de HCO_3 en las rocas sedimentarias.

6.3.1 Rocas ígneas y metamórficas

En el Diagrama Schoeller, Figura 46, se observa que las concentraciones de los principales iones en solución son relativamente bajas, presentando las mayores concentraciones en los iones bicarbonato (HCO_3) y calcio (Ca), debido al anhídrido carbónico disuelto en la atmósfera. En el Diagrama de Schoeller se observa casi la misma tendencia entre las relaciones de los iones principales en solución ($\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg}$ y $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4$).

La conductividad eléctrica menor de $500 \mu\text{S}/\text{cm}$, las concentraciones bajas en los principales iones en solución y el tipo de agua predominante CaMgHCO_3 indican aguas cerca de la zona de recarga con cortos tiempos tránsito.

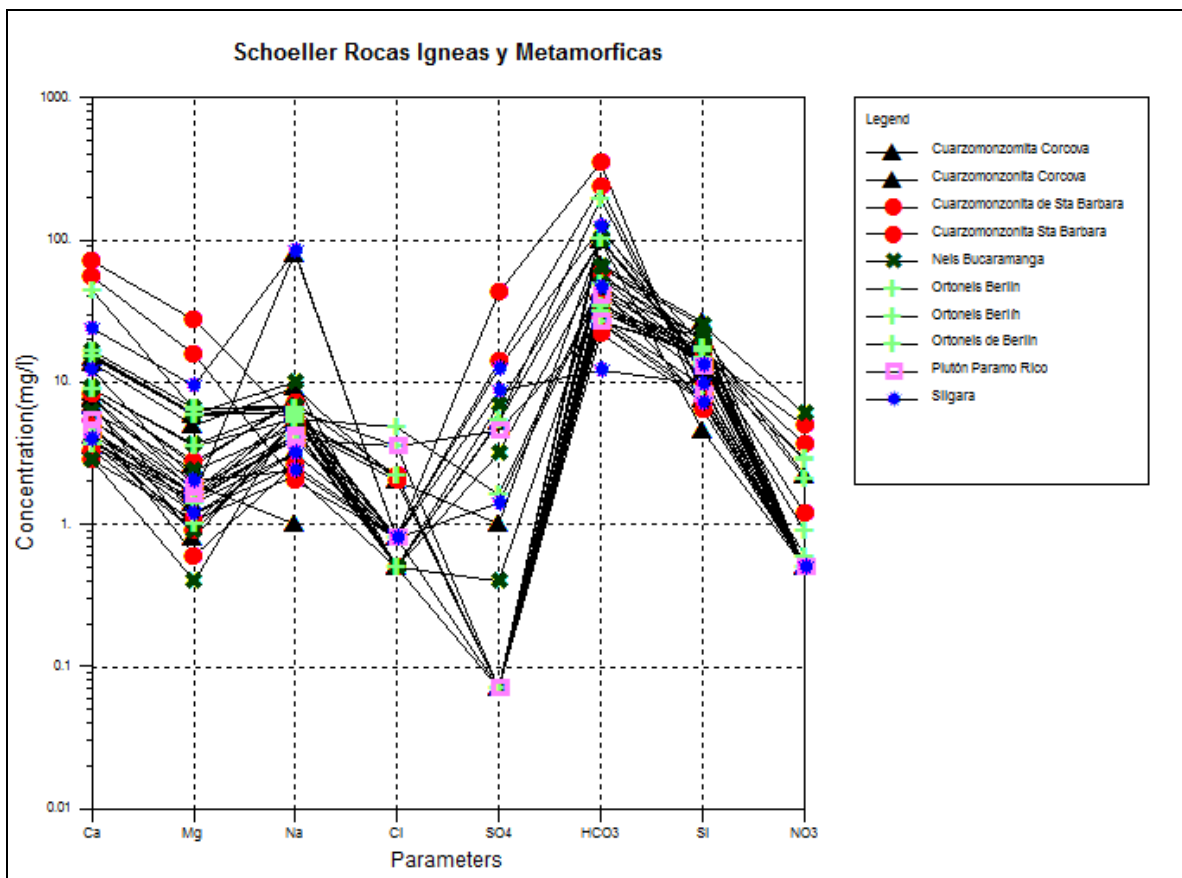


Figura 46. Diagrama de Schoeller. Rocas Ígneas y Metamórficas

6.3.2 Rocas sedimentarias

En la Tabla 7 y en el Diagrama Schoeller, **Figura 47**, se observa que la conductividad eléctrica y la concentración de algunos iones en solución es relativamente alta como los HCO_3 ($> 200 \text{ mg/l}$), los SO_4 (120 mg/l) y el Ca (136 mg/l). En el Diagrama de Schoeller, se

observa casi la misma tendencia entre las relaciones de los principales iones en solución ($\text{Ca} > \text{Mg}$ y $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$).

La conductividad eléctrica $< 700 \mu\text{S}/\text{cm}$, el amplio rango de variación de los iones HCO_3 , Ca y SO_4 , además del tipo de agua predominante, CaHCO_3 , indican aguas cerca de la zona de recarga en contacto con minerales solubles.

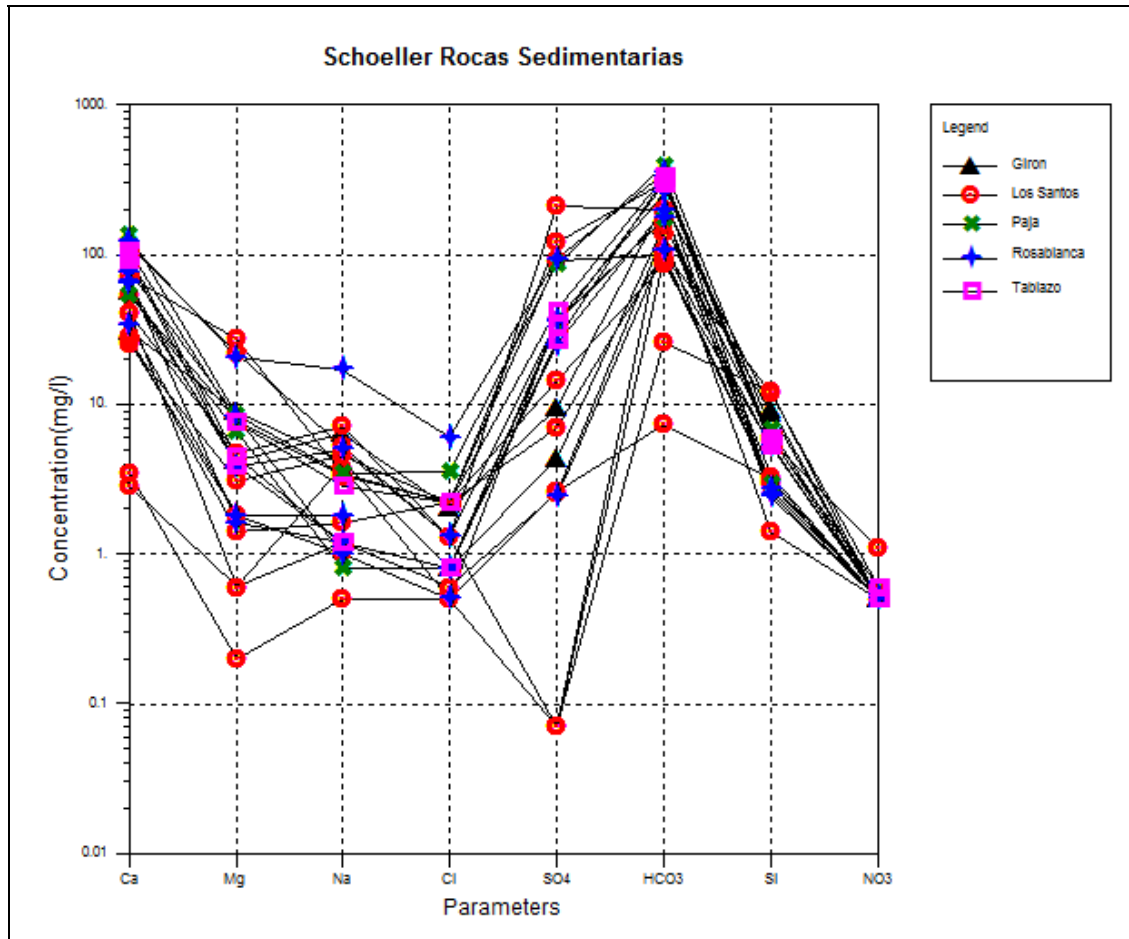


Figura 47. Diagrama de Schoeller. Rocas sedimentarias

7. CALIDAD DEL AGUA SUBTÁRRANEA

En la evaluación de calidad del agua subterránea se consideraron las concentraciones máximas admisibles para agua potable expuestas en el decreto 475 del Ministerio de la Protección Social.

La cantidad admisible para calcio es de 60 mg/l según el Decreto 1575 de 2007. La Organización Mundial de la Salud (OMS) indica límites de 75 y 200 mg/l. Los puntos que se observan en la **Figura 48** presentan valores superiores a 60 mg/l, los cuales requieren un tratamiento previo para consumo humano. El contenido de calcio (Ca) habitualmente es mayor en aguas subterráneas que en aguas superficiales.

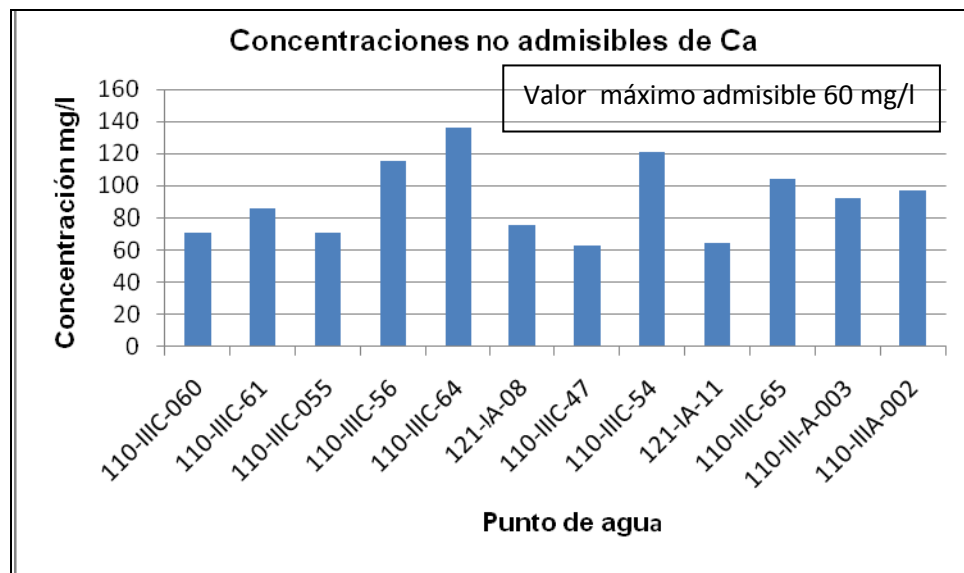


Figura 48. Concentraciones no admisibles de Calcio

El hierro se encuentra disuelto en el agua subterránea, formando sales solubles, generalmente férricas debido a un medio fuertemente reductor. El valor máximo admisible es de 0,3 mg/l (**Figura 49**), a los puntos que tengan un valor mayor se les debe realizar un tratamiento previo de aireación y sedimentación del ion en solución.

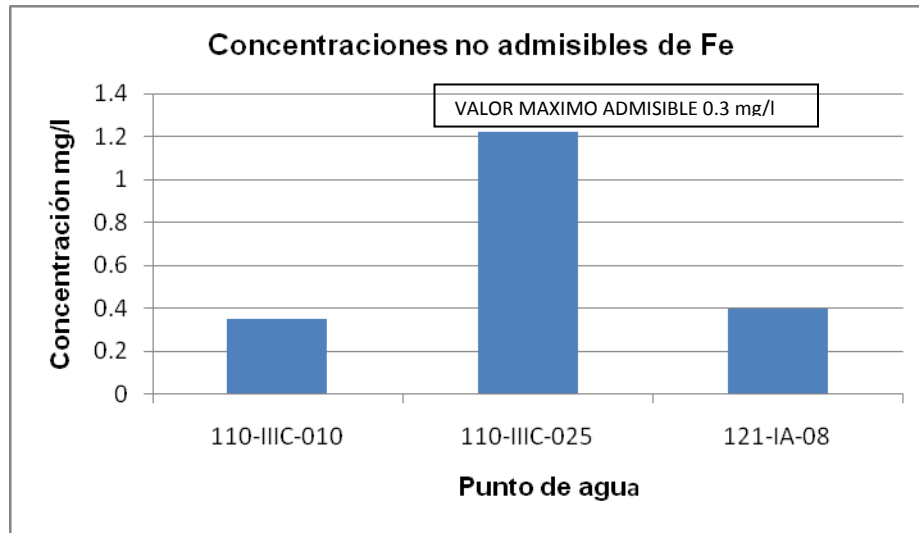


Figura 49. Concentraciones no admisibles de Hierro.

El ion manganeso en grandes cantidades es tóxico y afecta fundamentalmente al sistema nervioso central, además su presencia provoca el desarrollo de ciertas bacterias, por lo tanto se debe realizar un tratamiento previo para consumo humano. Los puntos de agua con concentraciones no admisibles para consumo humano cuyo valor máximo admisible es de 0.1 mg/l, se observan en la **Figura 50**.

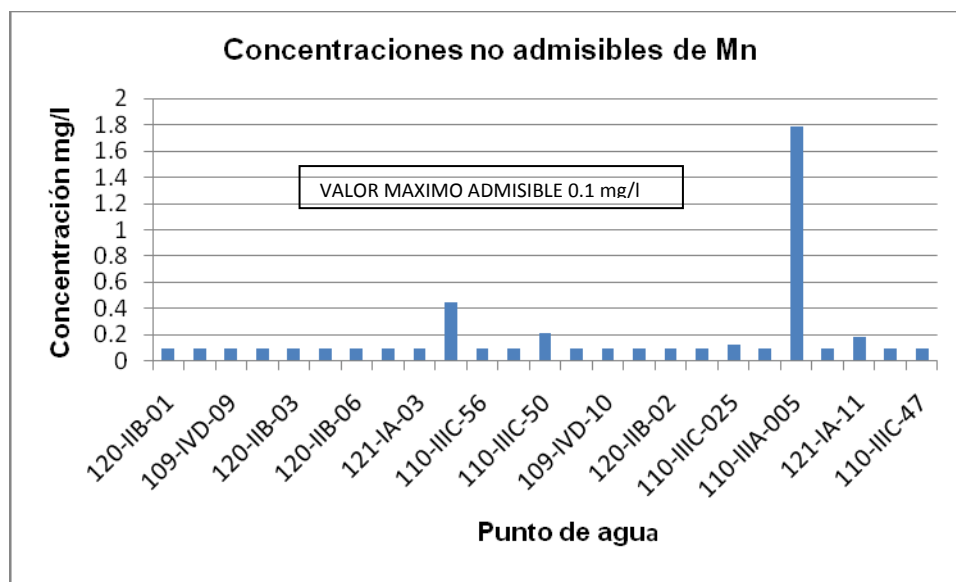


Figura 50. Concentraciones no admisibles de Manganeso.

El aluminio se encuentra combinado en casi todas las rocas bajo la forma de silicoaluminatos, principalmente en las arcillas, de tal forma que aparece en la mayoría de las aguas naturales. A los puntos que presentan valores mayores de 0,2 mg/l se les debe realizar un tratamiento para consumo humano. (**Figura 51**).

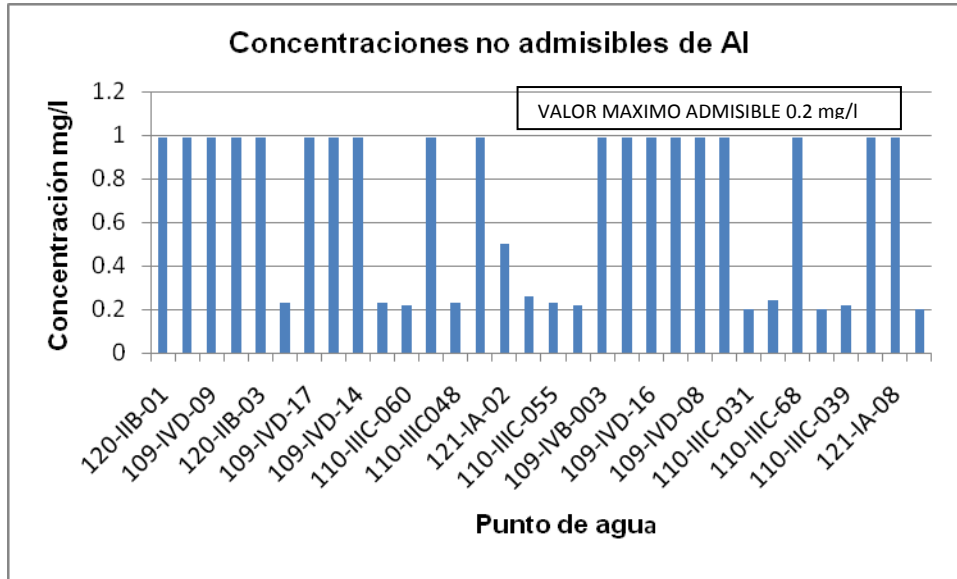


Figura 51. Concentraciones no admisibles de Aluminio.

8. ESQUEMA HIDROGEOLOGICO PRELIMINAR

Por las profundas diferencias en el comportamiento hidrogeológico entre las formaciones sedimentarias con porosidad primaria y las rocas cristalinas fracturadas, Gustafson y Krásný (1994) consideran que muchos términos y conceptos de uso corriente deberían ser revisados y modificados para el caso de medios muy heterogéneos y discontinuos. En este sentido, además del término acuífero, para cuya sustitución se propone el de conductor hidráulico, deberían adecuarse o reformularse los empleados para definir los parámetros hidráulicos típicos de medios continuos (permeabilidad, transmisividad, porosidad, almacenamiento y capacidad específica).

Las estructuras que permiten la acumulación y movimiento del agua en rocas cristalinas ígneas y metamórficas se definen como **conductores hidráulicos** (Gustafson y Krásný, 1994), a diferencia de los medios con porosidad primaria donde el término es acuífero. Este último, del latín "portador de agua", está consagrado para los reservorios subterráneos capaces de almacenar y transmitir agua independiente de sus dimensiones. Acuífero implica tanto al continente (esqueleto) como al contenido (agua) y se aplica a medios continuos con porosidad intergranular. Por lo tanto la aplicación del término acuífero es considerada impropia para un medio discontinuo, cuyas propiedades hidráulicas por porosidad primaria, se presentan como despreciables en relación con las secundarias.

El mayor interés hidrogeológico de las rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias que afloran en el área de estudio, se concentra en la zona fracturada. La mayoría de los manantiales inventariados están asociados con las zonas de alteración y diaclasamiento, con espesores que generalmente no superan los cinco metros y con posibilidades de almacenamiento poco significativo.

Debido a la falta de información hidrogeológica, los bajos caudales de los manantiales y los tipos geoquímicos de agua predominantes, característicos de zonas de recarga con corto tiempo de tránsito, se deduce que el flujo subterráneo en las rocas del Macizo es principalmente a través de la zona meteorizada o de la zona fracturada o diaclasada, poco desarrollada o sin conexión hidráulica.

Con base en los conceptos propuestos por Krásný y por la falta de información hidrogeológica que permita identificar los conductores hidráulicos, en el Macizo en

general, podemos clasificar las zonas meteorizadas, por su espesor, y las zonas diaclasadas por su falta de interconexión, como de bajo interés hidrogeológico.

Caso particular es el sector de Berlín, Figuras 52 y 53, que de acuerdo con la información proporcionada por la geoelectrica, se pueden apreciar zonas con porosidad primaria y alguna saturación en los materiales desde arcillosos, hasta arenosos de los depósitos cuaternarios, situados hacia el oeste de la localidad, y también en la parte meteorizada y saprolito del Ortoneis de Berlín, con resistividades entre 5 y 210 ohm-m. Aquí los materiales con porosidad primaria son los de mayor espesor con potencial acuífero hasta de 100 m.

Con porosidad secundaria y posible saturación se encuentran las rocas ígneas y metamórficas fracturadas como el Ortoneis de Berlín, con resistividades entre 210 y 1008 ohm-m, y espesores de acuerdo con los cortes geoelectricos que pueden llegar en algunos sitios hasta los 150 m.

Las resistividades altas desde 1008 y hasta 24331 ohm-m, en este caso, están relacionadas con rocas ígneas y metamórficas compactas, cuya resistividad es mayor cuanto menor sea su grado de fractura.

Con base en lo anteriormente expuesto, podemos decir que las zonas de interés hidrogeológico en el sector de Berlín, están restringidas a la cubierta de los depósitos cuaternarios sumado a las condiciones locales de meteorización y fracturamiento de las rocas ígneas y metamórficas, materiales para los cuales la superficie base, de acuerdo con la geofísica realizada en el área, se encuentra en el límite de resistividad de 1008 ohm-m, esto se muestra en los gráficos siguientes.

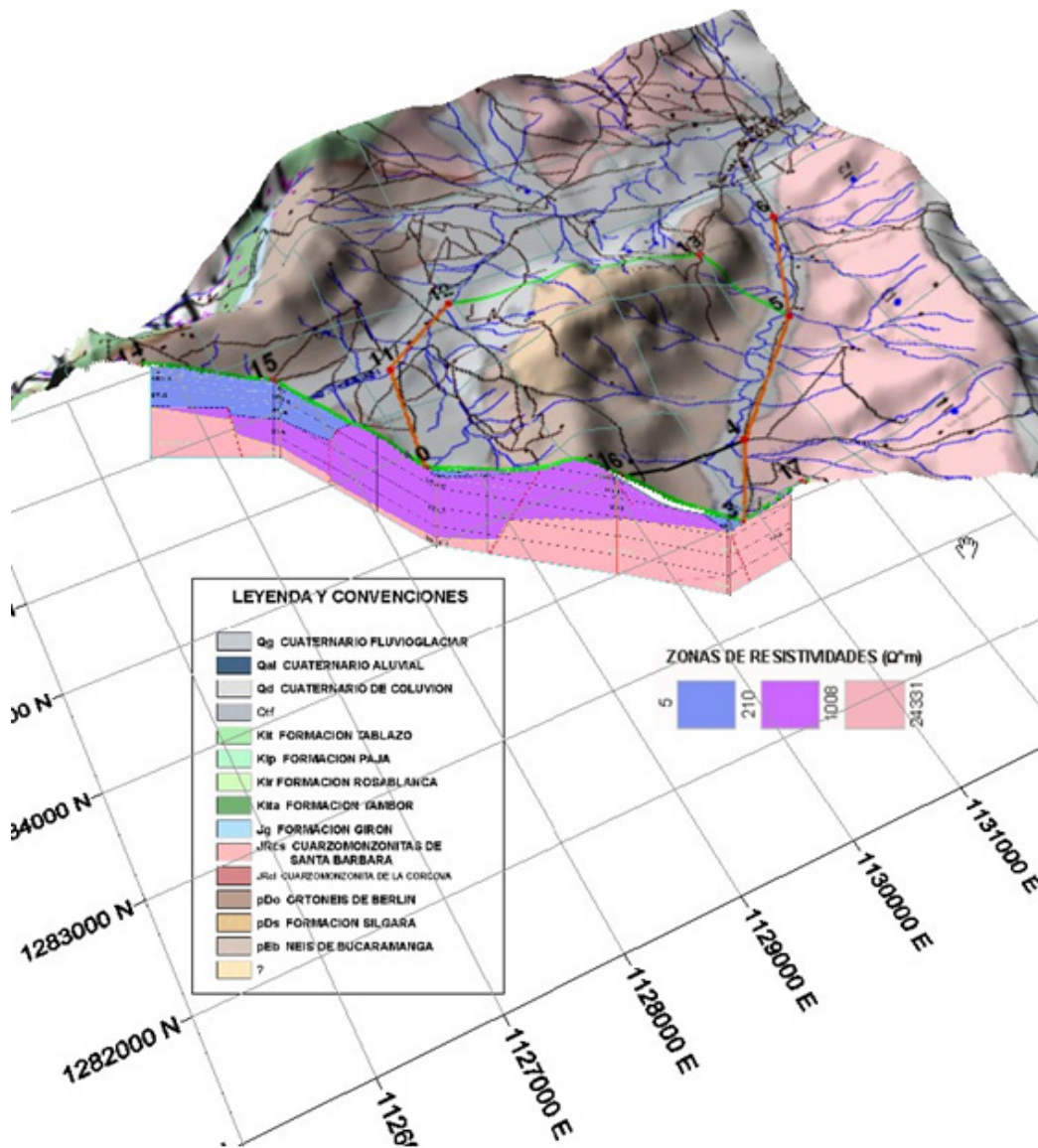


Figura 52. Esquema hidrogeológico Sector de Berlín.

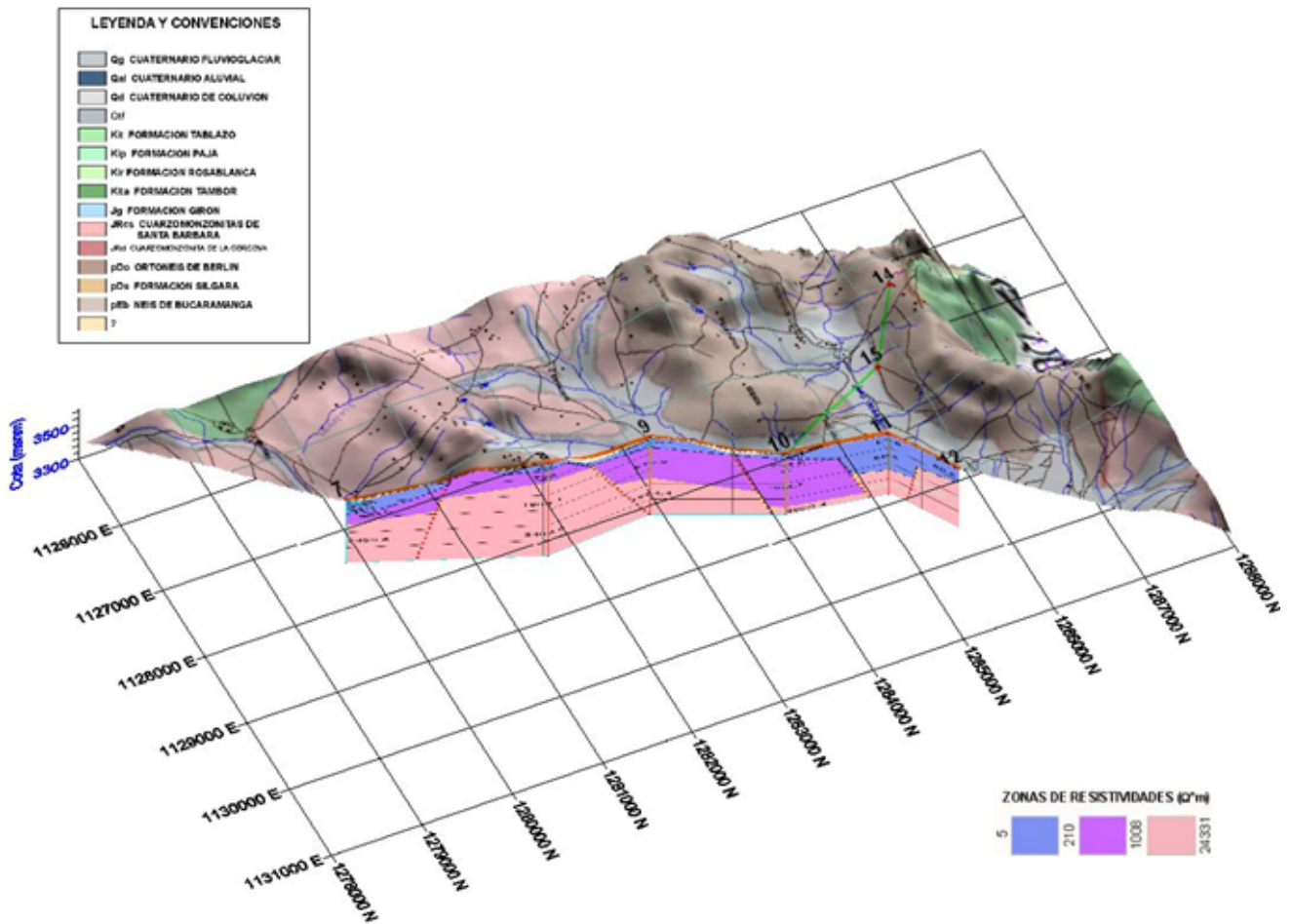


Figura 53. Esquema hidrogeológico Sector de Berlín.

BIBLIOGRAFÍA

- Catalan, I. 1969. Química del agua. Editorial Blume. Madrid- Barcelona, 355p
- Custodio, E y Llamas, R. 1996. Hidrología Subterránea, tomos I y II, Barcelona. 2350p.
- Franco, J.V. 2008. Prospección Geoeléctrica en el Macizo de Santander, Santander. INGEOMINAS.
- Guzmán y Chu, 2002 en Memoria Explicativa de la Investigación Geológica e Hidrogeológica en Macizo de Santander. INGEOMINAS- UIS
- Alexandra U., y Gómez, S., 2007. Memoria Explicativa de la Investigación Geológica e Hidrogeológica en el Macizo de Santander. INGEOMINAS-UIS.
- Vargas, M.C. e Hincapié, G.I. 2008. Inventario Hidrogeológico Macizo de Santander. INGEOMINAS.
- Vargas, L., 2007. Magnetometría y gravimetría en el Macizo de Santander.
- Coronado, W; Mejía, C; (2006). Cartografía geológica y caracterización estructural con fines hidrogeológicos en el sector nororiental de la cuenca del Río de Oro. Universidad Industrial de Santander.
- Ulloa, A, Gómez, S., 2007. Memoria Explicativa de la Investigación Geológica e Hidrogeológica en la Zona del Macizo de Santander. INGEOMINAS- UIS.