

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y REVISIÓN DE LA
VULNERABILIDAD, AMENAZA Y PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN DEL
AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CSRL**

Ing. JOSÉ ALFREDO RUEDA NÚÑEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y REVISIÓN DE LA
VULNERABILIDAD, AMENAZA Y PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN DEL
AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CSRL**

Ing. JOSÉ ALFREDO RUEDA NÚÑEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Magíster en Ingeniería Civil**

Director

SULLY GÓMEZ ISIDRO (I.C., M.Sc., Ph.D)

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

*Doña O y Don A... Al no haber palabras que
expresen todo mi agradecimiento hacia ustedes,
tan solo atino a escribir... Gracias
Hermanos... aunque no veamos la vida igual, sé
que me apoyan sinceramente
Amigos...dicha haberlos encontrado en el camino
y caminar un rato junto a ustedes*

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer a: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, por el aporte de información y espacio para la formación. A Sully Gómez Isidro por su dirección. A Teresita Betancur y Jean-Denis Taupin por sus aportes en la evaluación de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO DE REFERENCIA	20
1.1. Región de estudio	20
1.2. Relieve en la CSRL.....	23
1.3. Geología.....	25
1.3.1. Falla de Bucaramanga	25
1.4. Fenómeno de meteorización en el Macizo de Santander	36
1.5. Hidrología	37
1.5.1. Precipitación y clima	37
1.5.2. Evapotranspiración (EVT)	40
1.5.3 Oferta hídrica (OH)	42
1.6. Agua subterránea y formaciones acuíferas.....	42
1.6.1. Zona aluvial de Bucaramanga	43
1.6.2. Macizo de Santander	43
2. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	46
2.1. Conceptualización	46
2.2. Ideas precedentes del funcionamiento del agua subterránea	48
2.3. Formulación de un modelo hidrogeológico conceptual.....	49
2.3.1. Flujo de corta distancia a través de espesores meteorizados.....	49
2.3.2. Origen del agua subterránea y flujo de larga distancia.....	55
2.3.3. Esquema conceptual de flujo de agua subterránea.....	59

3. VALIDACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	63
3.1. Conceptualización	63
3.2. Validación: Técnica hidrogeoquímica e isotópica	65
3.2.1. Hidrogeoquímica.....	66
3.2.2. Isótopos estables del agua	82
3.3. Modelo hidrogeológico validado	85
4. EVALUACIÓN DE LA RECARGA	88
4.1. Revisión evaluaciones de recarga.....	88
4.2. Evaluación de recarga.....	90
5. VULNERABILIDAD, AMENAZA Y PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CSRL, BASADO EN UN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	99
5.1. Conceptualización.....	99
5.2. Estado de la evaluación de vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación del agua subterránea.....	100
5.3. Revisión de la evaluación de vulnerabilidad y peligro a la contaminación del agua subterránea	103
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	116
6.1. Conclusiones de la investigación.....	116
6.2. Recomendaciones y prospectiva del estudio del agua subterránea en la zona de estudio	119
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXOS	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ubicación zona de estudio (CSRL). Autor	21
Figura 2	Modelo 3D zona de la falla de Bucaramanga en la región de estudio. Vargas, J, 2009.....	26
Figura 3	Aptitud hidrogeológica de las fallas geológicas en el Macizo de Santander. Velandia, F, 2010.	31
Figura 4	Geología de la zona de estudio. INGEOMINAS – UIS, 2007.	35
Figura 5	Ciclo de precipitación media mensual multianual zona metropolitana. Arenas, J y Ruiz, J, 2005.	38
Figura 6	Ciclo de precipitación media mensual multianual zona Macizo de Santander. Arenas, J y Ruiz, J, 2005.....	38
Figura 7	Variación espacial de la precipitación media multianual en la CSRL. INGEOMINAS – UIS, 2007.	39
Figura 8	Variación espacial de la evapotranspiración en la CSRL. INGEOMINAS – UIS, 2007.	41
Figura 9	Inventario de nacimientos de agua en el Macizo de Santander. Autor	45
Figura 10	Esquema conceptual de nacimientos a lo largo de un parteaguas. Autor	50
Figura 11	Ubicación Línea de Flujo 1, parteaguas Tona – Frío. Autor	52
Figura 12	Relación elevación contra conductividad eléctrica línea de flujo 1, parteaguas Tona – Frío. Autor	53
Figura 13	Zona línea de flujo 2, parteaguas Oro – Lato. Autor.....	54
Figura 14	Relación elevación contra conductividad eléctrica línea de flujo 2, parteaguas Oro – Lato. Autor.....	55
Figura 15	Variación espacial conductividad eléctrica en la CSRL. Autor	57
Figura 16	Esquema de interacción entre flujo de en zona meteorizada y fallas geológicas. Autor	61
Figura 17	Bloque diagrama Macizo de Santander. Autor	62
Figura 18	Ubicación puntos de análisis de iones en la zona de estudio. Autor ..	68

Figura 19	Diagrama de Schöeller puntos muestreados Macizo de Santander.	
Autor		70
Figura 20	Diagrama de Schöeller zona de falla de Bucaramanga y descarga.	
Autor		71
Figura 21	Diagrama de Piper puntos muestreados Macizo de Santander. Autor ...	
		72
Figura 22	Diagrama de Stiff aguas analizadas CSRL. Autor.....	74
Figura 23	Variación espacial diagrama de Stiff en la CSRL. Autor	75
Figura 24	Relación conductividad eléctrica contra bicarbonatos aguas analizadas en la CSRL. Autor	78
-Figura 25	Variación espacial bicarbonatos en el agua subterránea en la zona de estudio. Autor.....	79
Figura 26	Vista 3D zona de estudio. Autor	81
Figura 27	Recta meteórica local zona de estudio, muestras 2002 – 2004. Gómez, et al, previsto 2013.	82
Figura 28	Efecto orográfico de ¹⁸ O en lluvias y manantiales (2002 – 2006). Gómez, et al, previsto 2013.	83
Figura 29	Resultados de Oxígeno 18 en zona de falla y Macizo de Santander, muestreo 2010, contra efecto orográfico. Gómez, et al, previsto 2013.....	84
Figura 30	Bloque diagrama esquema de flujo validado en la CSRL. Autor	87
Figura 31	Ubicación estaciones de caudal en el río Frío operado por amb y río de Oro operado por IDEAM. Autor	91
Figura 32	Caudales simulados modelo TETIS. Arriba: río de Oro. Abajo: río Frío. Autor	94
Figura 33	Flujo mensuales de precipitación, recarga y evapotranspiración en la cuenca del río Frío, Año 2000. Autor	97
Figura 34	Flujo mensual de precipitación, recarga y evapotranspiración en la cuenca del río de Oro, Año 2000. Autor.....	98
Figura 35	Primer escenario parámetro profundidad del agua subterránea aplicando modelo conceptual. Autor	105

Figura 36 Segundo escenario parámetro profundidad del agua subterránea aplicando modelo conceptual. Autor	106
Figura 37 Tercer escenario parámetro profundidad del agua subterránea aplicando modelo conceptual. Autor	107
Figura 38 Primer escenario vulnerabilidad a la contaminación en la CSRL, ajustada al modelo conceptual. Autor	109
Figura 39 Segundo escenario vulnerabilidad a la contaminación en la CSRL, ajustada al modelo conceptual. Autor	110
Figura 40 Tercer escenario vulnerabilidad a la contaminación en la CSRL, ajustada al modelo conceptual. Autor	111
Figura 41 Peligro a la contaminación del agua subterránea en la CSRL, ajustado al modelo conceptual. Autor.....	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Resultados de iones para validación del modelo conceptual	67
Tabla 2	Flujos anuales de algunas componentes año 2000 cuencas río de Oro y río Frío	95
Tabla 3	Resultados metodología PATHS	102
Tabla 4	Resultados metodología PATHS, ajustados al modelo conceptual.	112
Tabla 5	Resultados relativos metodología PATHS, ajustados al modelo conceptual.....	112
Tabla 6	Resultados evaluación de peligro a la contaminación, ajustado al modelo conceptual.....	114

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	127
Anexo B	UBICACIÓN PUNTOS DE AGUA MUESTREADOS PARA ANÁLISIS DE IONES EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	129
Anexo C	INSUMOS MODELO TETIS.....	131

RESUMEN GENERAL

TÍTULO: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y REVISIÓN DE LA VULNERABILIDAD, AMENAZA Y PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CSRL.*

AUTOR: JOSÉ ALFREDO RUEDA NÚÑEZ.**

PALABRAS CLAVE: Modelo hidrogeológico conceptual, flujo de larga distancia, flujo en zona meteorizada, cuenca superior del río Lebrija, hidrogeoquímica, isótopos.

CONTENIDO: En la cuenca superior del río Lebrija el medio geológico está caracterizado por condiciones estructurales y litológicas que, entre otras, condicionan el flujo de agua subterránea. La falla de Bucaramanga-Santa Marta con dirección N-S es el rasgo estructural más notable, que divide la zona de estudio en dos geomorfologías y litologías diferentes. Al oriente se encuentra el Macizo de Santander, conformado por rocas cristalinas fracturadas y meteorizadas de interés hidrogeológico. Al occidente se encuentran rocas sedimentarias en abanicos aluviales, donde se identifican acuíferos como el acuífero superficial y el profundo en la formación Bucaramanga. En este trabajo se presenta un modelo conceptual del flujo de agua subterránea desde el Macizo de Santander, pasando por la falla de Bucaramanga, hasta los acuíferos en la zona aluvial. Se pudieron reconocer y validar con técnica hidrogeoquímica e isotópica dos tipos de flujo en el Macizo de Santander, que están condicionados por la geomorfología, la meteorización y la geología estructural; un flujo de corta a mediana distancia en espesores meteorizados y fracturados a lo largo de zonas de parteaguas, y otro de larga distancia a través de fallas geológicas. La creación del modelo hidrogeológico que apoyará procesos de gestión y conservación del recurso hídrico, aporta al entendimiento del agua subterránea en la zona de estudio. Se realizó una revisión de una evaluación de vulnerabilidad y peligro a la contaminación del agua subterránea, con tres escenarios ajustados al modelo conceptual donde se varió la profundidad del nivel freático.

* Trabajo de Grado de Investigación

** Facultad de Ciencias Físico Mecánicas. Escuela Ingeniería Civil.
Director (I.C., M.Sc., Ph.D) Sully Gómez Isidro

GENERAL SUMMARY

TITLE: HIDROGEOLOGICAL CONCEPTUAL MODEL AND REVIEW OF VULNERABILITY, THREAT AND HAZARD OF GROUNDWATER POLLUTION IN THE CSRL.*

AUTHOR: JOSÉ ALFREDO RUEDA NÚÑEZ.**

KEYWORDS: Hydrogeological conceptual model, long scale flow, flow through meteorized zone, Lebrija River Upper Basin, Hydrogeochemistry, isotopes.

ABSTRACT: Geological media in the Lebrija River Upper Basin is characterized by lithological and structural conditions which, among others, govern the groundwater flow. The Bucaramanga-Santa Marta fault with N-S direction is the most notable structural feature, which splits the study area in two different lithological and geomorphologic zones. At the east side is the Macizo de Santander composed by fractured and meteorized crystalline rocks showing hydrogeological interest. At west are placed sedimentary rocks in alluvial fans where aquifers such as shallow and deep aquifer in the formation Bucaramanga were identified. In this work a conceptual model of the flow from the Macizo de Santander, passing through the Bucaramanga-Santa Marta fault, unto the aquifers in alluvial zone is shown. In the Macizo de Santander were identified and validated with hydrogeochemical and isotopic techniques two classes of flow governed by geomorphology, meteorization and structural features. One short/medium scale flow through meteorized-fractured across the watershed and other long scale flow across geologic faults. The creation of an hydrogeological model contributes in process of management and conservation of the water resource. A review of an assessment of groundwater pollution vulnerability and hazard was carried out, with three different scenarios adjusted to the conceptual model by varying the groundwater depth.

* Master's Degree Thesis Work

** Physic-Mechanics Engineering Faculty. School of Civil Engineering.
Advisor (I.C., M.Sc., Ph.D) Sully Gómez Isidro

INTRODUCCIÓN

La región de estudio comprende el área metropolitana de Bucaramanga y sus municipios vecinos, que se encuentran ubicados geográficamente en el nororiente del departamento de Santander, en la cuenca superior del río Lebrija (CSRL), una zona en la que habitan cerca de 1 030 000 personas. Esta zona de estudio está constituida por las subcuencas del Río de Oro, río Tona y río Frío, que hacen parte de la llamada CSRL, cuya extensión es de 869 km². Aunque la cuenca del río Suratá también hace parte de la CSRL, no fue tomada en cuenta por presentar características diferentes que deberán ser estudiadas en futuras investigaciones.

En la zona de estudio existen dos empresas prestadoras de servicios públicos que abastecen de agua potable, mediante la captación de fuentes superficiales de los ríos Tona, Frío y de Oro. En épocas de secas con pocas lluvias, el caudal transportado por los ríos es flujo base, procedente de sistemas acuíferos que se encuentran en contacto con los cuerpos superficiales de agua. El conocimiento actual nos muestra que una gran proporción del agua transportada por los ríos a lo largo del año proviene de formaciones acuíferas. Desde la academia se aborda el estudio del recurso hídrico subterráneo, indagando su dinámica natural de flujo y almacenamiento. En esta tesis se propone generar conocimiento que permita crear pautas y herramientas o criterios que se puedan aplicar en la creación de una legislación con vistas al manejo de temas relacionados el recurso hídrico subterráneo.

La geología de la zona de estudio está marcada por el paso de la falla de Bucaramanga, rasgo estructural que es de gran importancia para entender el flujo del agua subterránea, ya que divide la zona de recarga del agua subterránea y la zona de almacenamiento en los sistemas acuíferos. Otros rasgos estudiados son la clasificación litológica de las capas geológicas, a partir de las cuales se crean ideas del comportamiento hidráulico y químico al paso del agua subterránea; la

geología estructural, que muestra la posibilidad del flujo en rocas duras; las geoformas, que condicionan los caminos que toma el agua subterránea en el subsuelo, y la hidrología superficial, que muestra la disponibilidad de agua.

Se creó un modelo hidrogeológico conceptual del agua subterránea en la cuenca superior del río Lebrija con el propósito de contribuir a la formalización del conocimiento actual del agua subterránea, en respuesta a la creciente necesidad de entender su comportamiento, tal como lo contempla el Plan Nacional de Aguas Subterráneas, el cual está enmarcado por la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. El esquema de flujo propuesto en este trabajo está compuesto por dos tipos de flujo, diferenciados por características como la distancia que recorren desde su recarga hasta su descarga, la edad relativa y el medio en el que se da el transporte del agua. El primer flujo de agua subterránea identificado se da a través de espesores meteorizados en zonas de parteaguas, con un tiempo de residencia bajo y de corta distancia. El segundo flujo de agua subterránea se da a lo largo de medio fracturado en zonas de fallas geológicas, con un tiempo de residencia mayor al primer flujo y es considerado de larga distancia, alcanzando a recorrer decenas de kilómetros. Con el apoyo del análisis de resultados de iones y de isótopos se logró una primera aproximación a la validación del modelo hidrogeológico conceptual.

La caracterización hidrogeológica de la cuenca fue complementada con una evaluación de recarga de acuíferos, realizada sobre la cuenca del río de Oro y parte alta de la cuenca del río Frío para el año 2000. Se ajustó el modelo hidrológico distribuido TETIS en escala temporal diaria y el modelo físico en celdas de 30 x 30 m. Los resultados obtenidos muestran valores de recarga que superan el 24 % de la precipitación total promedio multianual, un resultado indicativo de la importancia del recurso subterráneo en la CSRL.

Como una primera aplicación del modelo hidrogeológico se planteó la revisión de una evaluación a la vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación del agua subterránea en la CSRL. Con esto se espera mostrar la aplicabilidad de este modelo conceptual, además de actualizar los mapas que fueron obtenidos en esa evaluación. Se encontró que el modelo hidrogeológico conceptual aporta nuevos criterios para estimar la profundidad del nivel freático, con lo que se ajustó la evaluación de vulnerabilidad a la contaminación realizada con la metodología PATHS.

1. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se presenta el marco de referencia, dónde se define la región de estudio; población y rasgos socioeconómicos, además de las características geológicas, hidrológicas, de la vegetación y zonas de vida, y se muestra la caracterización del fenómeno de la meteorización en el Macizo de Santander. Esta información será utilizada para complementar y ayudar al planteamiento del modelo conceptual de flujo que se desarrolla durante el presente trabajo. La geología, que comprende las características litológicas y estructurales de las rocas, aportando en la caracterización del medio físico en donde se da el flujo de agua subterránea. Por otra parte, la hidrología, la vegetación y las zonas de vida representan las características del medio que interactúa con el sistema subterráneo, que condicionan las entradas al sistema subterráneo. El fenómeno de meteorización genera cambios en las propiedades hidráulicas de las rocas cristalinas en el Macizo de Santander, que permiten en algunos casos el flujo de agua subterránea.

1.1. Región de estudio

La región de trabajo se encuentra conformada por las subcuencas del río Oro, Frío y Tona, que hacen parte de la llamada Cuenca Superior del Río Lebrija. La subcuenca del río Suratá que también hace parte, pero no se incluye debido a que es una gran área que constituye particularidades diferentes. La región de estudio se encuentra ubicada en el departamento de Santander de la República de Colombia, al sur del continente americano (ver Figura 1). La extensión total aproximada de trabajo es de 869 Km². La subcuenca de mayor extensión es la del río de Oro, seguida por Tona y Frío.



Figura 1 Ubicación zona de estudio (CSRL). Autor

La CSRL se ubica en la cordillera oriental de los andes, presentando relieves montañosos a planos y pendientes altas a muy bajas. En La figura 1 se representa el lineamiento de la falla de Bucaramanga-Santa Marta. Esta es una falla es el rasgo estructural más importante, dividiendo la zona en dos. Cada una de las dos partes se diferencia de la otra en aspectos geomorfológicos y geológicos: al oriente de la falla el Macizo de Santander está conformado por rocas metamórficas e ígneas, y en una menor proporción rocas sedimentarias, el relieve es montañoso; y al occidente se encuentra la zona aluvial compuesta en su totalidad por rocas sedimentarias, en su relieve se pueden identificar mesas sedimentarias y zonas de escarpe.

La red de drenaje de la cuenca presenta la particularidad que todos los ríos tienen sus nacimientos en el Macizo de Santander, esta es una apreciación muy significativa en relación a la importancia de este Macizo rocoso en la dinámica del recurso hídrico superficial. El río de Oro nace a los 3500 m s. n. m., río Tona nace a los 3850 m s.n.m.

y el río Frío a los 2600 m s. n. m. Los ríos más caudalosos en la zona de estudio son el río de Oro, Tona y Frío. El río Frío desemboca en el río de Oro a la altura del municipio de Girón, el río Tona desemboca en el río Suratá, quién luego se une al río de Oro para formar, en el sitio Café Madrid, el río Lebrija.

En la división política, existen cinco municipios asentados en la CSRL, estos son Bucaramanga, Girón, Piedecuesta, Floridablanca, conformando el área metropolitana de Bucaramanga, y Tona. El área metropolitana de Bucaramanga tiene las cabeceras municipales en la zona plana y el municipio de Tona en el Macizo de Santander. La población total de la cuenca al año 2005 era de 1.028.364 habitantes (DANE, 2005). El municipio de Bucaramanga es la capital del departamento de Santander, además de ser el municipio más poblado del departamento, albergando más de la mitad de la población total del departamento. La zona plana presenta la mayor densidad poblacional, alojando casi la totalidad de los habitantes de la cuenca.

La Economía en el municipio de Tona está basada en actividades agrícolas, ganaderas, forestales y mineras, en el sector secundario industria y agroindustria, y en el sector terciario el comercio y los servicios (EOT municipio de Tona, 2003).

El municipio de Bucaramanga, capital del departamento, tiene su economía basada en la industria del calzado y peletería, joyería, desarrollando cerca del 70 % de la actividad joyera del país, sumado a las confecciones infantiles y al sector metalmecánico (POT municipio de Bucaramanga, 2003).

El municipio de Floridablanca tiene una economía basada en el sector terciario, en especial la actividad comercial. Las actividades industriales más importantes se dedican a la producción de alimentos, fabricación de prendas de vestir y fabricación de minerales no metálicos (POT municipio de Floridablanca, 2003).

El municipio de Piedecuesta basa su economía en la agricultura, debido al gran atractivo que representa la variedad del relieve y la presencia de diferentes pisos

térmicos, que generan diversidad de productos. Los productos básicos de la economía de Piedecuesta son la caña de azúcar y el tabaco, siendo también un gran productor de mora, también tiene otros cultivos como la arveja, el trigo, la cebolla, las hortalizas, la arracacha, pastos, verduras, maíz, plátano, yuca y tomate (POT municipio de Piedecuesta, 2003).

El municipio de Girón tiene vocación agrícola, produciendo piña, tabaco, maíz, maracuyá, tomate y cacao (POT municipio de Girón, 2003).

El abastecimiento de agua en la CSRL se lleva a cabo por la empresa de acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb) para el municipio de Bucaramanga, Girón y Floridablanca y la empresa piedecuestana de servicios públicos para el municipio de Piedecuesta, en el sector del Macizo de Santander se identifican gran cantidad de abastecimientos de agua de nacimientos, también existen licencias de explotación de agua subterránea por particulares, aunque en la actualidad este consumo no es representativo. El abastecimiento de agua potable está basado en casi la totalidad del aprovechamiento de fuentes hídricas superficiales, que están fuertemente relacionadas con el recurso hídrico subterráneo por el aporte de flujo base.

1.2. Relieve en la CSRL

Un modelo digital de elevaciones (MDE) es una estructura discreta de datos que representa de manera digital la altitud de la superficie del terreno, que se distribuye en el espacio sobre una superficie de dos dimensiones (Pérez, D, 2010). El MDE es la base espacial sobre la que se pueden realizar gran variedad de tareas, como la definición de drenajes, delimitación de cuencas, reconocimiento de geoformas entre otros; además es base para la construcción de mapas como direcciones de flujo, celdas acumuladas y pendientes.

El MDE que se presenta en este trabajo fue desarrollado por Pérez, D (2010), a partir de una imagen de radar SRTM con resolución espacial de 1"x1" en el sistema de

referencia WGS-84. El MDE de la CSRL está en resolución espacial de 30x30m, en el sistema de referencia MAGNA SIRGAS y fue validado con 33 puntos tomados en campo y 11 mojones georreferenciados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

En la cuenca se encuentran elevaciones de van desde los 612 m s. n. m. en el punto Café Madrid, hasta los 3911 m s. n. m. en el sector Berlín. En cuanto a las pendientes se pueden ver valores entre 2 % y 35 % en la zona plana; los valores van desde 2 % hasta cerca del 500 % en el Macizo de Santander¹. En el anexo 1 se presentan los mapas MDE y de pendientes. Se ve de manera clara la influencia que tiene la falla de Bucaramanga en el relieve y en las pendientes, dividiendo la zona en dos.

La geomorfología muestra las características generales de las formas que se encuentran en la zona de estudio, a partir de estas se puede llegar a conclusiones acerca de escorrentía, áreas de recarga, tránsito y descarga de agua subterránea. Las formas del relieve son el resultado de la interacción entre factores como la tectónica, litología y tipos de procesos erosivos.

El Macizo de Santander presenta un relieve montañoso, se pueden identificar zonas de cuchillas que dividen las subcuencas con pendientes muy altas, en estas zonas se presentan espesores meteorizados resultado de un proceso de meteorización por el agua y de fracturamiento por efecto del paso de fallas geológicas. Se pueden observar drenajes superficiales controlados en algunos sectores por la presencia de fallas geológicas. En el sector de Berlín se identifica un altiplano no hace parte de la CSRL, pero se sospecha que está conectado subterráneamente con la CSRL, de ser esto cierto se situaría dentro de la misma cuenca hidrogeológica.

En la zona aluvial se observan mesas sedimentarias (e.g. meseta de Bucaramanga, mesa de Ruitoque, mesa de Los Santos), que se encuentran separadas por cuerpos

¹ Los valores de pendiente fueron obtenidos a partir del MDE con resolución espacial de 30x30m.

superficiales de agua y limitadas por zonas de escarpe. Estas formas limitan la extensión de las formaciones acuíferas sedimentarias.

1.3. Geología

La zona de estudio se ubica entre los cuadrángulos H12 y H13 del INGEOMINAS (Ward, D y Goldsmith, 1973). La falla de Bucaramanga – Santa Marta (Velandia, F, 2010) divide la zona en dos, una parte alta al oriente llamada Macizo de Santander y otra de menor nivel topográfico al occidente en dónde se ubica el área metropolitana de Bucaramanga. Aprovechando esta clasificación natural, se manejará la geología de cada zona por separado ya que cada una tiene características particulares.

El tema geológico en el presente aparte se divide así: falla de Bucaramanga, Macizo de Santander y zona aluvial de Bucaramanga

1.3.1. Falla de Bucaramanga

La falla de Bucaramanga es una falla regional, que se ha cartografiado en una longitud de 600 km. Su desplazamiento es de rumbo sinextral, acompañado de grandes desplazamientos verticales. Su dirección es NS y buzamiento vertical. En la zona de falla se están generando zonas de convergencia (zonas de compresión con desarrollo de levantamientos), formándose patrones anastomosados, donde aparecen fallas paralelas, conjugadas y dextrales (Beltrán, R y Rey, A, 2002 y Velandia, F, 2010). Las fallas paralelas presentan un desplazamiento sinextral igual que la falla principal. Las fallas conjugadas presentan un ángulo bajo al unirse con la falla principal y las fallas dextrales desplazan la falla principal, las fallas paralelas y conjugadas. En una vista 3D de la zona de la falla de Bucaramanga (ver figura 2) se puede ver que divide la región en dos geomorfologías diferentes, tal como se había dicho anteriormente.

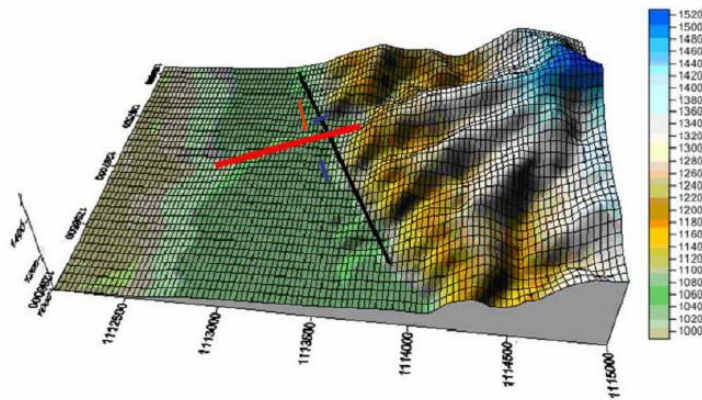


Figura 2 Modelo 3D zona de la falla de Bucaramanga en la región de estudio.
Vargas, J, 2009.

1.3.2. Macizo de Santander

El Macizo de Santander está compuesto por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias en menor proporción, con edades desde el Precámbrico hasta el Cretácico Inferior, este conjunto se encuentra cubierto parcial y discontinuamente por depósitos sedimentarios de edad reciente y de origen diverso (INGEOMINAS-UIS, 2007). A continuación se listan las formaciones geológicas presentes en el Macizo de Santander.

Neis de Bucaramanga (pEb): Proterozoico. Constituye la parte Basal del Macizo de Santander, se identifican rocas metamórficas de alto grado y origen sedimentario, además estas rocas atestiguan la evolución tectónica del Macizo. Esta unidad se caracteriza por manifestar variaciones en textura y composición, por lo tanto se ha planteado una diferenciación del Neis de Bucaramanga así: Neis biotítico, Neis anfibólico, en menor proporción Neis cuarzofeldespático y migmatitas. El neis ocupa 153 Km².

Ortoneis de Berlín (pDo): Paleozoico. Cuerpo metamórfico de origen ígneo, con estructura néisica, aspecto masivo y composición félsica a intermedia. El ortonéis de Berlín, se aprecia como un cuerpo alargado dispuesto en dirección NS, ocupando un 8.8 % del Macizo de Santander.

Formación Silgará (pDs): Paleozoico. Es una secuencia de rocas clásticas metamorfizadas, de estratificación delgada, compuestas por pizarras y filitas. La formación se presenta en la parte central de la zona de estudio, como fajas discontinuas con orientación principalmente en sentido NS, ocupando un 9.5% del Macizo de Santander.

Tonalita del Plutón de Páramo Rico (TRt): Mesozoico. Es un cuerpo intrusivo tonalítico de color gris, que abarca una extensión en el área de trabajo de cerca de 3 Km², se encuentra distribuido 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 30 %, cuarzo 20 %, plagioclasa 40 %, feldespato potásico 10

Cuarzomonzonita de La Corcova (TRJc): Mesozoico. Esta unidad tiene variaciones de Cuarzomonzonita gris, Granodiorita y Diorita. Generalmente la Cuarzomonzonita de La Corcova se caracteriza por estar constituida por una roca equigranular, de grano fino a medio, de textura sacaroidea, con biotita uniformemente diseminada de color gris. En el Macizo de Santander esta unidad se observa como dos cuerpos, de forma alargada, con una orientación NS, ocupando cerca del 19 % del Macizo de Santander.

Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs): Mesozoico. Estas rocas conforman el Batolito de Santa Bárbara y afloran al oriente del departamento. La cuarzomonzonita es de color rosado, rosado naranja a gris violáceo, equigranular, compuesta por feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita. La totalidad de este cuerpo en superficie ocupa cerca del 12 % del Macizo de Santander. 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 y a partir de ellos se genera la aparición de arcillas.

Formación Girón (Jg): Mesozoico. En la zona de estudio se pueden distinguir dos sectores en los cuales aflora esta unidad. El primer sector se ubica hacia la zona del

Alto (Divisoria cuenca Río Tona-Altiplano de Berlín), donde se diferencia de la suprayacente Formación Los Santos por ser un paquete de areniscas conglomeráticas violáceas de grano medio a fino, con una matriz arenosa, granos subredondeados moderadamente calibrada, mal cementada, que reposa discordantemente sobre el Ortoneis de Berlín. El segundo sector donde se encuentra la Formación Girón, se localiza hacia la parte alta de la cuenca del Río de Oro, específicamente en El Picacho, sobre la vía que conduce hacia Bucaramanga.

Formación los Santos (Kils): Mesozoico. En el Macizo de Santander, esta formación se encuentra formando pendientes estructurales en el sector del Alisal, con una extensión de alrededor de 3 Km² al NE, hasta el sector del Alto, en contacto fallado con el Ortoneis de Berlín en el área de Río Sucio. La formación Los Santos comprende una extensión de aproximadamente el 8 % del Macizo de Santander, distribuida en la microcuenca de Río Sucio y el Alto el Picacho, se encuentra compuesta principalmente por cuarzoareniscas blancas, ligeramente gravosa y conglomerática de grano muy grueso a fino, muy compactas con superficies de oxidación en la zona intermedia.

Formación Rosablanca (Kir): Mesozoico. El rasgo geomorfológico más representativo de la Formación Rosablanca son los escarpes ubicados en la zona oriental del área de estudio, que muestran grandes paquetes de calizas micríticas de color gris. Esta formación ocupa aproximadamente un 3.2 % del Macizo de Santander. Las calizas de la formación Rosablanca presentan niveles fosilíferos, con conchas fragmentadas distribuidas aleatoriamente, estratificación plano paralela y venas de calcita, intercalados con shales negros carbonosos hacia el tope. Debido a la composición química de la roca y del agua, se observan zonas de alta disolución en las pendientes.

Formación Paja (Kip): Mesozoico. Se trata de una sucesión de shales negros, fosilíferos, ligeramente calcáreos y micáceos, el segmento inferior de esta formación contiene concreciones calcáreas, septarias y venas de calcita. En la zona del Macizo de Santander se caracteriza por definir unas pendientes suaves, ocupa un 0.16 % del Macizo de Santander y se encuentra constituida por niveles delgados de limolitas,

lodolitas y arcillolitas negras, con presencia de impresiones de fósiles, restos de pequeñas conchas, concreciones y nódulos calcáreos; presentan como mineral accesorio la moscovita y pirita. Los shales negros se hacen ligeramente carbonáceos y se encuentran intercalados con areniscas de grano muy fino, silíceas.

Formación Tablazo (Kit): Mesozoico. En el área del Macizo de Santander la Formación Tablazo se encuentra distribuida en la parte alta de la cuenca del río Tona, constituyendo escarpes y plegamientos amplios, ocupa aproximadamente un 0.8 % del Macizo de Santander. Composicionalmente se caracteriza por la presencia de niveles de cuarzoarenitas, limolitas fósiles, silíceas y calizas. Los niveles arenosos están constituidos por areniscas de grano fino a medio, con oxidación en la superficie, se presentan compactas con grado bajo a moderado y se disgregan fácilmente. Estos niveles arenosos de la formación Tablazo presentan un porcentaje considerable de porosidad.

Depósitos Coluviales o de Ladera (Ql): Cuaternario. Son depósitos acumulados, por lo general en la base de escarpes, provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes debido a la acción de la fuerza de la gravedad. Estos depósitos se encuentran dispersos por toda el área de estudio y se relacionan con rocas muy fracturadas del Neis de Bucaramanga en los municipios de Floridablanca y Piedecuesta. Por otro lado, hacia la parte alta de la cuenca del río Tona, los depósitos coluviales se encuentran constituidos por bloques rocosos de gran tamaño, provenientes del Ortoneis de Berlín, la formación Los Santos y la formación Rosablanca.

Depósitos aluviales (Qal): Cuaternario. Torrenciales: Estos depósitos corresponden a acumulaciones de carácter heterométrico, transportados por escorrentías superficiales y ocasionadas por eventos mayores de lluvias, se pueden observar en la cabecera de la quebrada Río Sucio.

- *Terrazas:* Acumulaciones de antiguos eventos de inundación. Estos bloques provienen de las diferentes unidades de roca, ubicadas hacia la parte alta de la

cuenca del río Tona, de calizas, areniscas y neis, en una matriz arenosa con una seudoestratificación.

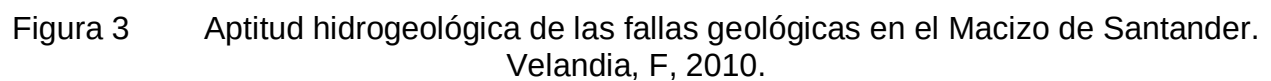
Depósitos Fluvioglaciares (Qd): Cuaternario. Se encuentran localizados en la parte alta de la cuenca hacia el páramo de Berlín, se diferencian los depósitos morrénicos, constituido por material heterométrico de formas angulares a subredondeadas.

Depósitos de Flujo de Escombros (Qfe): Cuaternario. Son depósitos de piedemonte, 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 través de las corrientes de agua que nacen en él.

En cuanto a los rasgos estructurales el Macizo de Santander, el Macizo rocoso presenta un fuerte fracturamiento y sistemas de fallas que se jerarquizan como de orientación NS y EW. En el Macizo de Santander son evidentes los lineamientos de dirección NS, que se caracterizan por ser de tipo sinextral e inverso (Velandia, F, 2010). A partir de la actividad de estas fallas se generan bloques estructurales que presentan fallas de rumbo con una orientación NE-SW y EW. La falla más importante de este sistema y de la zona de estudio es la falla de Bucaramanga que enfrenta dos litologías diferentes, al este se encuentra el Macizo de Santander y hacia el oeste se encuentran los abanicos aluviales en donde está ubicada la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana. Otras fallas en este sistema son: falla Río Frío, Morrorico, Río de Oro y Sevilla. 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, entre las que se encuentran: falla Zapamanga, Cocalina, Casiano y Mensulí.

Sistema de fallas y pliegues de la cobertura sedimentaria: La zona constituida por la cobertura sedimentaria, se caracteriza por presentarse complejamente fracturada y plegada. Las estructuras clasificadas acá son: falla la Cristalina, falla Río Sucio, falla

En la figura 3 se muestran las estructuras geológicas del macizo de Santander, resultado de un análisis de distribución de esfuerzos que arrojó una caracterización de su aptitud hidrogeológica.



La zona del macizo de Santander se encuentra en la parte superior de la figura. Las zonas más oscuras poseen mejores características hidrogeológicas. En el trabajo de Velandia se confirma que la falla de Bucaramanga en la zona de estudio tiene una aptitud hidrogeológica importante, que permite el almacenamiento y el transporte de agua subterránea. También se identifica una zona en sentido E-W que tiene una buena capacidad hidrogeológica y que conecta el Macizo de Santander con la falla de Bucaramanga.

1.3.3. Zona aluvial de Bucaramanga

La geología de la zona aluvial de Bucaramanga es sedimentaria producto de la acción denudatoria sobre las rocas del Macizo de Santander, a continuación se presentan las litologías de la zona (INGEOMINAS, 2001, y Vásquez, L y Bermoudes, O, 2004):

Formación Jordán (Jj): Esta formación consta de limolita y arenisca de grano fino, color marrón rojizo, bien estratificada, en contactos discordantes con la Formación Bocas y la Formación Girón, alcanzando un espesor de aproximadamente 300 m. La Formación Jordán aflora sobre el sector de piedemonte del Macizo de Santander al Oeste de la falla de Bucaramanga, en las microcuencas Río Frío y Oro Alto, constituyendo adicionalmente en un alto porcentaje, el sustrato de los depósitos cuaternarios de este sector.

Formación Girón (Jg): Esta formación de origen continental consta de una secuencia espesa de arenisca conglomerática y conglomerado de color gris amarillento a pardo rojizo, masivo y lenticular, intercalados con capas de limolita pardo rojiza. En las microcuencas Oro Medio y Oro Bajo, constituye la unidad más importante por su extensión y por las propiedades mineralógicas que como material parental le hereda a los suelos derivados de ella. Esta unidad reposa discordantemente sobre la Formación Jordán y es cubierta por la Formación Tambor. Además esta formación constituye la parte basal de la meseta de Bucaramanga.

Formación Tambor (Kita): La formación Tambor constituye la base de la sedimentación cretácica en el área de Santander. Está constituida en su parte superior por arenisca cuarzosa clara, con capas conglomeráticas y en la parte inferior limolita y arenisca pardo rojiza. Suprayace discordantemente a la Formación Girón e infrayace concordantemente a la Formación Rosa Blanca. Esta unidad se presenta en la microcuenca Oro Medio constituye superficies planas denudadas de las Mesas de los Santos, Ruitoque y Lebrija.

Formación Bucaramanga (Qb): Consta de 4 niveles. Uno inferior de mayor potencia con niveles conglomeráticos e intercalados de niveles arenosos (Qbo), después uno intermedio de materiales finos (Qbf), seguido por uno formado por materiales de mayor espesor (Qbg) y en la parte superior una capa con limos de color rojo (Qblr).

- *Miembro Órganos (Qbo):* La litología de este miembro está representada por una serie monótona de niveles conglomerático polimícticos en alternancia con niveles y lentes limoarenosos, con variaciones laterales y verticales tanto en composición como en textura.
- *Miembro Finos (Qbf):* La secuencia estratigráfica de este miembro se caracteriza por presentar dos conjuntos, el primero arcilloso masivo de colores grises a verdes, y el segundo, identificado por la alternancia de niveles areno limosos con niveles limoarenosos.
- *Miembro Gravoso (Qbg):* Se trata de un nivel grueso sin estructuras internas, con contacto inferior neto, suavemente ondulado. Se caracteriza por presentar arenoconglomeráticos y conglomeráticos en matriz areno arcillosa, como su característica textural más típica.
- *Miembro Limos Rojos (Qblr):* Constituido por arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos amarillento y naranja. Se presenta en bloques angulares grandes de areniscas intercalados, ocasionalmente embebidos dentro de limos rojos, caracterizados por su meteorización. Suprayace el segmento gravoso y no tiene contacto litológico superior.

Depósitos aluviales de planicie (Qal): Los principales depósitos de este tipo se encuentran sobre las llanuras de inundación de los ríos Oro y Frío en el área de estudio, así como en las principales quebradas como son La Iglesia, Aranzoque y Suratoque.

Terrazas Bajas (Qt1): Estas representan los máximos niveles de inundación alcanzados por las actuales corrientes, que en promedio superan los seis metros.

Terrazas Medias (Qt2): Comprenden parte del abanico terraza Bucaramanga y se encuentran sobre la margen izquierda del río de Oro.

Depósitos Coluviales (Ql): Los depósitos de este tipo de encuentran al pie de la ladera de zonas escarpadas como las laderas de la mesa de Lebrija y Los Santos.

En la figura 4 se presenta la geología de la zona de estudio.

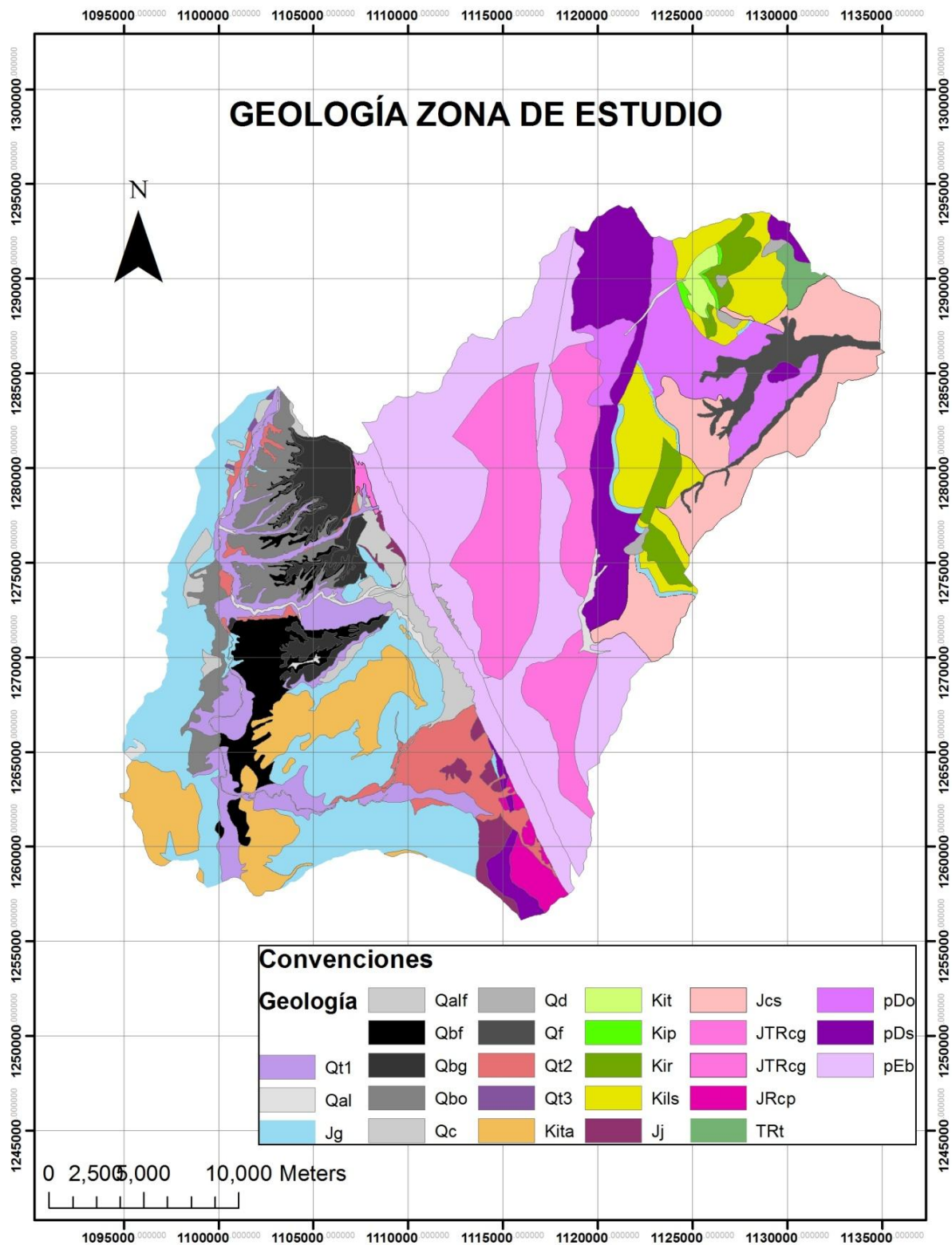


Figura 4 Geología de la zona de estudio. INGEOMINAS – UIS, 2007.

1.4. Fenómeno de meteorización en el Macizo de Santander

El fenómeno de la meteorización en el Macizo de Santander, como se dijo antes, genera condiciones que hacen posible el flujo de agua subterránea, por lo tanto se presenta su caracterización con el fin de aportar en la creación del modelo hidrogeológico conceptual de flujo en la zona de estudio.

La meteorización de las rocas cristalinas ha sido estudiada en la cuenca del río Lato por Lozano, J (2012) y Barajas, A y Gómez, A (2010) encontrando perfiles de meteorización en el neis de Bucaramanga y la cuarzomonzonita de la Corcova, producidos por las condiciones físicas de la roca, por presencia de fallas geológicas y por las condiciones climáticas en esta región.

En la cuarzomonzonita de la Corcova se encontró un grado de meteorización avanzado donde varían de tamaño las partículas y la mineralogía, y se presenta meteorización esferoidal. Las características de fracturas y discontinuidades como el espaciamiento y abertura, condicionan el proceso de meteorización, haciendo posible que sean atacados niveles más profundos. Se estudiaron perfiles de meteorización de cerca de 10 m que están compuestos por capas que van desde, completamente meteorizadas hasta roca fresca, siendo posible identificarla; a su vez las propiedades hidráulicas secundarias también varían en profundidad y dependen del grado de meteorización.

En el neis de Bucaramanga se tiene un tipo de meteorización similar al de la cuarzomonzonita de la Corcova, debido a que están en ambientes similares. En estas rocas se estudió un perfil de meteorización de cerca de 12 m compuesto por capas que van desde una meteorización completa hasta un grado donde se puede observar roca fresca fracturada en donde se encuentran minerales de arcilla en las discontinuidades.

Aunque los espesores de meteorización estudiados son de 10 m y 12 m, estos pueden llegar a ser más profundos, esto se sabe porque los perfiles fueron identificados de manera visual en taludes que no sobrepasaban dichas alturas., aunque en otros

informes estudios se han podido identificar espesores más potentes con la ayuda de tomografías.

Se encontró que sobre las partes más altas de la cuenca se presentan geoformas suaves y redondeadas cóncavo-convexas sobre las cuales se presentan los mayores espesores, evidenciando las altas actividades de meteorización, el espesor disminuye en los flancos a medida que se desciende hasta el fondo de los drenajes, donde algunas veces se puede hallar roca sana. Los materiales así desarrollados en general son muy permeables y facilitan la infiltración rápida del agua de lluvia; sus sistemas de diaclasas y otras discontinuidades permiten el desarrollo de meteorización profunda que es facilitada e incrementada por la presencia de vegetación de raíces profundas y qué, además, actúan como estabilizadores de las laderas al sostener el suelo a la ladera (Barajas, A y Gómez, A, 2010)

Tomografías realizadas en tres sectores del Macizo de Santander, han permitido encontrar espesores de meteorización de por lo menos 40 m, evidenciándose sectores con un alto grado de saturación (Sierra, L, 2011), los cuales se hacen más profundos en las zonas de fallas geológicas.

1.5. Hidrología

La hidrología de la zona de estudio ha sido caracterizada por varios estudios que se han llevado a cabo en los últimos años. Se ha estudiado la precipitación, el clima, la evapotranspiración, la oferta hídrica y la recarga a los sistemas acuíferos.

1.5.1. Precipitación y clima

La red pluviométrica de la CSRL está compuesta por estaciones de las entidades IDEAM, Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDBM) y acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb). En Arenas, J y Ruiz, J (2005) se tiene una revisión exhaustiva del régimen de precipitaciones, así como de las

tendencias, valores representativos y fenómenos que afectan el comportamiento de la variable precipitación.

En el análisis del comportamiento anual de la precipitación se encontraron comportamientos diferenciales en la zona aluvial y en el Macizo de Santander. En la zona aluvial o metropolitana se encontró un ciclo bimodal de precipitaciones, poco marcado y con un pequeño pico en las lluvias a mitad de año (ver figura 5). En la parte alta de la cuenca se puede observar claramente un ciclo bimodal y valores mayores de precipitación en el Macizo de Santander (ver figura 6).

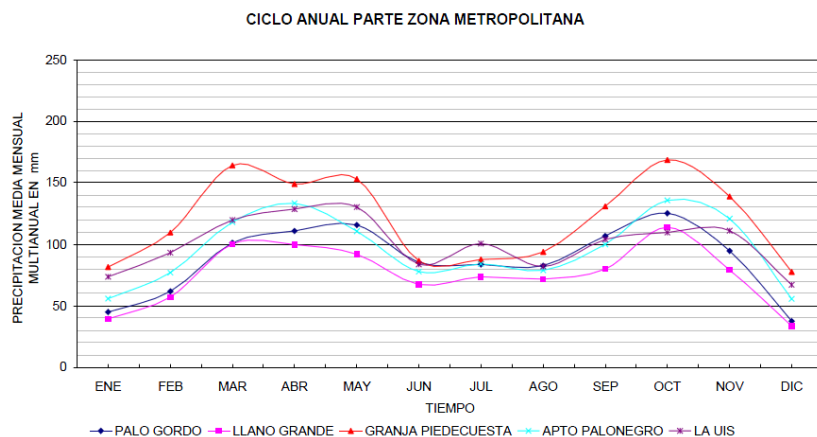


Figura 5 Ciclo de precipitación media mensual multianual zona metropolitana. Arenas, J y Ruiz, J, 2005.

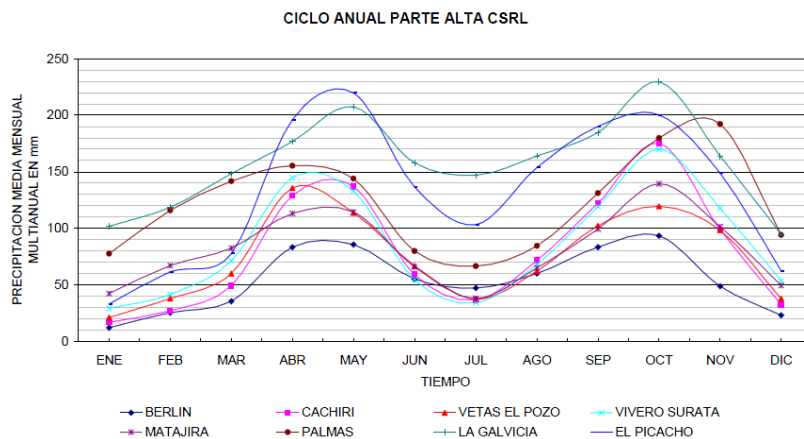


Figura 6 Ciclo de precipitación media mensual multianual zona Macizo de Santander. Arenas, J y Ruiz, J, 2005.

La bimodalidad en la zona de estudio está relacionada con el fenómeno de circulación global de la zona de convergencia intertropical (ZCIT). La ZCIT es una zona alrededor del ecuador en donde convergen flujos de humedad de latitudes por encima y por debajo del ecuador. El flujo de humedad en la escala global es explicado por el modelo de la celda de Hadley. Cada paso de la ZCIT por la zona de estudio deja un aumento en las precipitaciones, el primer paso se da entre los meses de marzo a mayo hacia latitudes altas y de septiembre a noviembre hacia latitudes bajas.

El valor de precipitación media multianual representativo para la cuenca es de 1 206 mm/año (Arenas, J y Ruiz, J, 2005). La variación espacial de la precipitación se muestra en la figura 7.

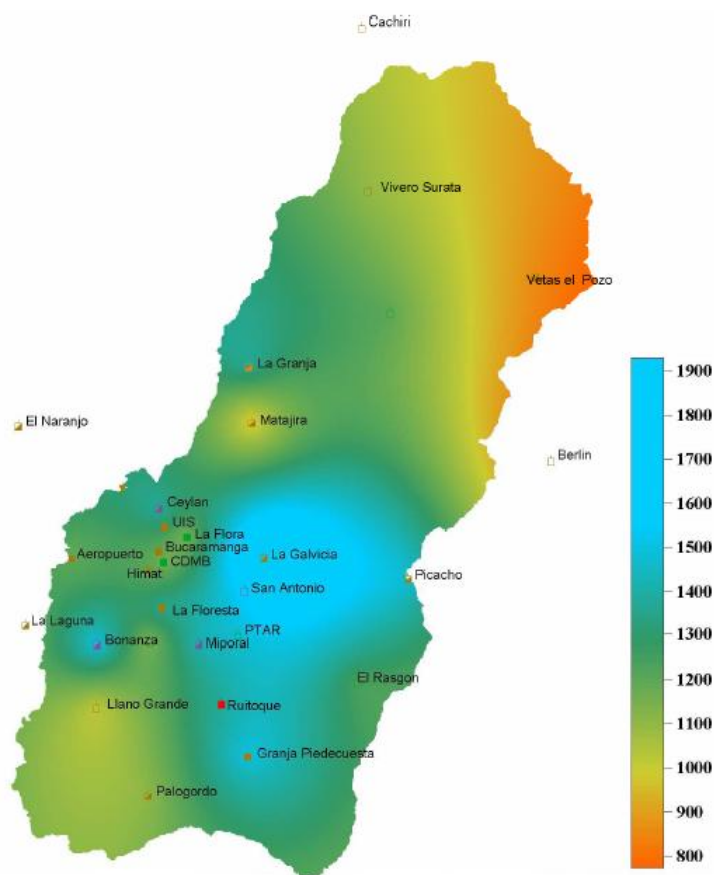


Figura 7 Variación espacial de la precipitación media multianual en la CSRL.
INGEOMINAS – UIS, 2007.

La cantidad de precipitación en la cuenca se ve afectada por el fenómeno de ENSO, que en su fase Niño disminuye la lámina total de precipitación y en la fase Niña aumenta la lámina total de precipitación.

La temperatura media en la CSRL tiene un rango entre 8 y 24 °C con las temperaturas más bajas en los meses de octubre y noviembre y las temperaturas más altas en los meses de mayo y junio. La tasa de lapso local es de 6.5 ° C (INGEOMINAS-UIS, 2007).

En el clima de la CSRL, se tiene según la clasificación de Holdridge (1967) llevada a cabo en el proyecto de investigación de INGEOMINAS-UIS (2007), que existen provincias climáticas que van desde el bosque húmedo montano con temperaturas entre 6 y 12°C, lluvias entre 500 y 1 000 mm, elevaciones entre 2 720 y 3 650 m s. n. m. y evapotranspiración real entre 820 y 990 mm/año; hasta bosque seco tropical con temperaturas superiores a 24°C, precipitaciones entre 1000 y 2000 mm/año, evapotranspiración mayor a 1 430 mm/año y elevaciones menores a 880 m s. n. m.

1.5.2. Evapotranspiración (EVT)

La evapotranspiración es una variable hidrológica de gran importancia para la comprensión del ciclo hidrológico en una cuenca de estudio. La EVT representa el retorno del agua en forma gaseoso desde la superficie hacia la atmósfera, sumada a la cantidad de agua que es transpirada por las plantas presentes en una zona. Esta variable no es medida de manera directa y su estimación requiere del uso de gran cantidad de variables climáticas, por lo que sus valores siempre están acompañados de incertidumbre. Las variables comúnmente utilizadas son: precipitación, temperatura, brillo solar, humedad relativa, velocidad del viento y vegetación.

En la conceptualización de EVT se distinguen dos tipos: potencial y real. En la EVT potencial se estima que las condiciones climáticas, de vegetación y demás, son óptimas para que se lleve a cabo el proceso de evaporación y transpiración; en la EVT real se toman las condiciones reales de la zona de estudio, por lo que este es un valor más ajustado y en la mayoría de los casos menor que EVT potencial.

En el informe de investigación de INGEOMINAS-UIS (2007) se presentan valores de EVT potencial que van desde 860 mm/año hasta 1 120 mm/año; los valores de EVT real está entre 472 mm/año y 832 mm/año. La variación espacial de la evapotranspiración se muestra en la figura 8.

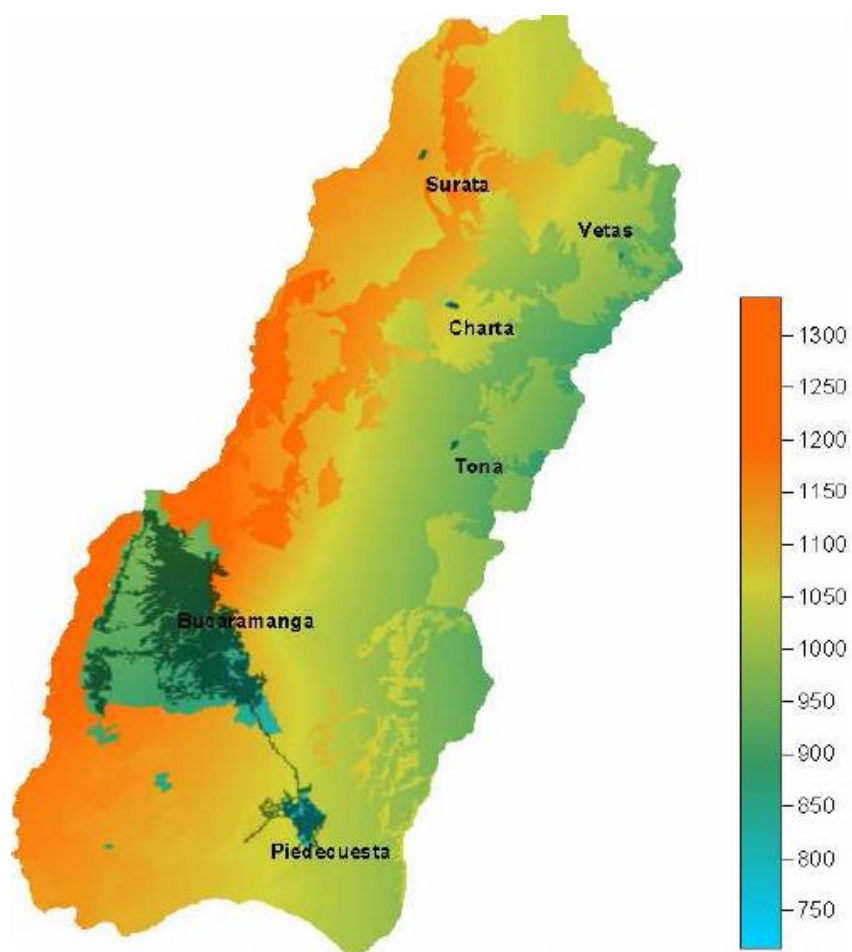


Figura 8 Variación espacial de la evapotranspiración en la CSRL.
INGEOMINAS – UIS, 2007.

En la cuenca la EVT real oscila entre el 40 % y el 69 % de la precipitación total promedio multianual, siendo la salida del sistema más importante, por encima de la escorrentía directa y la infiltración.

1.5.3. Oferta hídrica (OH)

La oferta hídrica representa la oferta total de agua en un balance hídrico, que está disponible para ser escurrida ó infiltrada. El valor de OH se estima como la sustracción de la lámina de EVT a la lámina de agua precipitada.

Para la CSRL la oferta hídrica anual promedio oscila entre los 374 mm/ año y 734 mm/año. En estos resultados se puede ver que hay gran cantidad de agua que está disponible para escurrir e infiltrarse, en el capítulo 4 del presente informe se muestra la estimación de todas las componentes del ciclo hidrológico en escala temporal diaria para el año 2000.

1.6. Agua subterránea y formaciones acuíferas

Puntos importantes en la caracterización hidrogeológica de una zona son el conocimiento de la ocurrencia de agua y las propiedades hidráulicas del medio; esta brinda información que se puede utilizar para entender la dinámica del movimiento del agua a través del subsuelo. Sumado a lo anterior, también se presenta una breve referencia del uso del agua subterránea.

El agua subterránea en la zona aluvial de Bucaramanga está asociada a formaciones acuíferas que han sido identificadas en miembros de la formación Bucaramanga y que han sido estudiadas a partir de puntos de control y aprovechamiento de agua en la zona.

El agua subterránea en el Macizo de Santander ha sido estudiada a partir de puntos de nacimientos de agua que han sido inventariados en varias jornadas de campo, a partir de esta información se han hecho observaciones que dan un buen indicio acerca de los flujos subterráneo en esta zona.

A continuación se presenta una caracterización de los resultados encontrados en los puntos de agua subterránea en la zona aluvial de Bucaramanga y en el Macizo de Santander.

1.6.1. Zona aluvial de Bucaramanga

En la meseta de Bucaramanga se identifican dos niveles de interés hidrogeológico de la formación Bucaramanga (miembro gravoso y órganos) que representan las dos formaciones acuíferas más importantes en la zona aluvial. El acuífero superficial en el miembro gravoso que se extiende en toda la amplitud de la terraza de Bucaramanga, supra yaciendo el miembro finos. En el miembro órganos se identifica el acuífero profundo, presentando mejores condiciones hidráulicas que el acuífero superficial (Gómez, et al, previsto 2013).

La zona aluvial posee un inventario de puntos de agua subterránea (Rodríguez, J y Torres, D, 2011) conformado por 126 puntos clasificados como cisternas, piezómetros, manantiales y pozos profundos. A partir de este inventario se realizaron las Isopiezas del acuífero superficial y profundo de la formación Bucaramanga, en donde se encontró que el flujo de agua subterránea en ambos tiene dirección E-W, es decir, desde la falla de Bucaramanga hacia el río de Oro.

El uso del agua subterránea en la zona aluvial de Bucaramanga es aún incipiente, una muestra de esto es la poca cantidad de puntos de aprovechamiento de agua que se conocen, siendo la mayor explotación por parte de lavaderos de carros y estaciones de servicio que pueden generar contaminación de las aguas subterráneas.

1.6.2. Macizo de Santander

En esta zona se cuenta con puntos de agua subterránea de diferentes procedencias que conforman el inventario actual de nacimientos de agua. El grupo GPH realizó tres campañas de campo en épocas secas del año 2010 (2 salidas) y del 2011 (1 salida) obteniendo en total 51 puntos. En el marco del proyecto de investigación de INGEOMINAS (2009) fueron tomados 126 puntos en las épocas secas de los años

2002, 2006 y 2007. En total se tienen 177 puntos de agua subterránea en el Macizo de Santander.

El inventario se levantó con información de la ubicación planimétrica y altimétrica; parámetros físico-químicos: temperatura, conductividad eléctrica, pH; geología; calidad organoléptica del agua; y comentarios.

En su totalidad, los puntos del inventario son nacimientos de agua, que en su mayoría permanecen a lo largo del año, exceptuando algunos en la vía Bucaramanga – Cúcuta, que se encontraban secos en época de no lluvia.

En la figura 9 se nota que casi la totalidad de los puntos de agua están asociados a fallas geológicas o zonas de parteaguas. A partir de esto se puede llegar a una primera idea de las clases de flujo que se dan en el Macizo de Santander.

Los puntos de agua a lo largo de parteaguas pueden estar asociados a flujos que se dan a lo largo de espesores meteorizados y que dependen de la geomorfología. Por otra parte, los puntos de agua asociados a fallas geológicas pueden pertenecer a flujos que se den en esta zona por causa de la intensa trituración que sufren los bloques de roca en las fallas geológicas, que generan un aumento de porosidad y conductividad hidráulica.

Estas observaciones preliminares deben ser correlacionadas con otras variables para la identificación de tipos de flujo en el Macizo de Santander y así construir un modelo conceptual de flujo del agua subterránea.

En el Macizo de Santander existen gran cantidad de acueductos veredales que se abastecen de agua proveniente de nacimientos, que en algunos casos pudieron ser inventariados.

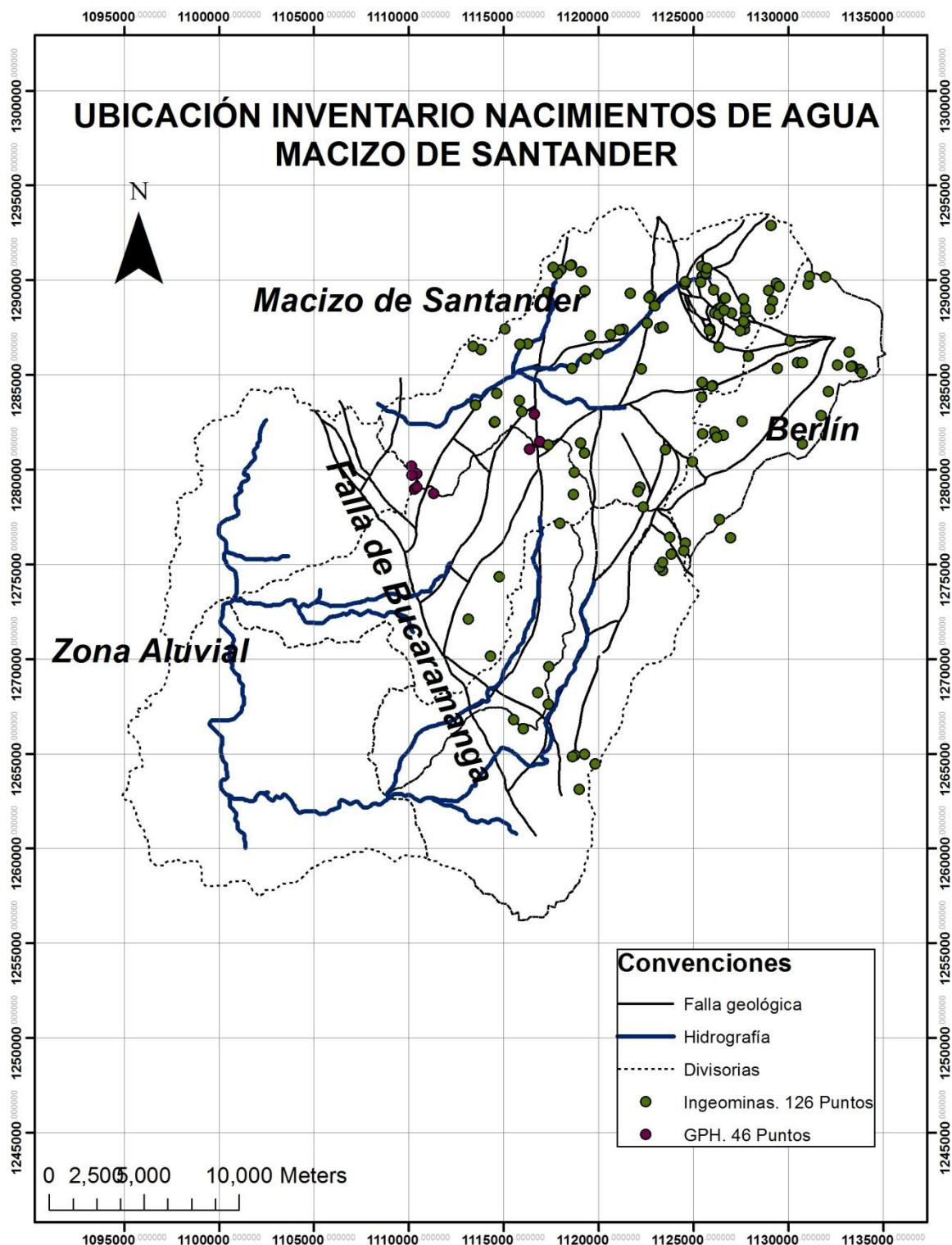


Figura 9 Inventario de nacimientos de agua en el Macizo de Santander. Autor

2. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Agua fluyendo por un río en una época del año sin lluvias, laderas de montañas donde nacen corrientes, meses de precipitaciones extremas que se repiten año a año, un pozo de agua que salta, el humedecimiento del suelo luego de iniciar una lluvia, seguido por escurrimiento de agua, entre otras muchas observaciones que se han hecho y se seguirán haciendo, hacen parte del deseo de conocimiento y de curiosidad que ha llevado al hombre, desde hace ya miles de años, de ser un espectador a ser un actor en la puesta en escena en el mundo actual.

A continuación se presenta un modelo hidrogeológico conceptual del flujo de agua subterránea, se brindan bases conceptuales de lo que es un modelo conceptual y qué lo compone, y finalmente la formulación del modelo conceptual resultado de la investigación realizada. El modelo que se presenta está conformado por la caracterización de los tipos de flujo de agua subterránea en el Macizo de Santander y el esquema de interacción entre estos flujos, que representan la dinámica del movimiento del agua subterránea. Los resultados obtenidos en el presente capítulo serán validados utilizando la técnica hidrogeoquímica e isotópica, este proceso será el tema del capítulo tres del informe de investigación.

Todo inicia con una pregunta y puede ser seguido por algunas respuestas, pero el mejor de los casos siempre termina con muchas más preguntas que respuestas.

2.1. Conceptualización

Los modelos conceptuales en la hidrogeología son una herramienta necesaria para el análisis de un sistema acuífero, teniendo en cuenta que según Bredehoeft (2005) "El modelo conceptual es la idea básica o construida de cómo opera un sistema" y es allí en dónde radica su importancia, porque más que sólo una base de datos de variables hidrológicas, niveles de agua, tipos de geología, mapas entre otras cosas, es un esquema mental de funcionamiento. Los modelos conceptuales se suelen representar

en bloque-diagramas y cortes transversales, en donde, de manera sencilla de representa la interacción del sistema con el entorno, la dinámica interna del movimiento del agua y los almacenamientos.

La creación del modelo se lleva a cabo por expertos que hacen apreciaciones subjetivas de la información disponible, cuestión que en ocasiones no se tiene en cuenta, olvidando las limitaciones del modelo. En un modelo conceptual de flujo se debe integrar toda la información existente hasta el momento, para llegar a tener una buena aproximación de la realidad, que está sujeta a cambios y a la constante alimentación con nueva información tomada con técnicas no disponibles en el pasado. Por otra parte, para poder evaluar la pertinencia de un modelo conceptual se debe crear un modelo numérico, en el que se comparen datos predichos contra observados (Zheng y Bennet, 1995). La creación de un modelo numérico no está dentro del alcance de la investigación.

En el proceso de creación del modelo conceptual se debe tener siempre en cuenta que es un conocimiento que está en un continuo cambio, dependiendo de la información que se tenga y se vaya recolectando, es más, puede darse el caso en el que un modelo conceptual quede completamente obsoleto porque no es congruente o no explica algún fenómeno, que fue posible muestrear con nuevas metodologías, en estos caso se habla de un cambio de paradigma.

Hay dos tipologías de información requeridas en la formulación de un modelo hidrogeológico conceptual: información del medio físico e información de la ocurrencia de agua. La primera agrupa geología (litología y estructural), geomorfología, suelos (texturas y espesores), uso del suelo y vegetación. La segunda comprende red hidrográfica, inventario de nacimientos de agua, régimen de precipitaciones y variables climáticas que afectan la disponibilidad del agua.

Hasta ahora se ha cumplido con la fase inicial en la que se agrupa y codifica la información, en adelante la formulación del modelo es un proceso único para cada

zona, que dependerá del volumen de la cantidad y calidad de información, así como la distribución espacial y sin dejar de lado la experticia de los encargados de la labor, ya que al ser una idea mental, el modelo conceptual siempre tendrá impreso un toque de subjetividad.

2.2. Ideas precedentes del funcionamiento del agua subterránea

Del análisis y recopilación de información existente se encontraron las siguientes ideas fundamentales del conocimiento actual de la dinámica del recurso hídrico.

En la zona de estudio pasa la falla de Bucaramanga, en dirección N-S, dividiendo la zona en dos: Macizo de Santander al oriente y zona aluvial al occidente (Beltrán, R y Rey, A, 2002). Esta falla tiene asociadas fallas paralelas y perpendiculares y presenta una franja de hasta tres kilómetros a lado y lado (Vargas, J, 2009). En la zona de la falla de Bucaramanga se han llevado a cabo perforaciones (La Flora, Albania y Pan de Azúcar) que evidencian espesores de roca fracturada y meteorizada de hasta 100 m y depósitos de agua subterránea que conforman acuíferos (Vergara, O, 2002).

La zona aluvial presenta rocas sedimentarias en su totalidad, en donde se han identificado acuíferos, los más estudiados son los de la formación Bucaramanga: uno superficial libre en el miembro gravoso y otro profundo confinado, al parecer más potente que el anterior en el miembro órganos (Vásquez, L y Bermoude, O, 2004). En el Macizo de Santander se identifican rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias. La alta densidad de fallas en este Macizo rocoso y los procesos de ataque físicos y químicos a las rocas, hacen posible el flujo de agua a través de espesores fracturados, meteorizados y por las mismas fallas. A partir de análisis de isótopos estables del agua, se encontró que las zonas de recarga, a los sistemas acuíferos de la zona aluvial, están ubicadas en alturas encontradas en el Macizo de Santander entre los 1 500 m s. n. m. y 2 500 m s. n. m. (Gómez, S y Anaya, A, 2004). Las líneas de flujo de agua subterránea se dan, hipotéticamente, a través de zonas de falla conectando el Macizo

de Santander con la falla de Bucaramanga, que a su vez está conectada con los acuíferos presentes en la zona aluvial (Gómez, et al, 2007).

Por otra parte, en la hidrología se sabe que el régimen de lluvias en la cuenca es bimodal, producto del paso de la ZCIT en su ciclo anual de ascenso y descenso (Arenas, J y Ruiz, J, 2005), dando lugar a dos épocas de lluvias entre marzo y mayo, y entre septiembre y noviembre. También dos épocas de menor cantidad de lluvia en los meses de junio a agosto, y de diciembre a febrero. La mayor cantidad de lluvia se localiza en el llamado “óptimo pluviométrico” localizado en alturas entre 1 800 y 2 000 m s. n. m.

2.3. Formulación de un modelo hidrogeológico conceptual

Un modelo conceptual es una idea básica del funcionamiento de un sistema, pretendiendo llegar a la sencillez de los fenómenos utilizando rigor en la obtención y análisis de información. El eje fundamental del modelo es la identificación y caracterización de los flujos subterráneos que se dan en el Macizo de Santander y que transportan el agua desde las zonas de recarga hasta los acuíferos identificados en la zona aluvial de Bucaramanga. Fue fundamental la interrelación de variables geológicas, geomorfológicas, características estructurales, caracterización hidrológica y el inventario de nacimientos de agua. Se presenta la identificación del flujo de corta distancia, seguido de una caracterización del origen del agua y para finalizar se propone un esquema de flujo en el Macizo de Santander.

2.3.1. Flujo de corta distancia a través de espesores meteorizados

En las salidas de campo realizadas en el Macizo de Santander se observó la ocurrencia de agua a lo largo de zonas de parteaguas a lado y lado de la cuchilla que separa las cuencas del río Tona y río Frío (ver figura 9). Por esta razón se propuso dar una conceptualización y una posible explicación al fenómeno, teniendo en cuenta aspectos como la meteorización, geomorfología y la ubicación de los puntos de nacimientos de agua en los parteaguas.

Como resultado de esta conceptualización, en la figura 10 se presenta un esquema de una zona de parteaguas en donde hay un espesor meteorizado, con nacimientos de agua a lo largo del lineamiento de la divisoria de aguas.

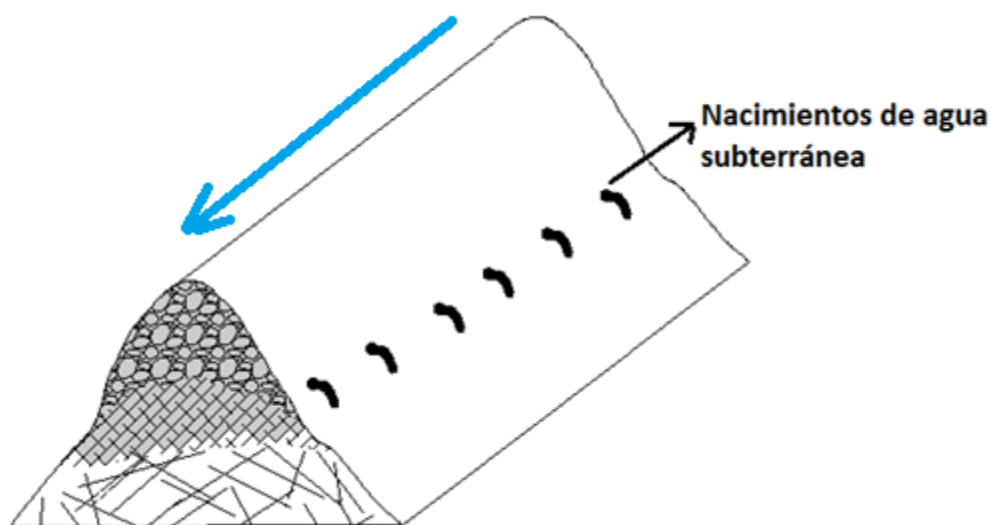


Figura 10 Esquema conceptual de nacimientos a lo largo de un parteaguas. Autor

El esquema anterior representa una zona de “cuchilla”, en donde existen nacimientos de agua. El perfil de meteorización muestra varios niveles, donde la meteorización disminuye en profundidad, de acuerdo al perfil de meteorización identificado en el Macizo de Santander (Lozano, J, 2012, Barajas, A y Gómez, A, 2012). Los nacimientos están asociados al espesor meteorizado y están caracterizados con propiedades físico-químicas.

Ahora, el flujo de agua subterránea en el esquema puede ser de la siguiente manera: flujo vertical; flujo longitudinal a lo largo de la cuchilla; ó un flujo con componentes longitudinal y vertical. La recarga puede darse en una zona más alta que donde se presentan los nacimientos, a lo largo de la zona de parteaguas y una situación que mezcle los dos tipos de recarga mencionados.

Se plantea la conductividad eléctrica como un indicador que puede aportar en el entendimiento del flujo, siendo definida como una medida de la capacidad que tiene una mezcla de agua de conducir electricidad, que depende de la cantidad de sustancias presentes en el agua que han sido aportadas por el medio que ha transitado. Por lo anterior, asumiendo que el agua se mueve en un medio homogéneo, entre más distancia haya recorrido desde la zona de recarga y más interacción haya tenido con el material subterráneo, la conductividad eléctrica será mayor (Appelo, C y Postma, D, 1999).

De acuerdo al criterio antes expuesto, los flujos que se dan a lo largo de las zonas de parteaguas presentarán una tendencia de aumento de la conductividad eléctrica en dirección del flujo, conforme disminuye la elevación.

En las jornadas de campo se identificaron dos zonas donde existe flujo a lo largo de parteaguas, una entre las cuencas del río Frío y Tona, y otra entre las cuencas del río Oro y Lato. Se proponen estas dos líneas como casos del flujo a través de espesores meteorizados en zonas de parteaguas y a continuación se presenta la caracterización de ambos revisando la validez del criterio anterior.

Línea 1 – Tona-Frío: Se formula una hipótesis de flujo de agua subterránea que viaja siguiendo el lineamiento del parteaguas de las cuencas de Río Tona y del Río Frío. En la figura 11 se muestra el sector del parteaguas del río Tona-Frío, donde se ubicaron los puntos muestreados sobre el MDE y se representan con flechas azules la hipótesis de flujo y con una línea negra la falla de Bucaramanga.

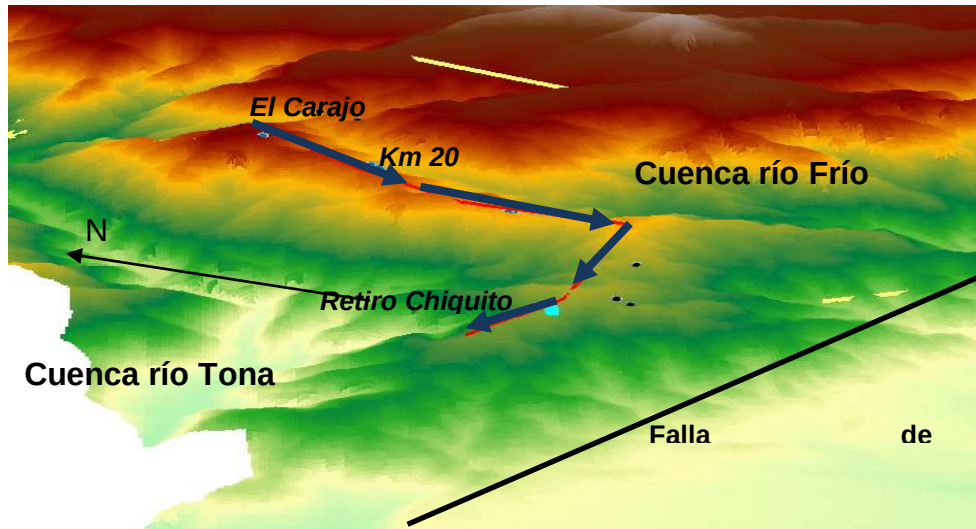


Figura 11 Ubicación Línea de Flujo 1, parteaguas Tona – Frío. Autor

Se observó en campo la ocurrencia de puntos de agua de nacimientos, 21 en total, a lo largo de esta línea, que afloran en las laderas y que son permanentes a lo largo del año, por lo que se aplicó el criterio de aumento de conductividad eléctrica en dirección del parteaguas.

Se propuso encontrar una relación entre CE y la altura en la que se tomó la muestra, ya que al seguir el lineamiento de la divisoria disminuye la altura y esta va a ser la variable representativa de la dirección de flujo. Se encontró una tendencia de carácter creciente de la conductividad eléctrica al disminuir la altura (ver figura 12)

Las litologías presentes en el parteaguas mostrado son cuarzomonzonita de la Corcova y neis de Bucaramanga.

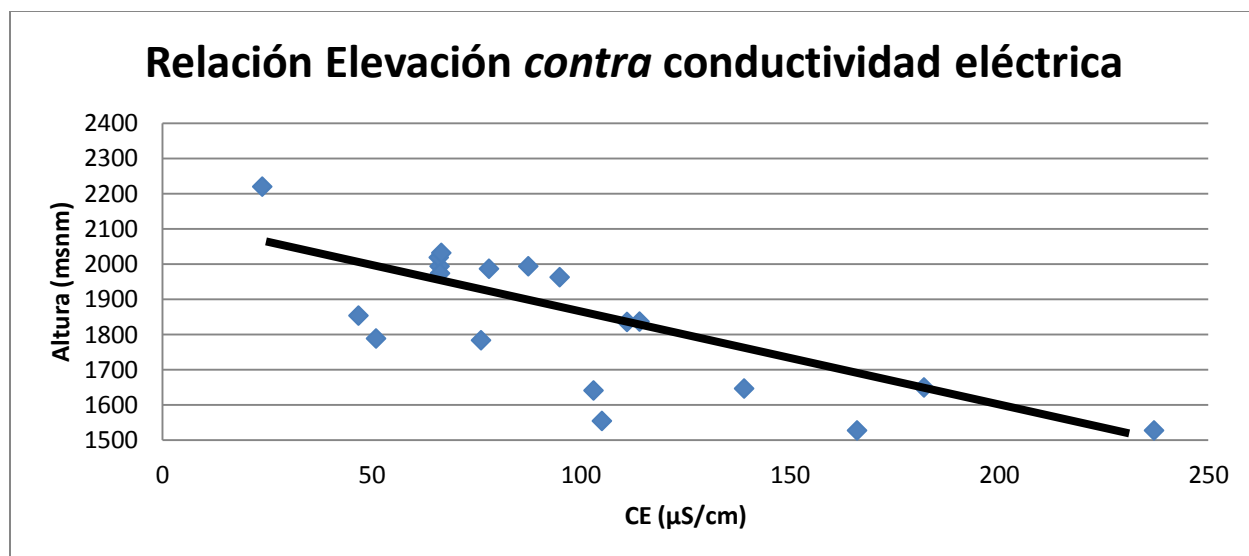


Figura 12 Relación elevación contra conductividad eléctrica línea de flujo 1, parteaguas Tona – Frío. Autor

A partir de la relación entre la conductividad eléctrica y la altura, la ocurrencia de agua y la morfología de la zona se propone una línea de flujo en el parteaguas Tona-Frío.

Línea 2 – Oro-Lato: Se realizó un proceso análogo al que se llevó a cabo para la línea anterior, teniendo en cuenta factores geológicos, geomorfológicos e inventario de aguas.

A lo largo del parteaguas se encontraron 8 puntos que proceden de: 5 de información del proyecto INGEOMINAS (2009) y 6 de salidas de campo del grupo en predicción y modelamiento hidroclimático (GPH-UIS) en 2010 y 2011.

La ubicación de la zona de interés de esta hipótesis de flujo se encuentra en la figura 13. Donde se presentan los puntos muestreados sobre el MDE y con una línea negra la hipótesis de flujo. La línea está en las litologías Cuarzomonzonita de la Corcova y neis de Bucaramanga.

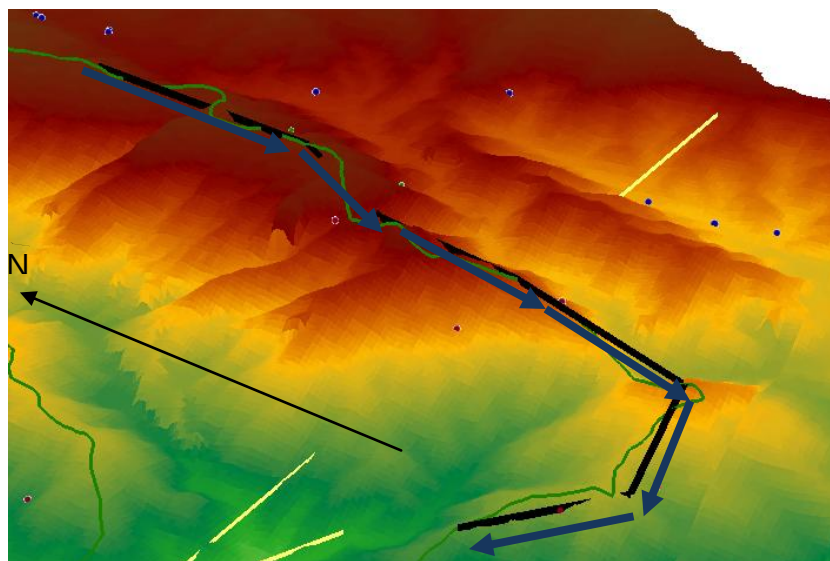


Figura 13 Zona línea de flujo 2, parteaguas Oro – Lato. Autor

Se encontró una tendencia entre la conductividad eléctrica y la altura (ver figura 14) para los puntos provenientes del proyecto de INGEOMINAS (2009) y GPH campaña 2011, encontrando que los puntos del GPH campaña 2010 muestran un comportamiento alejado de la tendencia, que puede hacer parte de otro flujo a lo largo del parteaguas, ya que estas líneas de flujo están condicionadas por la geomorfología de la zona.

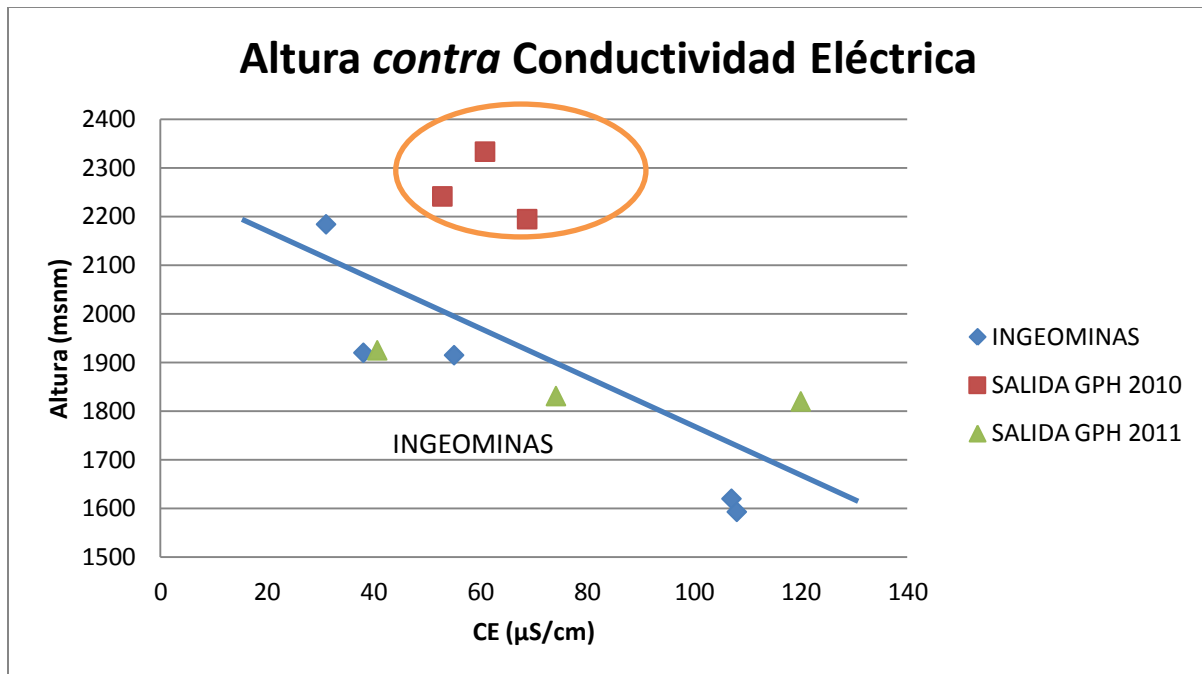


Figura 14 Relación elevación contra conductividad eléctrica línea de flujo 2, parteaguas Oro – Lato. Autor

Considerando la relación encontrada entre la conductividad eléctrica del agua y la altura a la que fueron tomadas las muestras se propone una línea de flujo que va por el parteaguas Oro-Lato y se dirige hacia la zona de la falla de Bucaramanga.

2.3.2. Origen del agua subterránea y flujo de larga distancia

Partiendo del postulado que la composición química del agua subterránea es el resultado combinado de la composición del agua que ingresa al acuífero y sus reacciones con los minerales presentes en la roca a través de la cual circula o, con sustancias contaminantes que afectan su calidad (Appelo, C y Postma, D, 1999), se puede decir que entre más alejada esté el agua subterránea de su zona de recarga se tendrán valores mayores de conductividad eléctrica, esto es aceptable en el caso de contaminación mínima o inexistente, y rocas con propiedades de solubilidad similares.

De acuerdo con esto, la conductividad eléctrica puede ser tratada como un indicador del origen y edad del agua, que brinda una idea relativa entre aguas de una zona homogénea.

A partir de la información de conductividad eléctrica del inventario de nacimientos de agua se realizó una espacialización en la zona del Macizo de Santander utilizando el método del vecino natural en el software ArcGIS®.

Para analizar la información se superpuso la capa de información de las fallas geológicas a la imagen de la conductividad eléctrica (ver figura 15).

El rango de conductividad eléctrica va desde 4 $\mu\text{S/cm}$ hasta 675 $\mu\text{S/cm}$ y se dividió en las categorías baja (10-100 $\mu\text{S/cm}$), media (100-200 $\mu\text{S/cm}$) y alta conductividad (200-675 $\mu\text{S/cm}$). Como se puede ver en la imagen la mayor parte de la zona tiene bajos valores de conductividad eléctrica, evidenciando aguas que están cerca de la zona de recarga (INGEOMINAS, 2009), aguas muy jóvenes. Se encontró que, en general, las aguas con valores bajos de conductividad están asociadas a zonas de parteaguas, en donde se ha identificado flujo a través de zonas meteorizadas y fracturadas.

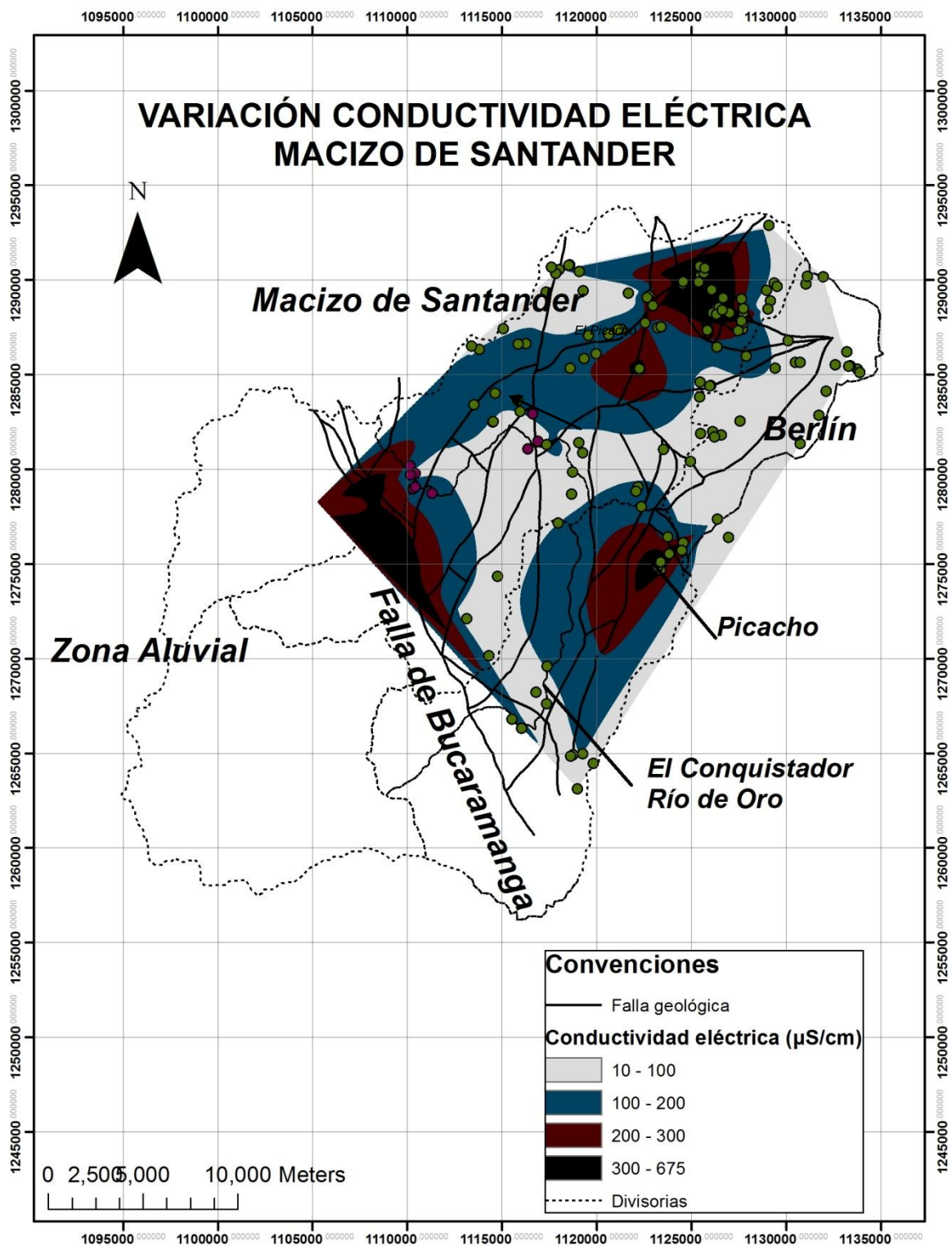


Figura 15 Variación espacial conductividad eléctrica en la CSRL. Autor

Se observan tres zonas oscuras con las conductividades más altas. Una zona de alta conductividad se encuentra en la parte alta de la cuenca de Río de Oro (El Picacho), que puede ser producto de contaminación; zona de recarga alejada; o rocas muy solubles. Las actividades antrópicas en esta zona no son muy importantes, haciendo poco probable el aumento de conductividad por contaminación. Esta zona es la más alta de la cuenca, por lo que si su origen está a mayor altura, el agua procedería de otra cuenca. En los resultados obtenidos por Forero (2012) se identificó una posible entrada de agua subterránea, que ajustó el modelo TETIS (Francés, et al, 2012). En cuanto a la edad del agua, Molina (2009) al aplicar un modelo isotópico con isótopos estables, para el cálculo de la edad del agua, encontró que en la estación Conquistador tiene valores de edad del agua mayores que otros puntos de la cuenca, entre ellos el punto Café Madrid. El uso de estos resultados debe ser cuidadoso porque no son del todo confiables, porque no contó con una serie de datos de isótopos estables lo suficientemente larga y continua para la aplicación del modelo. Las rocas en el Picacho son calcáreas por lo que su solubilidad es mucho más alta que las rocas que se encuentran alrededor. De acuerdo a lo anterior, la hipótesis más probable que explica el foco de alta conductividad es la presencia de rocas muy solubles que se disuelven muy fácilmente.

Otra zona de alta conductividad eléctrica se encuentra en la parte alta del río Tona. Se puede identificar una alta densidad de fracturas en la zona y litología sedimentaria (Kit, Kip, Kir, Qd, Kils, Jcs). Las altas conductividades se pueden deber a la alta solubilidad de las rocas sedimentarias con presencia de calizas o a contaminación.

Una última zona de altas conductividades eléctricas se ubica en la falla de Bucaramanga, en donde hay tres puntos de muestreo (Pozo Jardín la Colina, Pan de Azúcar y La Flora). La geología en la que se encuentran los pozos Jardín la Colina y Pan de Azúcar, es roca con alto grado de fracturamiento causado por el efecto de la falla de Bucaramanga; y en la Flora la geología es sedimentaria de carácter aluvial. Los resultados de conductividad de más de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la falla de Bucaramanga, indican aportes de agua de la parte alta de la montaña, planteando posibilidades de flujos de

larga distancia, que tienen asociada una edad mayor que las aguas encontradas en zonas meteorizadas en el Macizo de Santander.

Las ideas aquí encontradas, deben ser validadas utilizando técnicas hidroquímicas e isotópicas, que aporten en el entendimiento del flujo del agua subterránea y su interacción con el medio geológico. Se espera que la validación del modelo hidrogeológico conceptual aporte elementos de juicio en la explicación de las causas de la diferenciación de las aguas subterráneas asociadas a la edad y procedencia del agua subterránea.

2.3.3. Esquema conceptual de flujo de agua subterránea

Son muchas las variables implicadas en el flujo de agua subterránea en la zona de estudio, situación que hace del modelado conceptual un auténtico reto. Como primera aproximación la geología aporta ideas fundamentales en la comprensión del fenómeno. Las características hidráulicas de las rocas aportan una primera idea de la capacidad del transporte y almacenamiento de agua, se debe tener en cuenta que en un medio heterogéneo, como un Macizo rocoso fracturado y meteorizado, las propiedades hidráulicas no son solo función de las características inherentes a la roca sana. La meteorización y el fracturamiento, generan variaciones en la porosidad y la conductividad hidráulica de la roca sana, llegando a posibilitar el almacenamiento y transporte de agua en formaciones de roca dura cristalina.

Por otra parte, las geoformas, además de controlar el proceso de escurrimiento superficial, también controlan la posibilidad de flujo subterráneo. Un caso particular se encontró en las zonas de parteaguas, en donde la ocurrencia de nacimientos de agua subterránea en las laderas dio un indicio de flujo a través de franjas longitudinales, que estaban controlados por la presencia de cimas y valles en el lineamiento del parteaguas.

Las fallas geológicas tienen asociada una franja de ancho variable, en la que las propiedades hidráulicas de la roca son fuertemente alteradas, posibilitando la

existencia de canales preferenciales de flujo, cabe anotar que para caracterizar un canal de esta clase es necesario llevar a cabo un estudio exhaustivo. En la actualidad, en el Macizo de Santander sólo es posible proponer hipótesis de flujo a través de canales preferenciales, en futuros estudios se deberán llevar a cabo actividades de validación.

El primer tipo de flujo que se identificó, en este estudio, fue a través de zonas meteorizadas a lo largo de lineamientos de parteaguas. Se logró identificar la ocurrencia de agua a lo largo de estos sectores, ubicando los puntos del inventario de nacimientos en un mapa con los lineamientos de parteaguas (ver Figura 6). La meteorización de las zonas de parteaguas puede llegar hasta espesores de por lo menos 40 metros, que tienen presencia de niveles con algún grado de saturación (Sierra, L, 2011). Los recorridos de estos flujos son cortos y están fuertemente controlados por la geomorfología del parteaguas (cerros y valles).

El segundo tipo de flujo identificado, que había sido propuesto intuitivamente en otros estudios, es el que ocurre a través de fallas geológicas y es llamado de “larga distancia”. La presencia de una falla marca una franja de ancho variable, en donde las propiedades hidráulicas de la roca son afectadas, posibilitando el flujo de agua tanto longitudinal como verticalmente. Este flujo es de mayor alcance que se identificó en primera instancia y tienen asociada una edad, en general, superior. El esquema de flujo se propone como canales de flujo preferencial que poseen valores de conductividad hidráulica mucho mayores que los que se esperan en una zona meteorizada o en roca sana.

Los dos flujos antes mencionados no se dan de manera aislada, por el contrario, están muy relacionados y su esquema de interrelación es el siguiente. En algunos puntos, las fallas geológicas cruzan los lineamientos de parteaguas, generando zonas de interacción entre los dos flujos. La zona meteorizada debe generar un aporte de agua a la falla geológica; se propone la relación de esta manera porque la conductividad

hidráulica de la falla es mucho más alta que la de la zona meteorizada, por lo tanto las zonas de falla pueden captar y almacenar volúmenes de agua.

En la idealización de las fallas geológicas en general se proponen bloques discontinuos de rocas fracturadas, rodeados por zonas muy fracturadas interconectadas, con muy buenas propiedades hidráulicas que almacenan y transportan agua subterránea (COLCIENCIAS, 2003). En este trabajo se propone un esquema en perfil de la interacción entre el flujo de corta distancia en zonas meteorizadas a lo largo de parteaguas y el flujo de larga distancia en fallas geológicas a partir de las observaciones anteriores (ver figura 16).

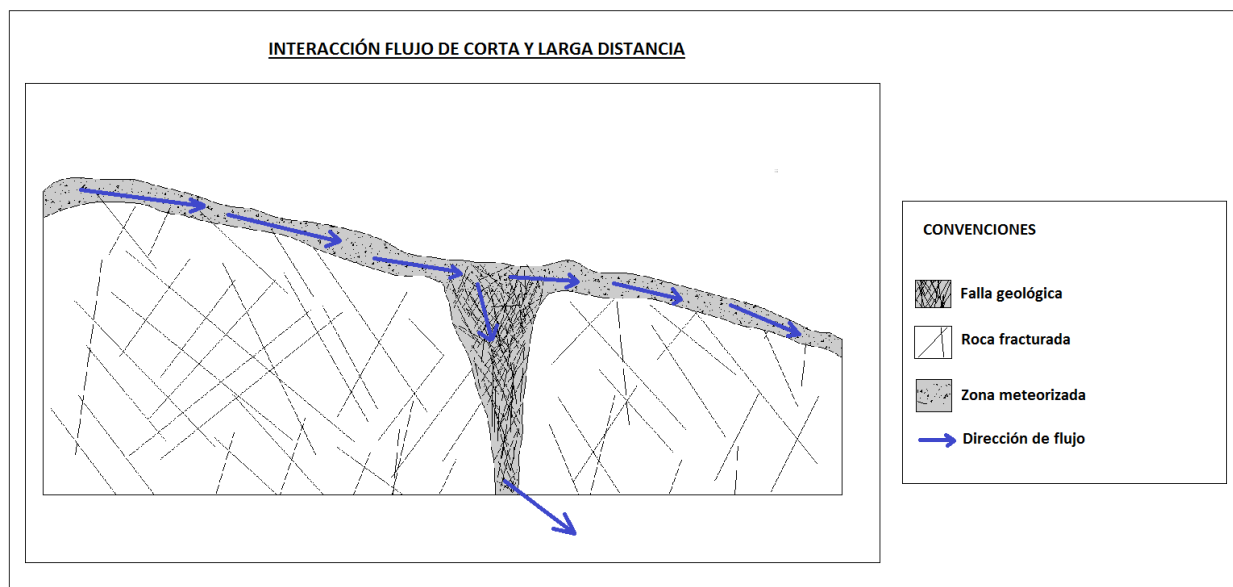


Figura 16 Esquema de interacción entre flujo de en zona meteorizada y fallas geológicas. Autor

A partir de las observaciones expuestas, se propone un bloque esquemático para explicar el fenómeno de flujo subterráneo en el Macizo de Santander. En este bloque, se pueden observar flujos a lo largo de divisorias de agua, flujos preferenciales a lo largo de fallas y la interacción entre estos dos flujos, y la conceptualización del flujo en fallas (ver figura 17).

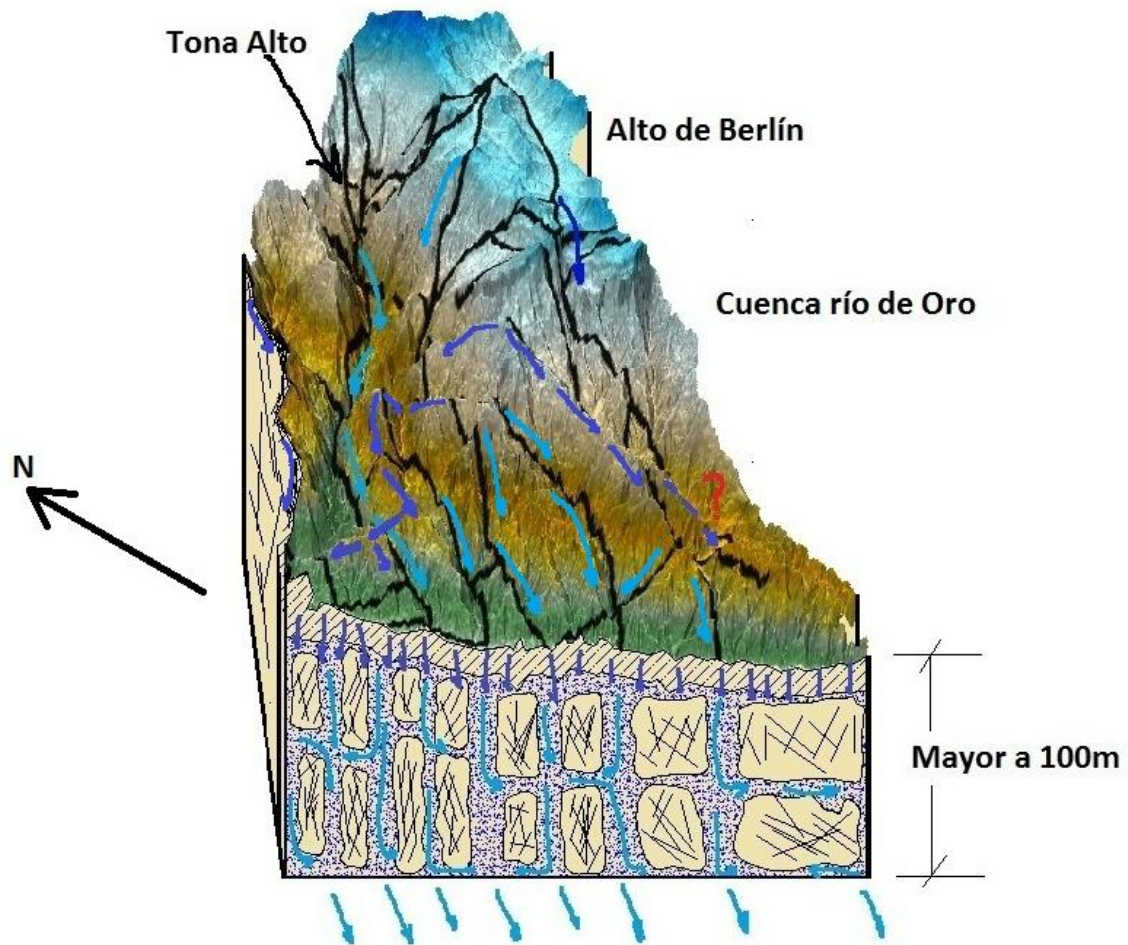


Figura 17 Bloque diagrama Macizo de Santander. Autor

3. VALIDACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El proceso de validación es fundamental para el modelado conceptual del flujo de agua subterránea, apoyándose en características del agua que muestran la interacción con el medio físico. Y es el Macizo de Santander un medio muy heterogéneo que representa un reto para su validación, en donde se han identificado flujos que se dan a lo largo de parteaguas en espesores fracturados y meteorizados, y a través de fallas geológicas.

En este capítulo se presenta el proceso de validación del modelo conceptual propuesto para el Macizo de Santander, comenzando con una conceptualización de las metodologías usadas, mostrando su aplicabilidad al Macizo de Santander. Luego el proceso de validación con técnica hidrogeoquímica e isotópica, basado en el entendimiento del flujo en el Macizo de Santander.

Como producto de este capítulo se obtuvo un modelo hidrogeológico validado con la técnica hidrogeoquímica e isotópica, que representa un avance en el entendimiento de la dinámica del agua subterránea en la zona de estudio.

3.1. Conceptualización

Un modelo hidrogeológico conceptual está basado en el entendimiento de la relación entre variables físicas del medio y la ocurrencia de agua. La aplicación de la validación está basada en encontrar los testigos de la interacción entre el suelo, litología y agua subterránea; desde el punto de vista químico e isotópico.

La química de las aguas subterráneas es un tema complejo que trae variables como la composición química del medio de flujo, el tiempo de contacto, la cantidad de agua, temperatura, entre otros. Variables que se ven afectadas por la alta complejidad del medio físico del Macizo de Santander, en términos de rasgos estructurales, geomorfológicos y de meteorización.

El análisis químico de las aguas subterráneas abarca iones fundamentales (Na, Mg, Ca, K, Cl, HCO₃, NO₃, SO₄), parámetros físico-químicos (temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica) y parámetros de calidad (DBO, DQO). El aporte que da cada resultado de un análisis químico es representativo de alguna interacción del agua con el medio físico y como un todo representan el resultado de gran cantidad de procesos físicos y químicos que sufre el agua en el subsuelo.

Los parámetros físico-químicos brindan una caracterización básica del agua subterránea, con lo que se pueden abordar temas de edad relativa del agua, direcciones y procedencia del flujo, y calidad en casos de posible afectación antrópica.

Partiendo del conocimiento básico de las aguas, el análisis de iones en las aguas da una idea más precisa de su evolución. La caracterización química de las aguas guarda una estrecha relación con la química de las rocas, las aguas lluvias, el suelo y las propiedades hidráulicas del medio subterráneo, que en el Macizo de Santander presentan gran variabilidad asociada a rasgos geológicos, geomorfológicos y estructurales.

El proceso conceptual del flujo de agua subterránea relacionado con la composición química comienza con el agua que proviene de la atmósfera y se precipita; esta agua trae consigo una marca química, que tiene asociado un proceso de evolución que depende de su procedencia, el camino recorrido y su interacción con el sistema atmosférico – observando cuidadosamente se nota que conceptualmente el proceso de evolución del agua lluvia es igual al del agua subterránea. Una vez se infiltra y entra en contacto con los materiales del suelo, se da un aporte importante que marca el primer paso en la evolución del agua subterránea; esta marca es producto de fenómenos en los que el agua interactúa con el suelo. La caracterización de los materiales que conforman esta primera capa ayuda al entendimiento de los procesos químicos en los que se ve involucrada el agua, entre los que se cuenta la interacción con las arcillas. Una vez el agua llega al flujo subterráneo propiamente dicho, la interacción agua-roca

aporta iones que dependen de la composición química de la roca, el tiempo de contacto, la química precedente del agua, entre otros, siendo otro paso en la evolución del agua subterránea.

La evolución del agua subterránea en el Macizo de Santander está controlada por las mismas características que controlan el flujo, siendo fundamental identificar las relaciones entre variables químicas y características estructurales y geomorfológicas.

Los isótopos son una herramienta que se complementa con la química, aportando un punto de vista diferente de la evolución del agua subterránea. El uso de isótopos estables aporta al reconocimiento de la procedencia del agua subterránea, siendo posible identificar zonas de recarga y aguas con igual procedencia que están a lo largo de una línea de flujo, también es posible identificar mezclas de aguas de diferentes procedencias, todo esto debe ir de la mano de las características físicas del medio.

El uso de isótopos radioactivos aporta a la estimación de la edad del agua; este tema es fundamental en la caracterización del medio hidrogeológico, ya que tiene implicaciones que están relacionadas con la sostenibilidad y la capacidad de renovación del recurso.

La información de calidad del agua aporta información valiosa para caracterizar el agua subterránea como una fuente tentativa de abastecimiento, además de ser un indicador del efecto antrópico sobre las aguas subterráneas. El segundo punto tiene gran incidencia en la validación de un modelo hidrogeológico conceptual como el que se presenta en este informe, ya que puede explicar resultados químicos de iones o isótopos que presenten características anómalas o no correlacionadas con el flujo del agua subterránea.

3.2. Validación: Técnica hidrogeoquímica e isotópica

La validación del modelo conceptual se llevo a cabo en dos etapas, primero una a partir de información hidrogeoquímica y luego a partir de isótopos. A continuación se presentarán los materiales, análisis y resultados de cada una de las etapas.

3.2.1. Hidrogeoquímica

Se cuenta con información de iones de dos procedencias: INGEOMINAS (2009), que realizó una caracterización hidroquímica del Macizo de Santander y análisis hidroquímicos llevados a cabo a lo largo de la presente investigación. Se nota que la cuenca del río Tona es la que cuenta con mejor información de iones, junto con el altiplano de Berlín. Las cuencas del río de Oro alto, Lato y Frío tienen muy poca información, por lo que sólo se puede hacer una caracterización básica de la química de las aguas subterráneas.

Para validar las hipótesis de flujo a través de las zonas de parteaguas del río Tona-Frío y Oro-Lato propuestas en el modelo conceptual, se llevo a cabo un muestreo de iones que contó con seis puntos de muestreo para la línea Tona-Frío (MS-01 a MS-06) y tres puntos para la línea Oro-Lato (MS-07 a MS-09). Además de eso, se realizaron muestreos en tres pozos en la zona de la falla de Bucaramanga, para caracterizar su interacción entre el Macizo de Santander. Por último se tiene un punto en la zona de descarga del acuífero superficial de la formación Bucaramanga, para completar el esquema de flujo en la zona de estudio desde la zona de recarga en el Macizo de Santander hasta una descarga en la escarpa occidental. Los resultados de los análisis de agua obtenidos en esta investigación se presentan en la tabla 1.

En la figura 18 se muestran las ubicaciones de los puntos con información de iones que están disponibles en la zona de estudio, ubicados sobre el croquis de las divisorias de aguas de la zona de estudio. En el anexo 2 se encuentra una tabla con las coordenadas de los puntos muestreados en esta tesis.

Rótulo	Número	Nom	pH	T°C	c25°C	TAC	Dureza	TDS	Na+	K+	Mg2+	Ca2+	Mn	Fe(III)	Cl-	SO42-	HCO3-	NO3-	PO4
MS-01	1	km26	7.2	24.6	118	52.5	30.8	53	0.6300	0.6800	2.6400	13.1700	0.0000	0.0060	10.5000	0.0000	45.7000	0.2000	0.2100
MS-02	2	El Carajo	6.55	24.6	34	18.7	21.18	68	0.6300	0.9000	0.0000	8.4700	0.0000	0.0120	7.4300	0.0000	16.0000	0.1100	0.0580
MS-03	3	Km 20	7.27	24.6	58.9	41.2	32.73	25	3.9800	0.8700	1.9900	13.1100	0.0000	0.0040	9.2900	0.0000	48.0100	0.4900	0.2100
MS-04	4	Retiro Chiquito	7.07	24.6	69	37.5	34.65	37	1.8200	0.7300	2.7400	13.8600	0.0000	0.0480	11.1400	0.0000	45.7000	0.9900	0.1800
MS-05	5	Km 9	7.29	24		122	96.2	160	11.8	4.48	5.04	8.75	0	0.01	9.8	0	74.3	0.83	2.2
MS-06	6	Km 11	7.31	24		29.9	46.2	110	12.89	2.69	1.49	1.2	0.01	1.21	9.3	1.3	36.5	0.7	0.1
MS-07	7	Falla Silla	7.05	24.6	57	45	30.8	41	1.7700	0.6200	0.1900	12.3200	0.0000	0.0080	5.5000	2.9500	29.7200	0.2200	0.1300
MS-08	8	Cubín Granadillo Bajo	7.52	24.6	112	48.7	38.5	93	4.2600	0.5600	3.2200	15.4000	0.0000	0.1420	7.5100	5.7600	52.5800	1.5600	0.1700
MS-09	9	Cubín Granadillo Alto	7.06	24.6	81.9	41.2	36.58	78	4.0600	0.8000	3.1000	14.6300	0.0000	0.0110	5.5900	7.4600	50.3000	1.8900	0.2900
ZF-01	10	La Flora superficial-Julio	6.0	24.0	204.0	33.2	37.4	170.0	7.6	2.4	3.1	14.0	0.0	1.3	21.2	3.9	43.5	1.3	2.4
ZF-01	11	La Flora superficial-Mayo	6.3	24.0		70.0	35.9	410.0	7.5	2.5	3.1	14.0	0.0	0.4	16.1	5.8	42.7	3.6	2.4
ZF-02	12	La Flora Profundo	6.84	24	239	86.2	123.2	170	15.1000	8.6000	5.2400	15.6000	0.4500	0.3700	21.0000	2.6200	94.8000	0.2080	0.4300
ZF-03	13	Pan de Azúcar-Superficial	6.9	24.1	390.0	201.5	119.4	273.0	5.1	1.9	11.7	67.8	0.0	0.1	11.1	116.7	122.9	3.2	0.0
ZF-04	14	Pan de Azúcar-Profundo	6.9	24.0	420.0	301.2	129.0	195.0	4.9	2.5	16.5	65.1	0.1	0.2	23.2	51.2	183.7	0.5	0.4
ZF-05	15	Jardín La Colina	7.21	24	556	304	174.6	420	33.3	5.9	8.52	22	0	0.01	8.9	8.89	184.5	0.001	0.11
MB-01	16	La Rosita	6.0	24.0	206.0	26.2	65.4	124.0	17.2	3.8	1.8	9.0	0.0	0.1	30.6	0.0	31.2	8.2	1.2

Tabla 1 Resultados de iones para validación del modelo conceptual. Autor

Las concentraciones de iones están en [mg/l], los sólidos disueltos totales en [mg/l], la alcalinidad total y dureza total en [mg/l de CaCO₃/l].

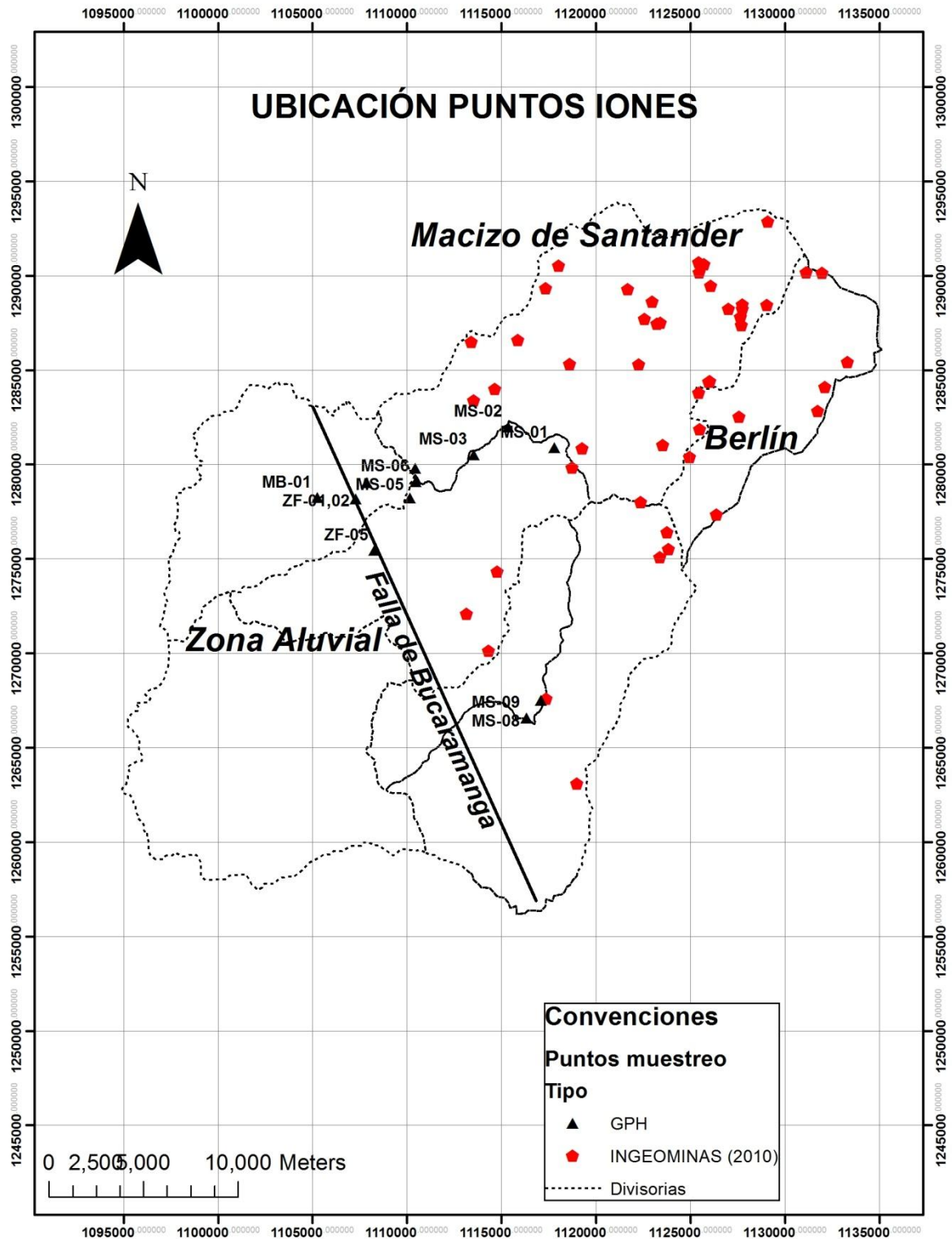


Figura 18 Ubicación puntos de análisis de iones en la zona de estudio. Autor

Los valores de conductividad eléctrica oscilan entre 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 566 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor promedio de 195 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos se encuentran en puntos en la falla de Bucaramanga. El ion sodio tiene un rango de concentraciones que van desde 0.63 mg/l hasta 17.2 mg/l, con un valor medio de 8.28 mg/l. El ion potasio fue encontrado en concentraciones que van desde 0.56 mg/l hasta 8.6 mg/l, con un valor medio de 2.5 mg/l. El ion magnesio va presenta concentraciones que van desde 0 mg/l hasta 16.5 mg/l con un valor medio de 4.4 mg/l. El ion manganeso sólo fue medido en puntos en la falla de Bucaramanga con concentraciones de 0.1 mg/l y 0.45 mg/l. El hierro es un elemento que se encuentra en concentraciones muy bajas que van desde 0.006 mg/l hasta 0.37 mg/l con valor medio de 0.24 mg/l. El ion cloruro muestra concentraciones que van de 5.5 mg/l hasta 30.6 mg/l con un valor medio de 13 mg/l, el valor más alto se reportó en la descarga del acuífero superficial de Bucaramanga. El ion sulfato tiene concentraciones entre 0 mg/l y 116.7 mg/l, con una media de 12.9 mg/l, los valores más altos fueron reportados en la zona de falla en los piezómetros de Pan de Azúcar. El ion bicarbonato tiene concentraciones que van desde 16 mg/l hasta 184.5 mg/l con un valor medio de 69 mg/l, las mayores concentraciones se encuentran en la zona de la falla de Bucaramanga. Las concentraciones de nitratos van desde 0 mg/l hasta 3.6 mg/l, con un valor promedio de 1.5 mg/l. El ion fosfato se encuentra en concentraciones entre 0 mg/l y 2.4 mg/l con promedio de 0.65 mg/l. En general se ve que las aguas con mayores concentraciones de iones y mayor mineralización se encuentran en la falla de Bucaramanga.

Con la información disponible, se llevaron a cabo clasificaciones, representaciones y análisis de agua que llevaran al entendimiento de la interacción del medio con el agua.

El apoyo que brindan las diferentes representaciones de los resultados hidroquímicos resultó clave en la validación del modelo conceptual, siendo los diagramas de Schöeller, Piper y Stiff los utilizados en el presente estudio.

El diagrama de Schöeller-Berkaloff en el Macizo de Santander (ver figura 19) muestra que el anión más abundante es el bicarbonato y el catión más abundante es el calcio, excepto en los puntos MS-05 (Km11) y MS-06 (Km 9) donde predomina el sodio.

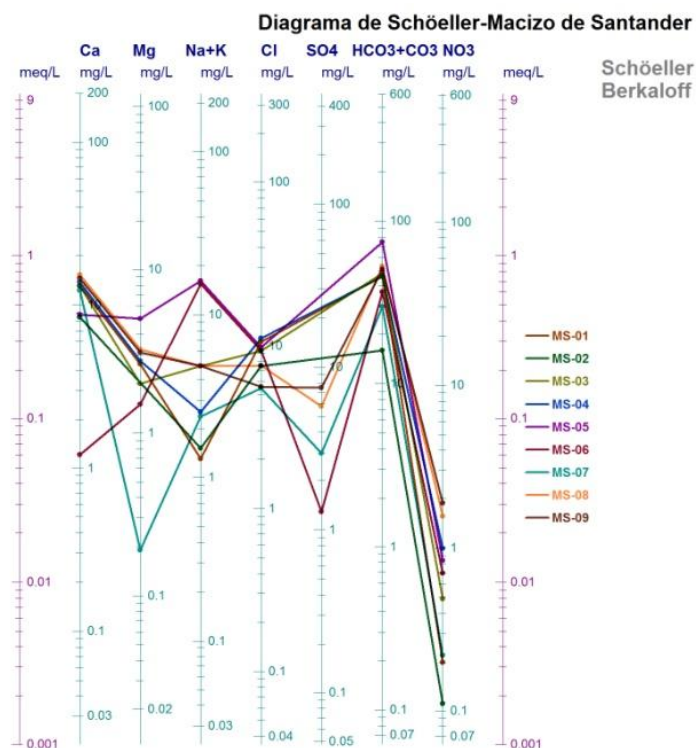


Figura 19 Diagrama de Schöeller puntos muestreados Macizo de Santander. Autor

El diagrama de Schöeller en la zona de falla de Bucaramanga y descarga (figura 20), muestra al bicarbonato como el anión más abundante y al calcio como el catión más abundante. El comportamiento es diferente en el punto ZF-03 (Pan de Azúcar superficial), con mayor concentración de sulfatos y MB-01 (dren la Rosita) con mayor concentración de cloruros.

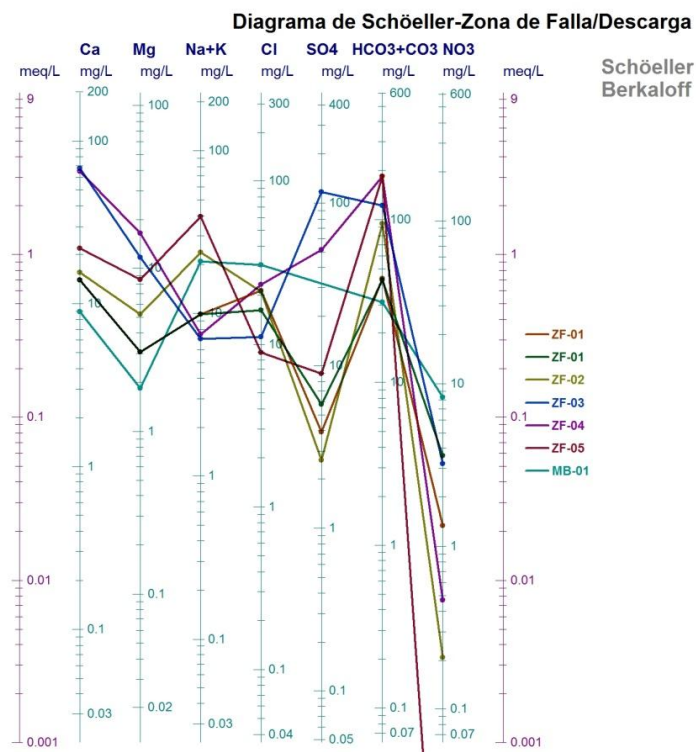


Figura 20 Diagrama de Schöeller zona de falla de Bucaramanga y descarga. Autor

En general, según la serie de Chevoratev, los resultados obtenidos son propios de aguas que están cerca de su zona de recarga y que no se encuentran muy evolucionados, excepto en los puntos de la zona de falla de Bucaramanga y la parte alta del Macizo de Santander en rocas sedimentarias. Esta observación se ajusta al flujo de corta a media distancia a través de zonas de parteaguas en espesores meteorizados y fracturados, descrito en el modelo conceptual.

En general las concentraciones de sulfatos son bajas, exceptuando los puntos ubicados en Pan de Azúcar. Las concentraciones de cloruros encontradas en la zona de falla son mayores que las registradas en los puntos muestreados en el Macizo de Santander.

El diagrama de Piper (ver figura 21) de los puntos muestreados en la zona de estudio muestra aguas con facies hidroquímicas que van desde bicarbonatadas-cálcicas, a

bicarbonatadas-mixtas/sódicas. Algunos puntos alejados del grueso de las muestras, presentan facies cloruradas-sódicas (MB-01) y sulfatadas-cálcicas (ZF-03).

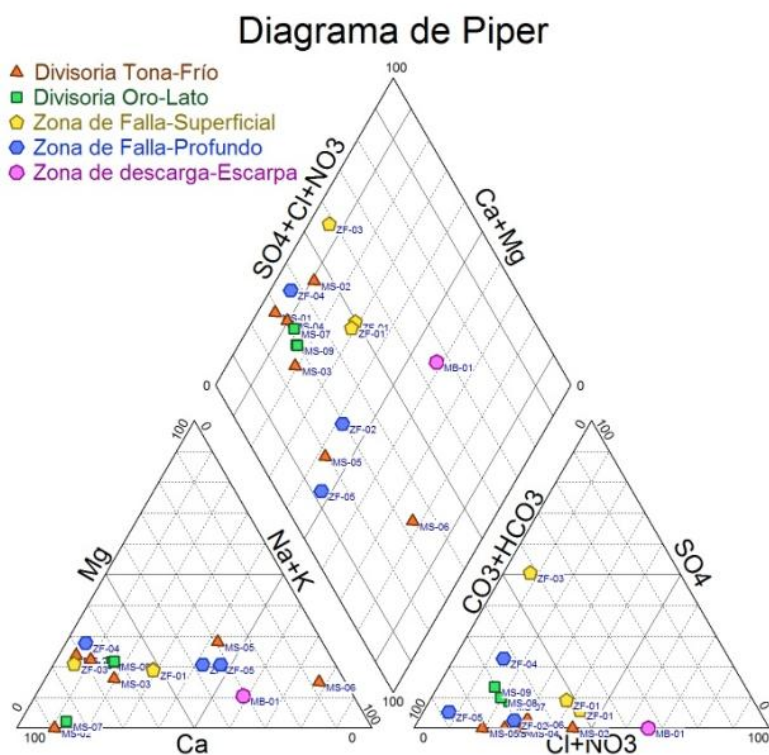


Figura 21 Diagrama de Piper puntos muestreados Macizo de Santander. Autor

Los puntos asociados a la línea de flujo en espesor meteorizado en el parteaguas Tona-Frío tienen asociada la facie bicarbonatada cálcica para los puntos tomados en verano y bicarbonatada mixta/sódica para los puntos tomados en invierno. Esta diferenciación en las facies puede deberse a que fueron tomadas en épocas con diferente régimen de precipitaciones, aunque esta hipótesis debe ser validada con nuevos muestreos. Los puntos tomados en verano tienen una relación entre sí, lo que parece mostrar una línea de flujo a lo largo del parteaguas. De igual manera, los puntos tomados en invierno son congruentes en las facies que describen, por lo que se proponen puntos en una misma línea de flujo. Para verificar que todos los puntos pertenecen a una misma línea de flujo es necesario llevar a cabo jornadas de muestreo que tengan condiciones homogéneas de régimen de lluvias.

Los puntos asociados a la línea de flujo en espesor meteorizado en el parteaguas Oro-Lato tienen clasificación bicarbonatada cálcica, representando aguas similares que pueden pertenecer a una misma línea de flujo. Es importante tener en cuenta que sólo se cuenta con tres puntos en la línea y que dos de ellos se encuentran muy cerca (a menos de 200 m), por lo que es necesario que se lleven a cabo futuros muestreos y análisis de iones para validar la hipótesis con menor incertidumbre.

Los puntos encontrados en la falla de Bucaramanga muestran facies diferenciadas de las encontradas en la zona de meteorización. En los puntos de los piezómetros superficiales las aguas son sulfatadas cálcicas para Pan de Azúcar y bicarbonatada/clorurada cálcica/sódica para La Flora; los dos puntos muestran aguas diferentes que al parecer no están directamente relacionadas. En los piezómetros profundos y pozo profundo se encuentran facies bicarbonatada cálcica a cálcica/sódica.

El diagrama de Stiff (ver figura 22) muestra la representación de las aguas analizadas en la zona de estudio, y se nota que existen aguas más evolucionadas que otras que probablemente tienen diferente procedencia. Las aguas más evolucionadas se presentan en los pozos profundos de la falla de Bucaramanga y la parte alta del Macizo de Santander en formaciones sedimentarias con presencia de calizas (ver figura 23). El agua asociada a zonas de parteaguas se presenta poco evolucionada por la poca cantidad de iones y se clasifica como joven cerca de su zona de recarga.

Diagrama de Stiff - CSRL

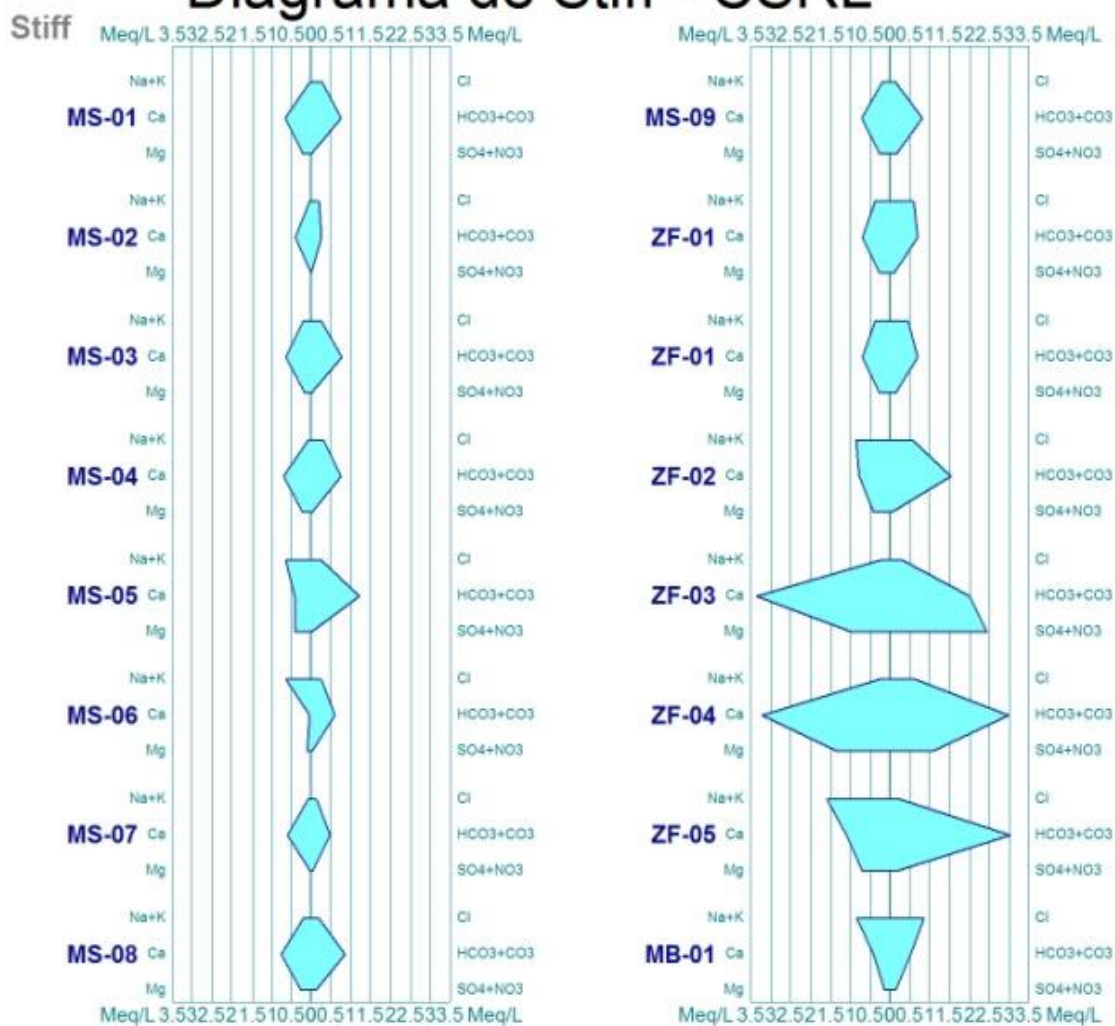


Figura 22 Diagrama de Stiff aguas analizadas CSRL. Autor

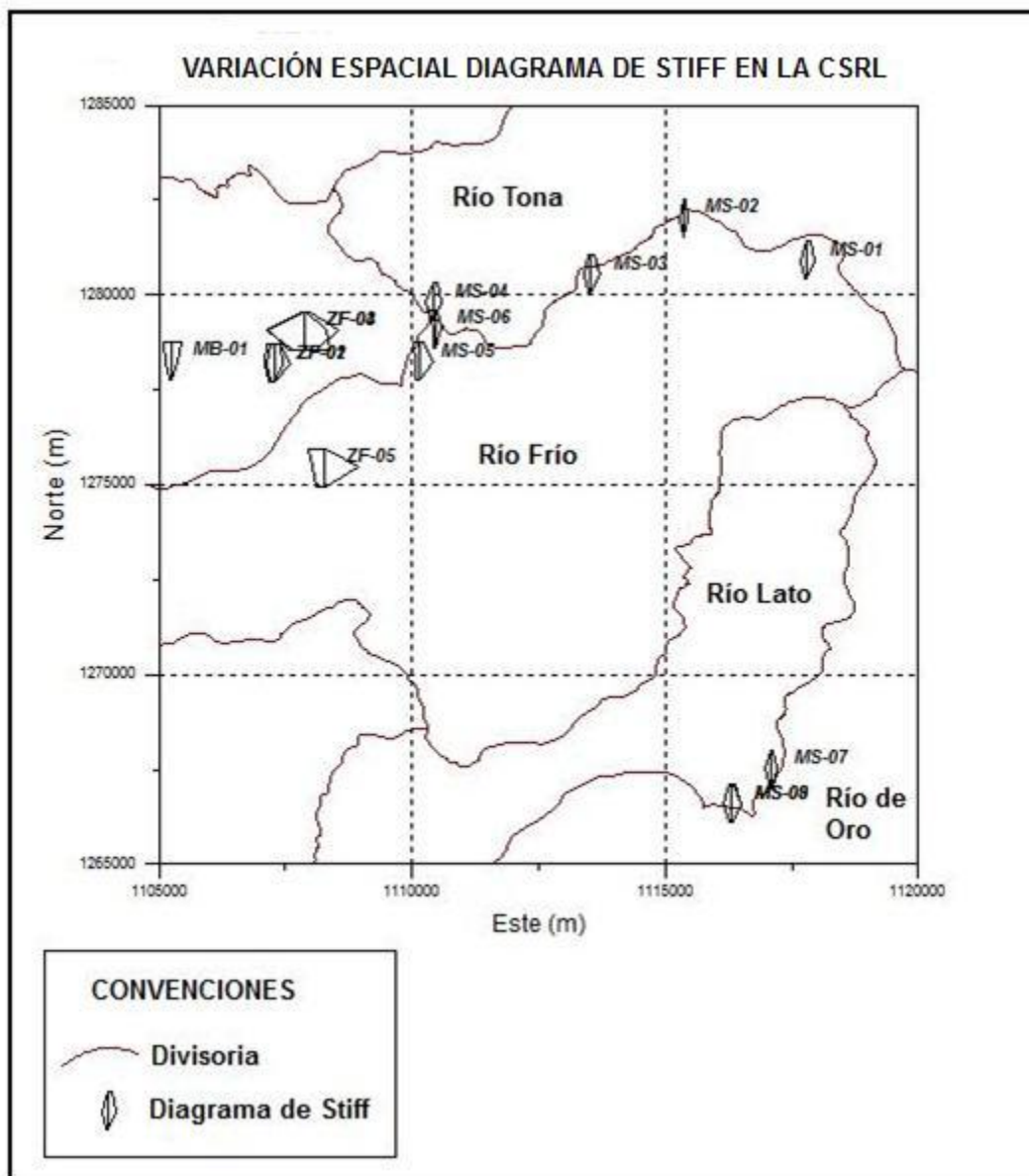


Figura 23 Variación espacial diagrama de Stiff en la CSRL. Autor

En la línea de flujo Tona-Frío (MS-01 a MS-06) se nota que el punto MS-01 (Km 26) está más evolucionado que el punto MS-02 (El Carajo), mostrando que el agua presente en el Carajo no procede del sector del Km 26. En adelante se puede observar que del punto MS-02 al punto MS-04 hay una evolución de las aguas, ganando bicarbonatos posiblemente producto de la meteorización de los silicatos presentes en las rocas Cuarzomonzonita y Neis presentes en la zona. Entre el punto MS-05 (Km 11)

y MS-06 (Km 9) hay una evolución evidenciada por aumento en la concentración de bicarbonatos, calcio y sodio.

Los resultados encontrados con los diagramas de Stiff son congruentes con la hipótesis de flujo propuesta para el parteaguas del río Tona y Frío, donde se identificó flujo a través de espesores meteorizados.

En la línea Oro-Lato (MS-07 a MS-09), el punto más alto se encuentra menos evolucionado (MS-07) que los puntos más bajos (MS-08/09) que tienen un aporte de bicarbonatos, posiblemente producto de la meteorización de los silicatos presentes en las rocas cuarzomonzonita y neis. Los puntos MS-08/09 muestran la misma agua debido a que son muy cercanos. Si bien los resultados son congruentes con la hipótesis de flujo se deben llevar a cabo futuros muestreos para validar la línea con menor incertidumbre.

El punto ZF-01 (La Flora superficial) muestra aguas poco evolucionadas, que pueden ser producto de recargas de corta distancia o locales en los depósitos cuaternarios en los que se encuentra ubicado. El punto ZF-02 (La Flora profundo) muestra una evolución no representativa con respecto a ZF-01, posible muestra de comunicación entre los dos niveles ó de no haber tomado una muestra representativa del pozo, ya que la muestra fue tomada con un tubo de PVC por falla de las bombas peristálticas usadas comúnmente para el muestreo, situación que no permitía realizar el vaciado del agua almacenada en el piezómetro.

Los puntos ZF-03 (Pan de Azúcar superficial) y ZF-04 (Pan de Azúcar profundo) muestran aguas con un grado de evolución similar, diferenciado por una alta concentración de sulfatos y un valor menor de bicarbonatos en ZF-03. El punto ZF-05 (pozo jardín La Colina) presenta aguas evolucionadas con un gran aporte de bicarbonatos y de sodio.

En la zona de descarga el punto MB-01 presenta una evolución menor que la mostrada en la falla de Bucaramanga, que no es congruente con la conceptualización del flujo en la zona de estudio.

En general se nota como las aguas de la zona de falla están asociadas, presumiblemente, a líneas de flujo más evolucionadas que las identificadas en los parteaguas, indicando flujos de larga distancia en el Macizo de Santander, presentados en el modelo conceptual como flujos a lo largo de fallas geológicas.

Como se ha visto hasta el momento, el ión bicarbonato es el de mayor concentración, por lo tanto será el ión más representativo en la caracterización del flujo. Se encontró que los bicarbonatos guardan una proporción lineal con la conductividad eléctrica, como se observa en la figura 24.

Los puntos que se encuentran alejados de la tendencia anterior están asociados a la zona de falla de Bucaramanga, a la zona de descarga y a un punto en la formación Los Santos, localizado en la parte alta de la cuenca del río Tona. En estos puntos el aporte de aniones como los cloruros y sulfatos es más importante. De acuerdo a esta observación, los bicarbonatos son un testigo de la evolución del agua subterránea en la zona de estudio.

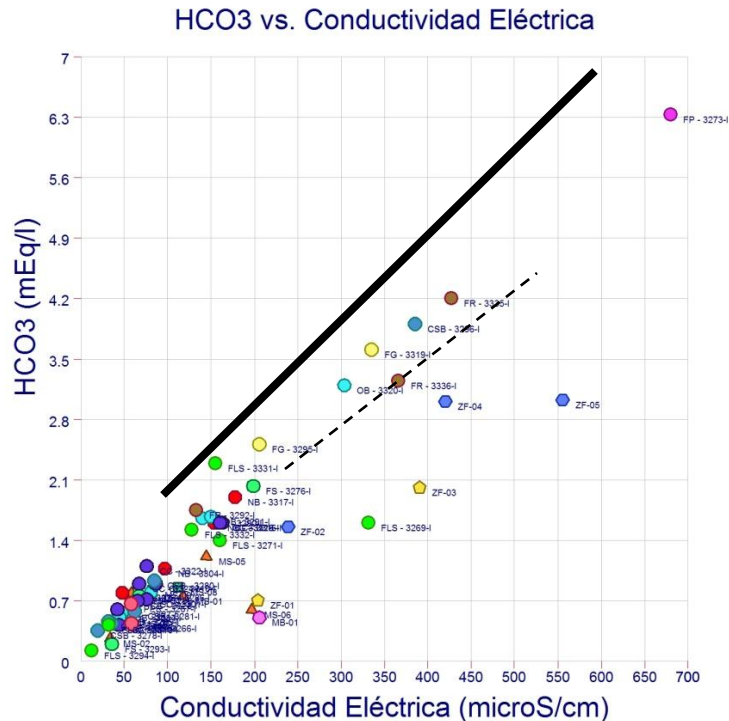
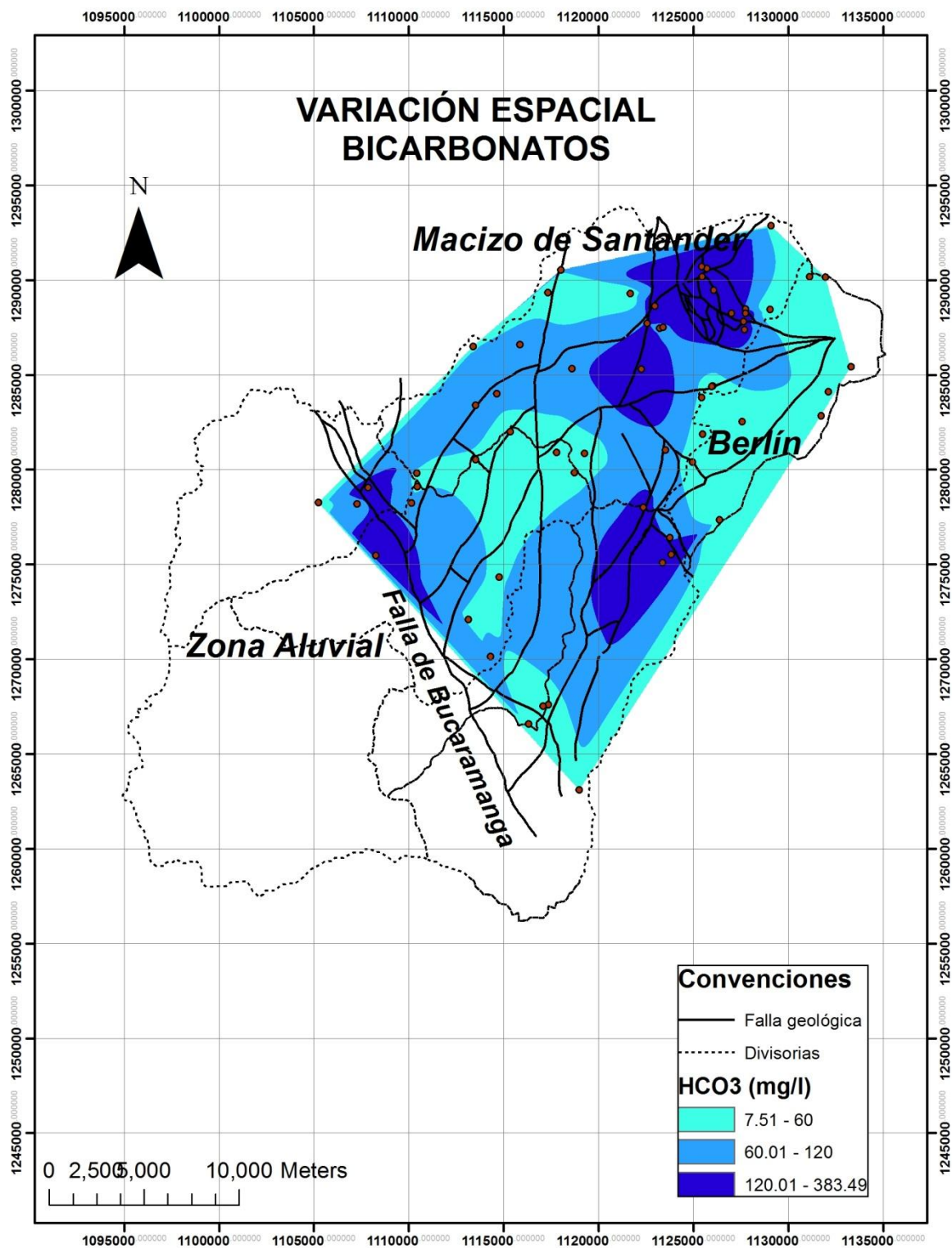


Figura 24 Relación conductividad eléctrica contra bicarbonatos aguas analizadas en la CSRL. Autor

En la figura 25 se presenta la variación espacial de los bicarbonatos en la zona de estudio.

La clasificación de las concentraciones se hizo en tres rangos: bajo (7-60mg/l), medio (60.01-120 mg/l) y alto (120.01-383.49 mg/l).

El rango bajo de concentraciones se encuentra en una parte del sector de Berlín, una parte de la cuenca del río Frío y al occidente a lo largo del límite de la zona de estudio con la cuenca del río Suratá. Estos valores de bicarbonatos están asociados a aguas jóvenes cerca de su zona de recarga, donde el aporte se da posiblemente por el proceso de meteorización de las rocas metamórficas e ígneas que poseen silicatos en su composición mineralógica, tales como los neises y las cuarzomonzonitas.



-Figura 25 Variación espacial bicarbonatos en el agua subterránea en la zona de estudio. Autor

Existen varios focos de altas concentraciones de bicarbonatos, dos en las cuencas altas del río Oro y Tona, asociados a formaciones sedimentarias (Kils, Kip, Kir, Kit). El origen posible de los bicarbonatos es la disolución de calizas presentes en las rocas sedimentarias, elevando las concentraciones y haciéndolas mayores que en el resto del Macizo.

El tercer foco de alta concentración se encuentra en puntos tomados en la zona de falla de Bucaramanga; los altos valores pueden estar asociados a aporte de flujos de larga distancia que contienen alta concentración de bicarbonatos. De ser así, el origen de dichos flujos apunta a ser la zona sedimentaria de la parte alta del Macizo de Santander.

Existe una zona que presenta valores medios de bicarbonatos que permiten observar una relación entre la zona de alta concentración en la parte alta del Macizo y los puntos en la zona de falla de Bucaramanga, evidenciando una posible conexión entre estas dos zonas.

Se pudo identificar fallas geológicas (falla Zapamanga y La Colmillona) que conectan directamente la zona de la cuenca alta del río Tona con la zona de la falla de Bucaramanga donde están ubicados los pozos de los que se obtuvieron las muestras de iones. Este flujo de larga distancia se ajusta a la hipótesis de transporte de agua a través de canales preferenciales-fallas geológicas. En una vista tridimensional de la zona de estudio (ver figura 26) se puede observar la geomorfología y los rasgos estructurales que evidencian lo anterior.

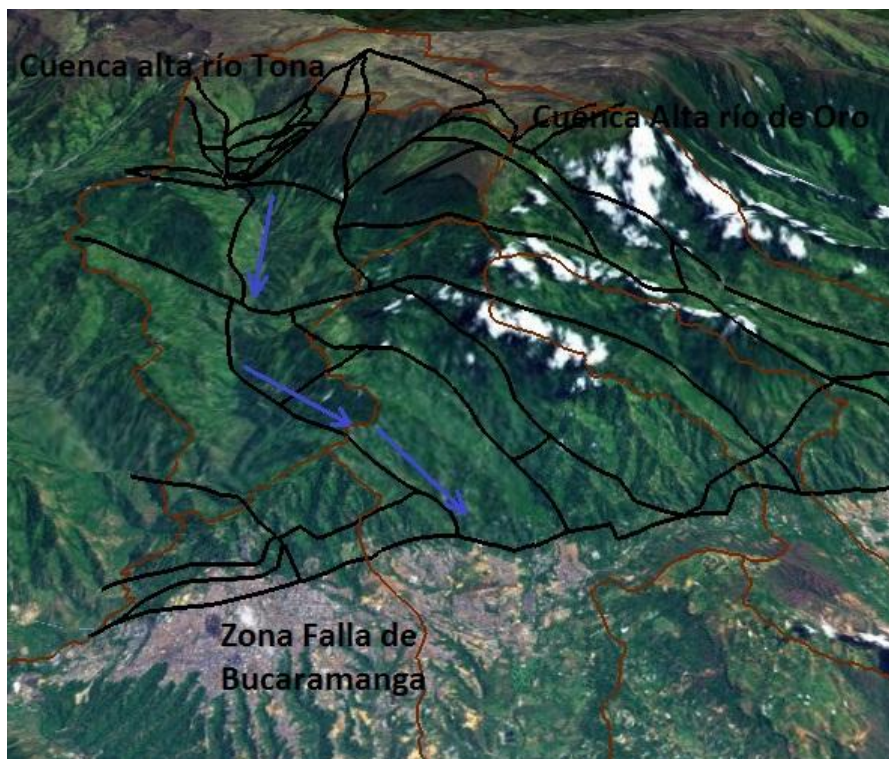


Figura 26 Vista 3D zona de estudio. Autor

Se encontraron valores extremos de sulfatos en la cuenca alta del río Tona en formaciones sedimentarias con presencia de pirita y yeso, y en los pozos de Pan de Azúcar en la zona de falla en rocas metamórficas-ígneas meteorizadas y fracturadas. En la zona de falla no existe correlación con la mineralogía de las rocas que pueda aportar ión sulfato. Se propone, como una explicación preliminar a este fenómeno, un flujo de larga distancia que conecta las formaciones sedimentarias con la zona de falla. Flujo similar al identificado con las concentraciones de bicarbonatos. La procedencia y transporte de sulfatos en las aguas subterráneas de la zona de estudio deben ser objeto de futuras investigaciones.

Desde el punto de vista calidad del agua para potabilización, las aguas en general son aptas para potabilización y se considera que el efecto antrópico en la zona no es representativo, ya que no se presentan altas concentraciones de iones nitrato, cloruro y fosfatos. Excepto en la zona de descarga en la escarpa occidental de la formación Bucaramanga, donde las altas concentraciones de cloruro y la clasificación clorurada

sódica indican afectación antrópica, presumiblemente de las fugas del sistema de alcantarillado sanitario. En la misma zona de descarga, se evidencia un retroceso en la evolución del agua subterránea, que puede ser resultado de una mezcla de aguas subterráneas o de disolución por efecto de las fugas en el sistema de acueducto, que pueden llegar a aportar hasta 470 mm anuales, asumiendo pérdidas del 20 % del total del agua abastecida en la zona. La caracterización de la calidad y el efecto antrópico sobre las aguas subterráneas deben ser estudiados con más detalle en futuras investigaciones

3.2.2. Isótopos estables del agua

El comportamiento isotópico de las lluvias y el agua subterránea en la zona de estudio fue caracterizado en el artículo de Gómez, et al (previsto para el 2013), siendo la base del presente aparte. En adelante, todos los resultados fueron tomados del trabajo mencionado.

Se cuenta con información de isótopos (deuterio y oxígeno 18) desde el año 2002, de aguas lluvias, corrientes superficiales en época de verano y aguas subterráneas.

La recta meteórica de la zona de estudio se ajusta a la recta $\delta^2H = 8,3 \delta^{18}O + 12.4$ (ver figura 27), presentando un ligero exceso de deuterio mayor, comparado con la recta meteórica mundial (Craig, 1961) que puede significar una recirculación de la humedad.

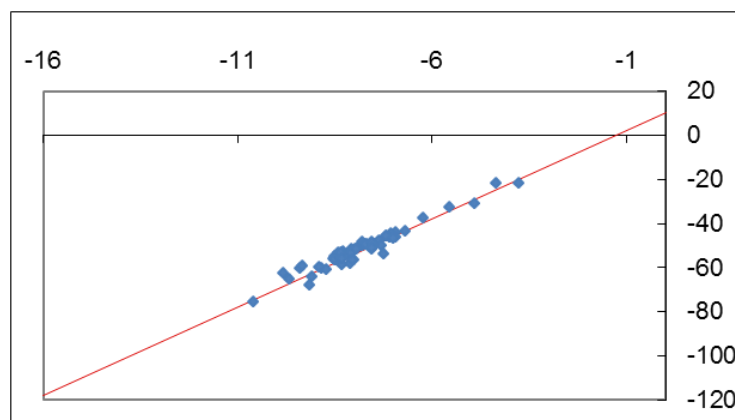


Figura 27 Recta meteórica local zona de estudio, muestras 2002 – 2004. Gómez, et al, previsto 2013.

Se identificó el efecto orográfico de ^{18}O en las lluvias y manantiales con aguas meteóricas de la zona de estudio (ver figura 28), encontrando un gradiente aproximado de 0.16 ‰ por cada 100 m (Gómez, S, et al, previsto 2013), acorde con gradientes obtenidos en otros trabajos.

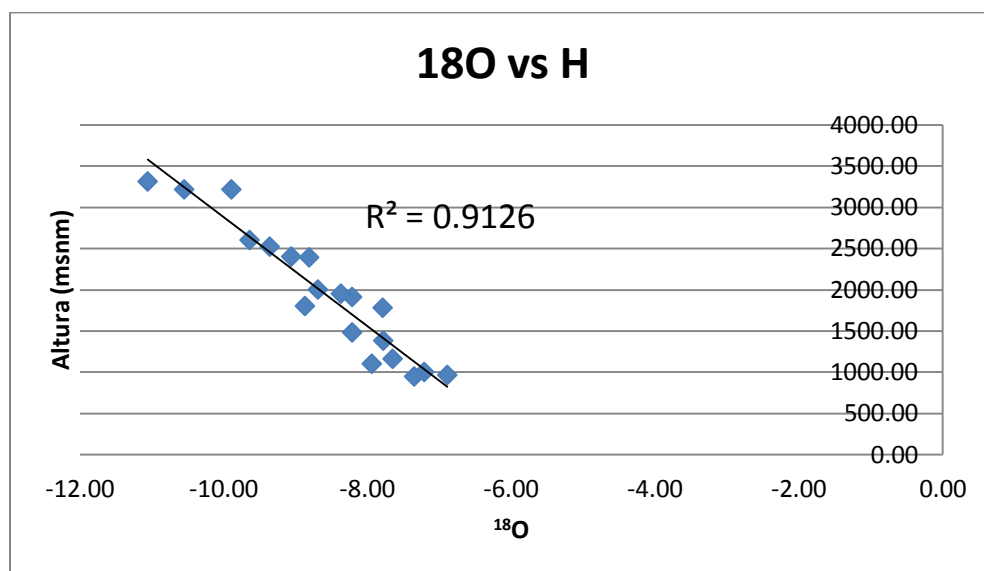


Figura 28 Efecto orográfico de ^{18}O en lluvias y manantiales (2002 – 2006).
Gómez, et al, previsto 2013.

En la figura 29 se presentan los resultados de desviaciones isotópicas de ^{18}O contra elevación, en puntos de agua subterránea del Macizo de Santander, pozos en la falla de Bucaramanga y corrientes superficiales en época de verano en el Macizo de Santander. También se presentan los valores de lluvias utilizados para estimar el efecto orográfico.

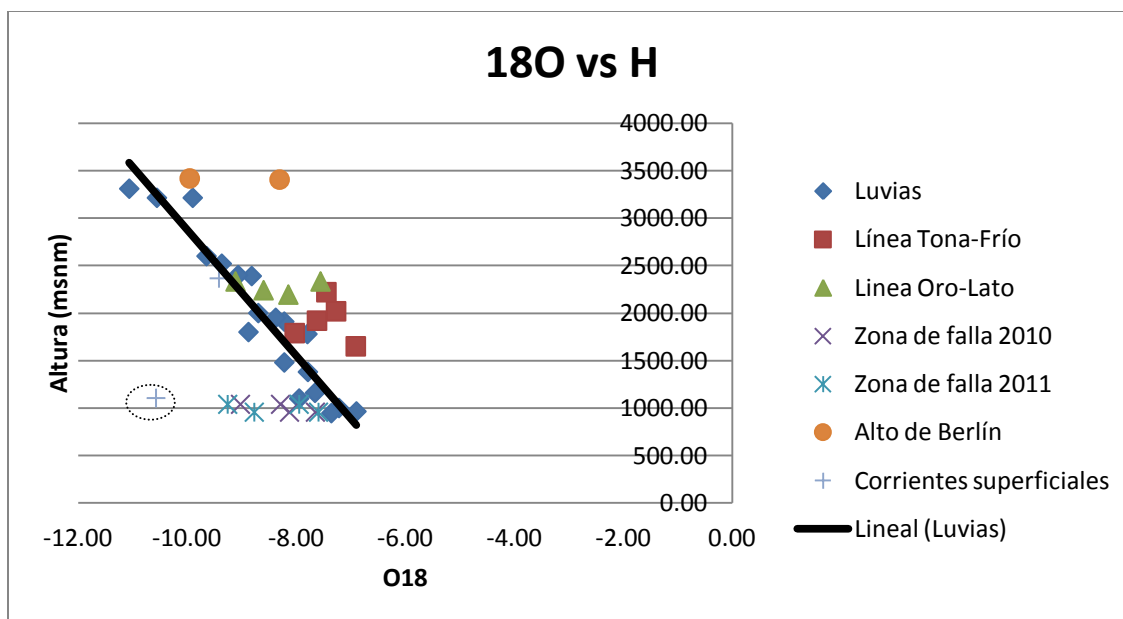


Figura 29 Resultados de Oxígeno 18 en zona de falla y Macizo de Santander, muestreo 2010, contra efecto orográfico. Gómez, et al, previsto 2013.

Las aguas de la zona de falla de Bucaramanga muestran que su zona de recarga está por encima de los 1 300 m s. n. m. En los pozos construidos en roca ígnea-metamórfica meteorizada fracturada (Pan de Azúcar), la perforación superficial (20 m de profundidad) proviene de alturas entre 1 500 m s. n. m. y 1 800 m s. n. m., la perforación profunda (80 metros de profundidad, impermeabilizado hasta 50 m) proviene de alturas cercanas a los 2 500 m s. n. m. En los pozos construidos en la formación aluvial Bucaramanga, la perforación superficial (24 m de profundidad) proviene de aguas recargadas a los 1 400 m s. n. m., el pozo profundo (51 m de profundidad) proviene de alturas entre 1 600 m s. n. m. y 2 000 m s. n. m. En cada caso se pudieron diferenciar los dos niveles acuíferos, mostrando que los piezómetros superficiales tienen zonas de recarga a menor altura que los piezómetros profundos.

Los puntos relacionados con la hipótesis de flujo en el parteaguas Tona-Frío que se presentan con cuadros rojos, muestran un comportamiento atípico a la recta orográfica de la zona de estudio. Este comportamiento puede ser explicado de manera somera con una hipótesis de flujos de agua de corto tiempo de residencia, por lo que se muestran valores tan alejados de los promedios de isótopos de lluvias. Este fenómeno

debe ser estudiado en futuras investigaciones, realizando campañas de muestreo en diferentes épocas de año. Por otra parte, los valores de desviaciones isotópicas no muestran claramente que las aguas tienen una misma procedencia sumado a que se cuenta con muestras puntuales, haciendo inviable la validación de la línea de flujo.

En la hipótesis de flujo en el parteaguas del río Oro-Lato se presenta una situación similar a la antes mencionada, siendo requerido un estudio más detallado. En este caso, la dispersión de los datos de desviaciones isotópicas hace aún más difícil validar la hipótesis.

En el punto El Conquistador sobre la corriente del río de Oro a los 1 100 m s. n. m. se encuentra el agua más empobrecida, teóricamente proviene de alturas cerca de los 3 500 m s. n. m. encontradas en el alto de Berlín. Estos resultados dan a entender posibles aportes subterráneos de larga distancia en la cuenca alta del río de Oro. Esta hipótesis deberá ser validada con la realización de nuevos muestreos isotópicos.

3.3. Modelo hidrogeológico validado

A partir del modelo conceptual propuesto y de la aplicación de las técnicas de validación, se propone un modelo hidrogeológico conceptual validado.

Como se pudo identificar, los puntos de nacimientos de agua en el Macizo de Santander están asociados a zonas de parteaguas y a fallas geológicas. Cada una de estas zonas representa un tipo de flujo diferente, que hace parte de la dinámica del agua subterránea en el Macizo.

El flujo a lo largo de zonas de parteaguas se da en espesores meteorizados y fracturados que pueden llegar en algunos casos a profundidades de 40 m o más, y que se hacen menos espesos alejándose de la cuchilla, debido a las altas pendientes que favorecen el proceso de transporte de materiales producto de la meteorización. Este flujo está controlado por la geomorfología y representa líneas de flujo de corta a

mediana distancia evidenciado por aguas con poca evolución y que en general se clasifican como bicarbonatadas cálcicas.

El flujo de larga distancia a través de fallas geológicas se da a través de franjas donde la roca está muy triturada y disgregada, características que le otorgan muy buenas capacidades hidráulicas y permiten el transporte de agua subterránea tanto longitudinal como verticalmente. Se encontraron aguas más evolucionadas a lo largo de las fallas la Colmillona y Zapamanga, que están uniendo la zona sedimentaria de la parte alta de la cuenca del río Tona con puntos asociados a la zona de falla de Bucaramanga, donde también se encuentran aguas evolucionadas. El ión bicarbonato fue pieza clave en la caracterización de este flujo, debido a la identificación de focos de altas concentraciones en las formaciones sedimentarias con presencia de calizas y en la zona de falla de Bucaramanga. Cabe anotar que las concentraciones de bicarbonatos son más altas que las encontradas en la zona de falla de Bucaramanga y a lo largo de las fallas la Colmillona y Zapamanga, situación que evidencia la conexión que hay entre aguas meteóricas fluyendo a través de zonas meteorizadas y fracturadas con el flujo de larga distancia a lo largo de estas fallas.

Se encontró una posible conexión entre un punto el Conquistador en el río de Oro, con aguas del Alto de Berlín a partir de resultados de isótopos estables, validando observaciones que se habían encontrado en otros estudios. De esta manera se demuestra que la cuenca hidrográfica no concuerda con la cuenca hidrogeológica, ya que la zona del Alto de Berlín está fuera de la cuenca hidrográfica del río Lebríja. Otra posible conexión puede ser con la cuenca del río Suratá, siendo este caso muy relevante porque en esta zona se presentan actividades intensivas de minería que podrían afectar la calidad y cantidad del agua subterránea en la zona de estudio si estas conexiones se dieran.

La caracterización de las fallas geológicas se tiene como grandes bloques de roca fracturada y diaclasada que están separados por zonas con roca altamente triturada y disgregada de muy buenas características hidráulicas que almacenan y transportan el

agua. Para el caso de la falla de Bucaramanga, se tiene que recibe aportes de las fallas geológicas con dirección E-W asociadas a ella. Aún no se cuenta con una caracterización del flujo en la falla de Bucaramanga, donde sólo están en funcionamiento cuatro piezómetros y un pozo profundo.

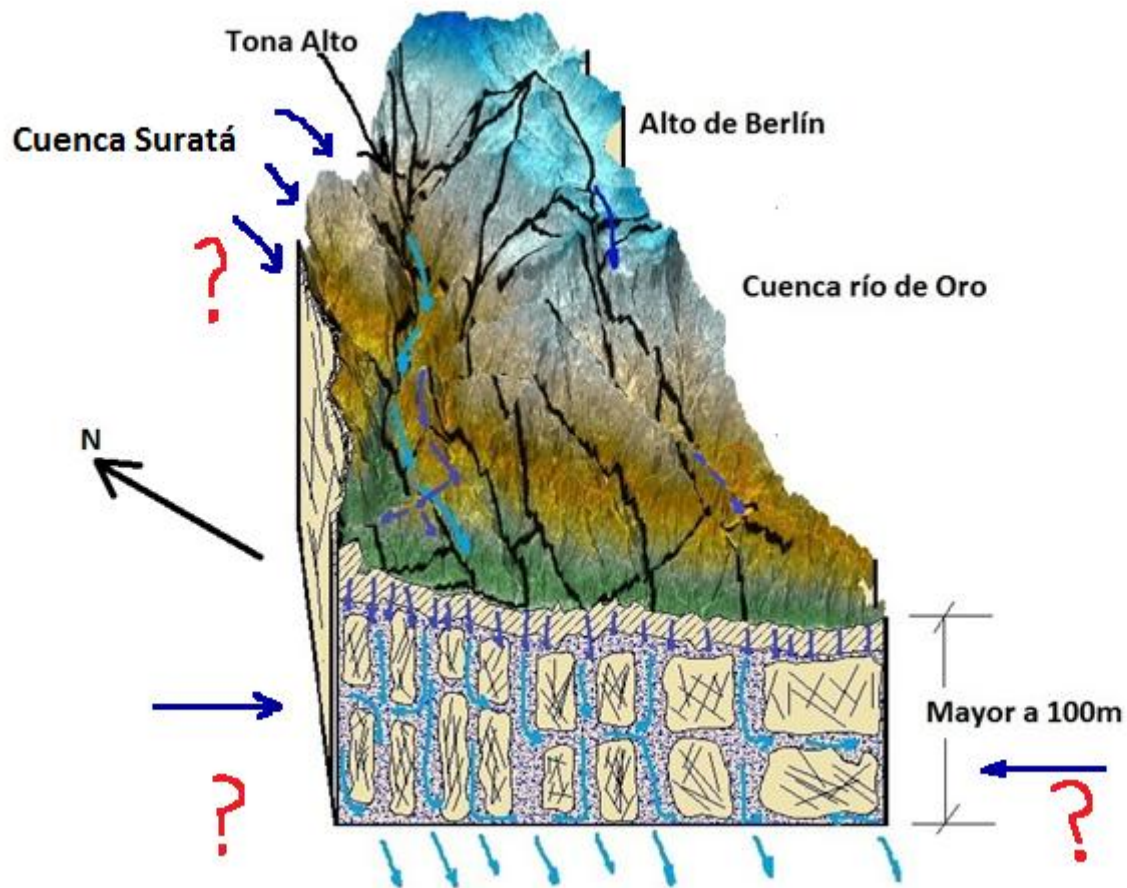


Figura 30 Bloque diagrama esquema de flujo validado en la CSRL. Autor

4. EVALUACIÓN DE LA RECARGA

La recarga de acuíferos es una componente fundamental en la formulación de un modelo hidrogeológico conceptual, que muestra el aporte del exterior al agua subterránea. Los aportes provienen en mayor proporción de precipitaciones y en alguna medida de acuíferos fuera de la unidad de estudio si existe una conexión subterránea.

En el presente capítulo se muestra una evaluación de la recarga de acuíferos aplicando un modelo distribuido de producción de escurrimiento TETIS, que fue escogido, entre otras razones, por la posibilidad de hacer una estimación de la recarga por precipitación y por aportes subterráneos.

4.1. Revisión evaluaciones de recarga

En la zona de estudio se han llevado a cabo evaluaciones de la recarga de los sistemas acuíferos que se encuentran consignadas en los informes de investigación COLCIENCIAS (2003) e INGEOMINAS-UIS (2007). Se ha utilizado una amplia gama de metodologías como balance hídrico a largo y corto plazo, curvas de recesión y variación del nivel piezométrico. La aplicación de cada una de ellas se realizó en diferentes áreas de trabajo y diferentes escalas de tiempo, dependiendo de la información disponible.

En COLCIENCIAS (2003) aplicando el método de curva de agotamiento en la zona montañosa se encontró una recarga de 426 mm/año (35 % de la precipitación en la cuenca), entretanto aplicando balance de corto plazo en una cuenca montañosa en la parte alta del río Frío con un área de 45 Km² se encontró una recarga de 287 mm/año (24 % de la precipitación total en la cuenca), los resultados tan dispares obtenidos para estas dos metodologías en zonas aparentemente similares no da lugar a considerarlos representativos de la zona montañosa. En la zona aluvial se aplicó la metodología de

fluctuación de niveles piezométricos y se obtuvo un valor de recarga de 218 mm/año (18 % de la precipitación total en la cuenca).

La metodología de balance de cloruros aplicada en la CSRL (Barrera, B, 2006) utilizó información de concentraciones de ión cloruro en el periodo 2005-2006 de cinco (5) estaciones de precipitación y una de agua subterránea, en esta metodología se asume que el caudal total del río es el resultado de la adición de la componente del flujo base y de la componente del escurrimiento superficial. La concentración de cloruros del flujo base se estimó realizando análisis de agua en un piezómetro, encontrando valores muy bajos. La concentración representativa del escurrimiento directo se estimó a partir de análisis de cloruros en el agua lluvia, para lo que se utilizaron cinco estaciones. El rango de la recarga de acuíferos obtenido utilizando todos los valores de ión cloruro fue 320-360 mm/año, y descartando valores altos obtuvieron el rango 210-230 mm/año.

El balance hídrico a largo plazo tiene una incertidumbre que está asociada con la información base que se utiliza para estimar las componentes del ciclo hidrológico, siendo muy sensible al cálculo de la evapotranspiración y la esorrentía, que requiere aplicar separación de flujo base. Este método se aplicó en toda la extensión de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL) encontrando un valor de recarga potencial de 192 mm/año (16% de la precipitación total de la cuenca), en esta ocasión se aplicaron las metodologías Penman-Monteith junto con Budyko utilizando ocho (8) estaciones climatológicas para la estimación de la evapotranspiración real en escala mensual. También se aplicó una separación de flujo base que arrojó un valor del 70 %, valor que ha sido obtenido en otros trabajos posteriores (Gómez, S y Guzmán, J, 2011), razón por la que se considera confiable. Según el error asociado al balance, la recarga potencial podría llegar a tomar un valor de 300 mm/año. Se debe tener en cuenta que la aplicación de un balance hídrico de largo plazo da una idea de la cantidad de agua disponible para ser infiltrada, sin tener en cuenta las entradas desde otras cuencas y la cantidad de agua almacenada en la zona no saturada.

A partir de la revisión de los resultados de recarga de acuíferos, la mayoría de trabajos coinciden en un rango entre 200 mm/año a 360 mm/año, que representa entre el 16 % y el 30 % de la precipitación media multianual representativa de la cuenca de estudio estimada en 1 206 mm/año promedio anual distribuido (Arenas, J y Ruiz, J, 2005). Por otro lado, dentro de la cuenca existen subcuencas que podrían presentar mayor o menos valor de recarga.

4.2. Evaluación de recarga

La presente evaluación de la recarga está apoyada en el modelo conceptual de flujo propuesto en esta investigación, teniendo en cuenta conceptos como el flujo de larga distancia por fallas geológicas y la interacción con otras cuencas. Se utilizó el modelo hidrológico distribuido TETIS (Francés, et al, 2012) basado en la creación de escorrentía, que representa los almacenamientos en el ciclo hidrológico como tanques interrelacionados con flujos de agua, que dependen de variables físicas y climáticas del sistema. La recarga es el flujo neto de entrada al tanque que simula el almacenamiento subterráneo en la cuenca de estudio.

Para la elección de la zona de trabajo para aplicar el método TETIS se contaba con información de dos estaciones de caudales que están ubicadas sobre el río de Oro (Puente Nariño), 500 m aguas arriba del punto Café Madrid y río Frío (Florida) antes de llegar a la falla de Bucaramanga (ver figura 31), la información se encuentra en escala temporal diaria, con información que va desde 1990 hasta el 2011 para el río Frío y de 1982 hasta 2004 para el río de Oro.

La cuenca aferente a la estación Puente Nariño comprende casi la totalidad de la cuenca del río de Oro, en donde se encuentra gran parte del Macizo de Santander y la zona aluvial. Para la estación Florida, en el río Frío en el Macizo de Santander, la cuenca aferente presenta un relieve montañoso.

El modelo conceptual de flujo muestra que la recarga de acuíferos se presenta en el macizo de Santander, donde el aporte subterráneo es el más alto en toda la cuenca de estudio.

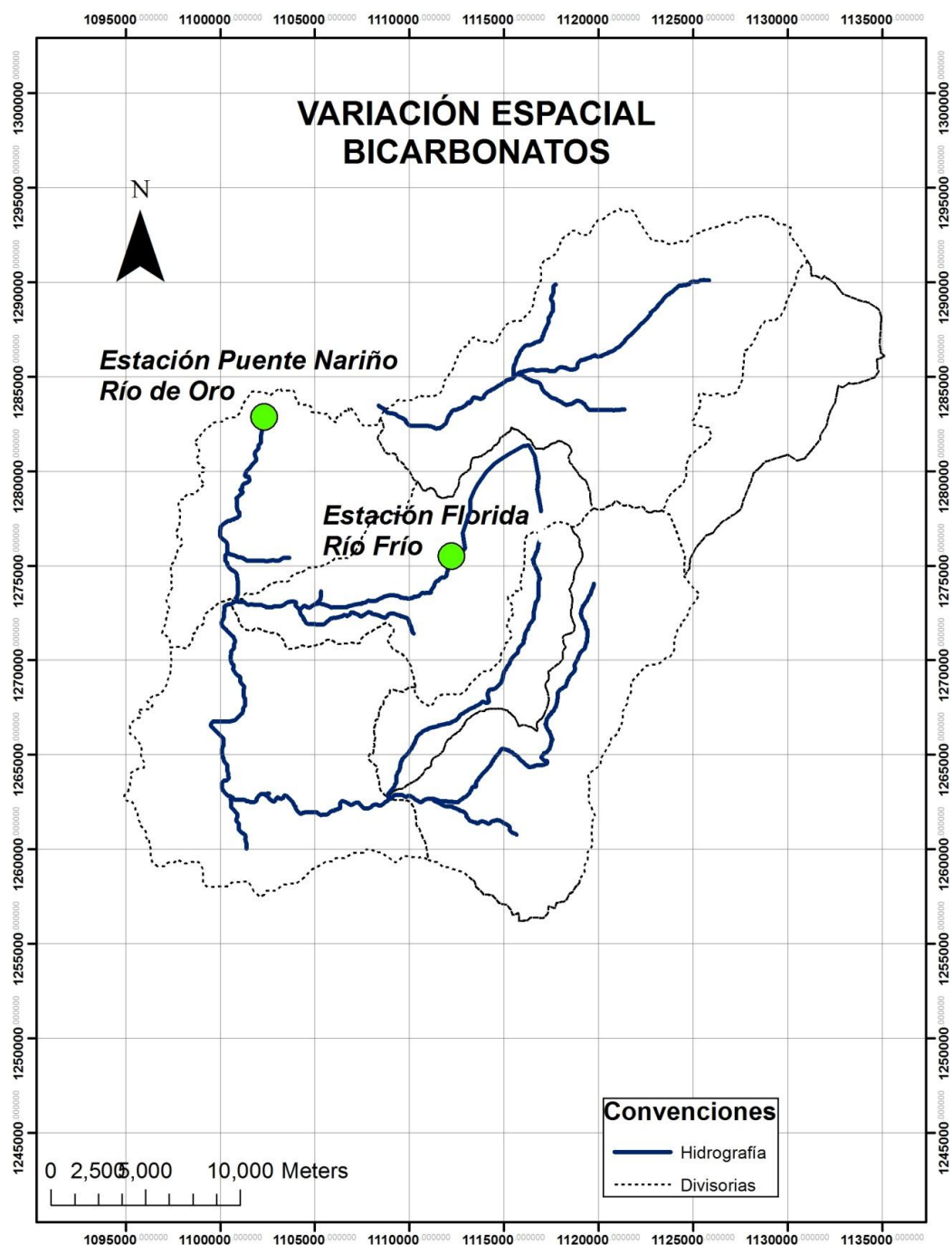


Figura 31 Ubicación estaciones de caudal en el río Frío operado por amb y río de Oro operado por IDEAM. Autor

Por otro lado, para la estación en el río de Oro los efectos de los flujo identificados en el Macizo de Santander no serán tan marcados y se presenta agregado a otros efectos, como son el flujo de agua subterránea a lo largo del sistema de acuíferos aluviales en la formación Bucaramanga, la afectación antrópica en el régimen de caudales provocada por la extracción, trasvase y pérdidas de agua manejada por los sistemas de acueducto y alcantarillado. Para poder llevar a cabo este modelo se realizó una aproximación gruesa de la afectación antrópica que resultó en un valor de $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ en el punto Puente Nariño, resultado del trasvase de aguas provenientes del río Surata y Tona, y de las pérdidas ocasionadas por el aprovechamiento de las aguas del río Frío y río Oro en la estación El Conquistador (INGEOMINAS-UIS, 2007 y amb, 2011).

Para el caso del río Frío se consideró nulo el efecto antrópico debido a que no se presentan grandes acueductos ni hay registro de sistemas extensos de regadíos ó algún otro sistema que pueda generar un aporte importante.

Los mapas utilizados para la ejecución del modelo van desde el MDE, que es utilizado para la creación de mapas de pendientes, de direcciones de drenaje y áreas acumuladas, el mapa de vegetación (Pérez, D, 2010) para estimar la variación temporal de la evapotranspiración, el mapa de almacenamiento estático que incluye la capacidad de almacenamiento capilar del suelo y las abstracciones iniciales, los mapas de conductividades hidráulicas del suelo y substrato litológico, los mapas de conductividad hidráulica horizontal del suelo y substrato litológico, el mapa de percolación profunda y el mapa de velocidad de flujo en laderas (ver mapas en anexo 2). En la construcción de los mapas de características físicas del medio se aplicaron metodologías expuestas por Puricelli (2003) quién propone relaciones entre las propiedades hidráulicas de rocas y suelos, y las condiciones de textura de los suelos, tipo de roca, condiciones de fracturamiento y meteorización, todas estas estimaciones se apoyaron en el modelo conceptual y especialmente en el marco de referencia que da las características necesarias para construir estos mapas.

La información climática requerida es la precipitación, evapotranspiración y caudales. La precipitación, como entrada al sistema, requiere estaciones que se encuentren bien ubicadas en la zona de estudio, para asegurar una buena idealización del comportamiento espacial de esta variable. Para el río frío se utilizaron las estaciones La Mariana, La Galvicia, El Picacho y San Antonio, y para el río de Oro se utilizaron las antes mencionadas junto con las estaciones CDMB, El Rasgón, La Esperanza, La Flora, Granja Piedecuesta, Llano Grande, Aeropuerto Palonegro, Bonanza, Bucaramanga IDEAM, Ceylan, La Floresta, Palogordo, PTAR, Ruitoque y UIS-IDEAM, 19 estaciones en total (ver anexo 2). La evapotranspiración, como se ha dicho antes, representa la salida más importante del sistema hidrológico en la zona de estudio, por lo que se utilizaron cuatro estaciones que cuentan con valores de referencia de evapotranspiración que darán la salida de agua en estado gaseoso del sistema, condicionada por la disponibilidad del agua en la superficie.

La información de caudales medidos se utiliza para comparar los resultados obtenidos en el modelo hidrológico, por lo que deben ser de la mejor calidad posible. Sin embargo los registros del río de Oro son deficientes en calidad y en cantidad, siendo el año 2000 el que presenta mejores datos, con un solo dato faltante y una precipitación total anual de 1.260 mm muy cercana al promedio anual de la cuenca de 1.206mm.

Se ajustó el modelo TETIS en dos puntos de la zona de estudio para el año 2000: primero en el punto de cierre del río de Oro antes de llegar al río Suratá y segundo en el río Frío a la altura de la zona de falla. Para el río Frío los datos se presentan con mejor cantidad, pero su calidad es igualmente dudosa, mostrando en épocas de no lluvia caudales constantes, este comportamiento no es normal en las corrientes superficiales.

Se llevó a cabo la calibración del modelo hidrológico para ambas cuencas teniendo claro que la información de caudales es de muy buena calidad, en el proceso de calibración se usaron como elementos de juicio la revisión de la recarga hecha en anteriores estudios, así como las separaciones de flujo base y los valores esperados de

evapotranspiración. Sin embargo, debía existir un ajuste aceptable entre los caudales simulados y observados, en la figura 32 se presentan las gráficas de resultados obtenidas del modelo, en donde se alcanzan a simular eventos de crecidas y épocas de pocas lluvias, siendo el mayor ajuste en los caudales medios y bajos..

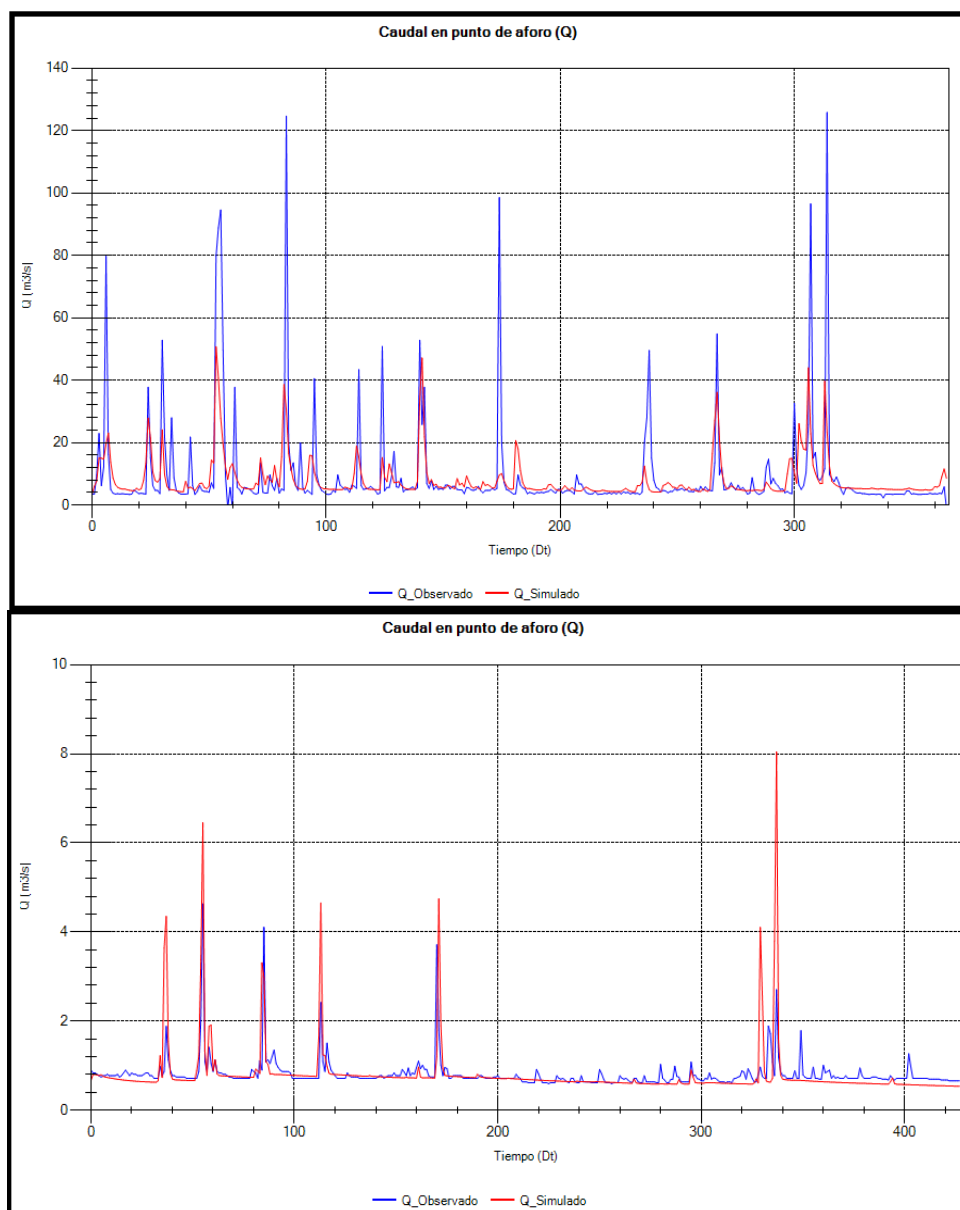


Figura 32 Caudales simulados modelo TETIS. Arriba: río de Oro. Abajo: río Frío.
Autor

En la tabla 2 se presentan los resultados consolidados de algunas componentes para el año 2000 de los principales componentes del ciclo hidrológico en las cuencas del río de Oro y Frío.

Flujo	Río de Oro (mm)	Río Frío (mm)
Precipitación	1250	1483
Evapotranspiración	749	846
Caudal esorrentía directa	177	225
Caudal Base	270	970
Recarga	311	403

Tabla 2 Flujos anuales de algunas componentes año 2000 cuencas río de Oro y río Frío. Autor

Para hacer una revisión de los flujos encontrados con el modelo y los estimados en trabajos anteriores, es necesario calcular las proporciones relativas de cada uno con la precipitación total anual en cada cuenca modelada.

Se nota como en la zona de la montaña las precipitaciones son mayores en el año 2000 y en general todos los años, esta situación beneficia el proceso de recarga de acuíferos que se da en el Macizo de Santander, que alimenta los flujos subterráneos que transportan el agua hasta los sistemas acuíferos en la meseta de Bucaramanga.

Haciendo una revisión de la relación del flujo base con el caudal total de la corriente, el río de Oro presenta una proporción del 60 % y el río frío una proporción del 81 %. Estos resultados se encuentran no muy alejados de la estimación de flujo base del 70 %, aceptada en otros trabajos. La evapotranspiración representa el 60 % de la precipitación en el río de Oro y del 57 % en el río Frío, estos valores son muy cercanos entre sí y están en el mismo rango encontrando en toda la CSRL que presenta un 57 % de pérdidas por evapotranspiración real. La recarga real en el río de Oro para el año 2000 representa el 25 % del total de agua precipitado, por otro lado el río Frío muestra una proporción del 27 %, en ambos casos los valores relativos están muy cerca de los valores encontrados en la revisión de la recarga de acuíferos y además se cumplió con

el criterio del modelo conceptual en el que la recarga de acuíferos se da en el Macizo de Santander, por lo que la proporción allí debe ser mayor y de mayor cantidad de agua que en la totalidad de la zona.

Haciendo una representación mensual de los componentes precipitación, evapotranspiración y recarga de acuíferos (ver figuras 33 y 34), se nota como el régimen de pluviosidad y la oferta de agua condicionan la posibilidad y la cantidad de agua que se recarga en ambos modelos. Se tienen los meses de julio y agosto como los de menor recarga en ambas gráficas. Se observa la bimodalidad en la recarga de acuíferos, mostrando una vez más la gran importancia que tiene el régimen de lluvias en la dinámica del agua subterránea en la zona de trabajo. Los altos valores de precipitación y de recarga en el mes de enero son una situación atípica sucedida en el año 2000, este mes usualmente es de pocas lluvias asociado a la primera época seca del año.

Se encontró que el valor de recarga representativa para el año 2000 para la cuenca del río Frío y generalizada al Macizo de Santander, se encuentra alrededor de 400 mm y el de toda la cuenca de estudio para el mismo año está cerca de 310 mm, valor que está en el rango encontrado en otros trabajos (200 mm/año a 360 mm/año). La confiabilidad de la recarga de acuíferos estimada no es muy alta, debido a la falta de información de caudales de buena calidad y cantidad; por esta razón es necesario aplicar el modelo TETIS en futuras investigaciones en otros puntos de la zona de estudio que cuenten con mejor información de caudales.

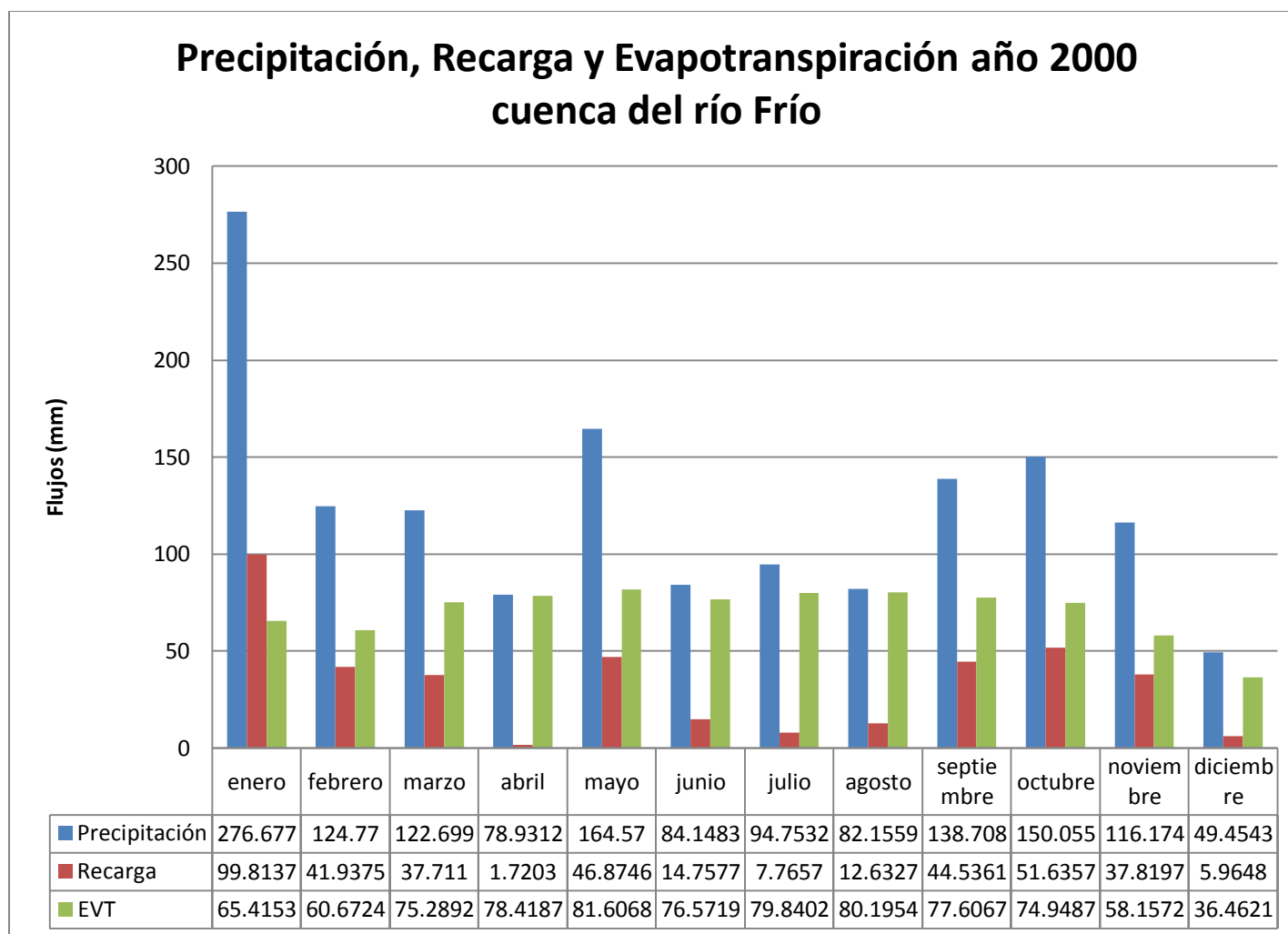


Figura 33 Flujo mensuales de precipitación, recarga y evapotranspiración en la cuenca del río Frío, Año 2000. Autor

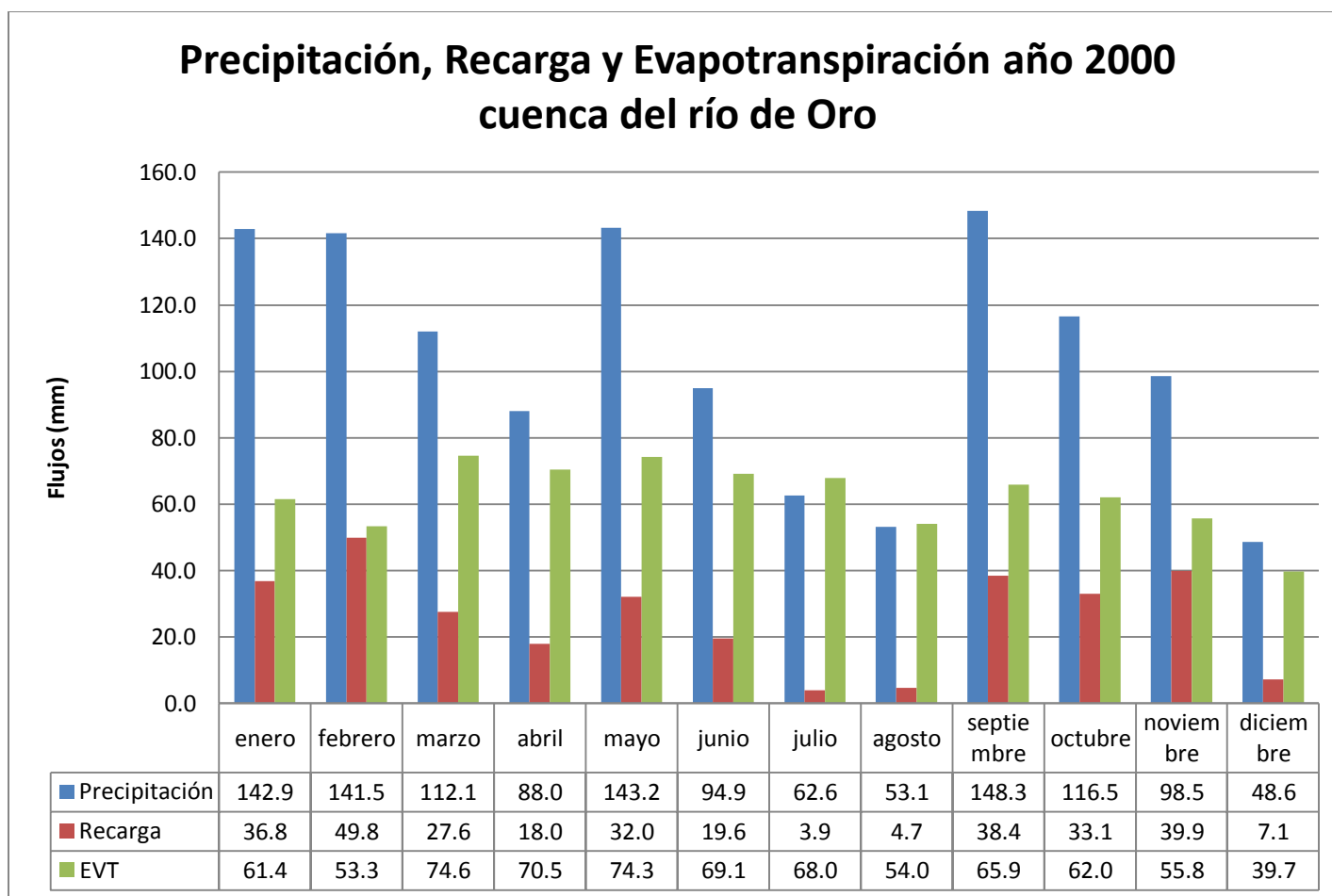


Figura 34 Flujo mensual de precipitación, recarga y evapotranspiración en la cuenca del río de Oro, Año 2000. Autor

5. VULNERABILIDAD, AMENAZA Y PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CSRL, BASADO EN UN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Una vez propuesto y validado el modelo hidrogeológico conceptual de la CSRL, se realizará su primera aplicación. Esta consiste en la revisión de la evaluación de la vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación del agua subterránea en la CSRL. En el presente capítulo se mostrará una conceptualización breve de lo que son estos temas, luego se presentará un resumen del estado actual del tema en la zona de estudio, seguido de el efecto del modelo conceptual en los parámetros que utilizan las metodologías de evaluación de vulnerabilidad y para finalizar los nuevos resultados de vulnerabilidad y peligro.

5.1. Conceptualización

El concepto de vulnerabilidad, de manera general, es una medida de la sensibilidad que tiene todo sistema a recibir un impacto negativo de un estímulo exterior. La amenaza es un estímulo del exterior que puede generar un impacto negativo. El peligro es la interrelación que se da entre la sensibilidad del sistema y el estímulo que está siendo impuesto, definido como la probabilidad de sufrir un impacto negativo. La evaluación de la vulnerabilidad, amenaza y peligro entrega resultados cualitativos representados en cartografía.

Las técnicas de evaluación de vulnerabilidad utilizadas son de índices relativos, que dan peso a variables propias del sistema que afectan el grado de sensibilidad a una amenaza exterior, es decir son metodologías que expresan unos resultados cualitativos. Algunas variables usadas son la profundidad del nivel freático, el tipo de suelo, la topografía, la litología del acuífero, el tipo de acuífero, la recarga a los sistemas acuíferos y la tectónica. Una discusión intensa de los conceptos y metodologías de mapeo de vulnerabilidad se puede encontrar en (Auge, M, 2004 y Rueda, O y Betancur, T, 2006). En general, las técnicas de evaluación de

vulnerabilidad han sido desarrolladas para acuíferos aluviales, distinto al medio que se encuentra en el Macizo de Santander, conformado por rocas duras fracturadas y meteorizadas, que presentan un esquema de flujo y almacenamiento de agua subterránea complejo. Sin embargo, la vulnerabilidad que se intenta obtener representará una primera aproximación cualitativa al problema de contaminación en la zona de estudio, y deberá ser seguido por estudios cuantitativos de transporte de contaminantes.

La amenaza de contaminación en un medio hidrogeológico es representada por una caracterización de la carga contaminante en la zona de estudio, teniendo en cuenta factores como el tipo de contaminante, tiempo de disposición y tipo de disposición. El aporte de la investigación en la caracterización de la carga contaminante no es representativo, por esta razón no se cuenta con elementos de juicio para una revisión de su evaluación.

El peligro a la contaminación del agua subterránea será afectado por los cambios que se den en el ajuste de la vulnerabilidad al modelo conceptual. La metodología de evaluación del peligro que será aplicada es presentada por UIS-CDMB (2010) ajustada de Betancur (2008).

5.2. Estado de la evaluación de vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación del agua subterránea

Como se dijo en el primer capítulo de generalidades, la CSRL está compuesta por dos zonas bien delimitadas: zona aluvial y Macizo de Santander. El modelo conceptual de flujo propuesto en el presente trabajo centra sus principales aportes en el Macizo de Santander, siendo menos representativo en este trabajo el aporte en la zona aluvial. Por esta razón, se realizó la revisión de la vulnerabilidad y el peligro a la contaminación en el Macizo de Santander.

En el Macizo de Santander se aplicó la metodología PATHS, basada en el cálculo de un índice de vulnerabilidad que depende de variables ponderadas elegidas para cada caso.

La metodología PATHS tiene en cuenta la tectónica, asimilándose un poco al problema de estudio. El índice de vulnerabilidad se calcula con seis parámetros: profundidad del agua y precipitaciones (P), litología del acuífero (A), tectónica y pendiente topográfica (T) y resistencia hidráulica del suelo (H y S). El parámetro precipitación representa un gran acierto para la zona de estudio y para cualquier aplicación en general, al ser mucho más sencillo contar con un mapa confiable de espacialización de precipitación multianual que contar con uno de recarga neta. La inclusión del factor tectónica hace de PATHS una metodología más ajustada al Macizo de Santander, aunque su peso no es muy representativo.

La evaluación de la vulnerabilidad en un medio tan heterogéneo y con un esquema de flujo tan particular. PATHS es una metodología aceptable aún cuando la complejidad del sistema hace que esta metodología tampoco se ajuste muy bien al caso específico del Macizo de Santander.

En el informe de investigación UIS-CDMB (2010) se presenta la evaluación de vulnerabilidad a la contaminación con la metodología PATHS, la amenaza por cargas contaminantes y el peligro a la contaminación.

La vulnerabilidad presentó categorías desde baja, moderada, alta a extrema, en la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos.

ÍNDICE PATHS			
	RANGOS DE VULNERABILIDAD	ÁREA Km2	% DEL ÁREA TOTAL
BAJA	< 100	41.87	9.41
MODERADA	100 - 120	9.81	2.20
ALTA	120 - 140	66.74	14.99
EXTREMA	> 140	326.78	73.40
NO DATA	0	0	0
445 Km2			100

Tabla 3 Resultados metodología PATHS. Autor

En cuanto al peligro, se identificaron categorías que van desde un Peligro Extremo hasta un Peligro Bajo. En las zonas donde el peligro es extremo, se presentan actividades potencialmente generadoras de contaminación las cuales muestran Amenaza Alta y además en estos sitios la Vulnerabilidad es Extrema.

Se presentan grandes zonas de Peligro Extremo causado por cultivos agrícolas, que se encuentran en lugares donde las profundidades de los niveles freáticos son menores a los 5 metros y la vulnerabilidad es mayor, como son el altiplano de Berlín y algunas laderas donde se localizan un número importante de manantiales o nacimientos de aguas. Además se logran divisar pequeños pixeles a lo largo y ancho del área de estudio, causados por las actividades puntuales que en su mayoría se deben a viviendas rurales en las cuales se realizan descargas de aguas residuales directamente al terreno; las actividades ganaderas, las granjas avícolas, porcícolas, los puntos de vertimientos de alcantarillados, entre otras actividades de contaminación puntual reflejan este peligro. En la zona montañosa la mayor área (80 a 90 %) corresponde a peligro alto y peligro extremo a la contaminación del agua subterránea.

El peligro moderado (presente en su mayoría en la parte alta de la microcuenca del Río de Oro) se manifiesta en zonas donde la vulnerabilidad es Alta y no se encontraron actividades generadoras de contaminación por lo tanto la Amenaza es baja, sin embargo en ese sector se observan zonas con peligro Alto causados por los cultivos

permanentes de mora, a su vez se existe también la afectación de las descargas de aguas residuales de las viviendas rurales del municipio de Piedecuesta.

El peligro Bajo se manifiesta en zonas donde la Vulnerabilidad es baja, esta área se limita a la franja constituida por la formación geológica Silgará, la cual presenta condiciones de permeabilidad baja y de bajo interés hidrogeológico; sin embargo en esta zona se logran presenciar algunos pequeños pixeles con Peligro Moderado, el cual es generado por las viviendas rurales que presentan descargas de aguas residuales directamente al terreno, provocando una Amenaza alta en estos puntos. El Peligro bajo y moderado en la zona montañosa corresponde a áreas de pequeña extensión.

5.3. Revisión de la evaluación de vulnerabilidad y peligro a la contaminación del agua subterránea

Se realizó una revisión de las suposiciones e hipótesis planteadas para la evaluación de vulnerabilidad con la metodología PATHS, que fue presentada en el informe de investigación UIS-CDMB (2010), encontrando que el mapa de profundidad del nivel freático fue construido a partir de aproximaciones de niveles freáticos de acuerdo a la localización de una línea de manantiales, pero sus resultados constituyen apenas un acercamiento al problema. Actualmente no se cuenta con mediciones de niveles freáticos, no existen pozos ni piezómetros en esta zona.

A partir del esquema de flujo mostrado en el capítulo 2 y validado en el capítulo 3, se puede realizar una aproximación a la profundidad del nivel freático, con profundidades mínimas en las zonas donde se identificaron flujos de corta distancia (divisorias de aguas) y larga distancia (fallas geológicas), y con profundidades mayores en las zonas que no se identificaron flujos subterráneos.

Se plantearon diferentes escenarios hipotéticos de profundidades de agua subterránea, asumiendo para las zonas de parteaguas y fallas geológicas la profundidad del nivel

freático está entre 0 m y 5 m para el primer escenario, entre 5 m y 20 m para el segundo escenario y entre 20 m y 30 m para el tercer escenario. En lo que queda de la zona de estudio, se asume un valor representativo de entre 20 m y 30 m de profundidad del nivel freático para los escenarios uno y dos, y para el tercer escenario se asume una profundidad mayor a 30 m.

Los mapas de profundidad ajustados al esquema de flujo en el Macizo de Santander se presenta en la figura 35 a la 37, se identifican casi la totalidad de los puntos de inventario de manantiales del Macizo dentro de las franjas de menor profundidad.

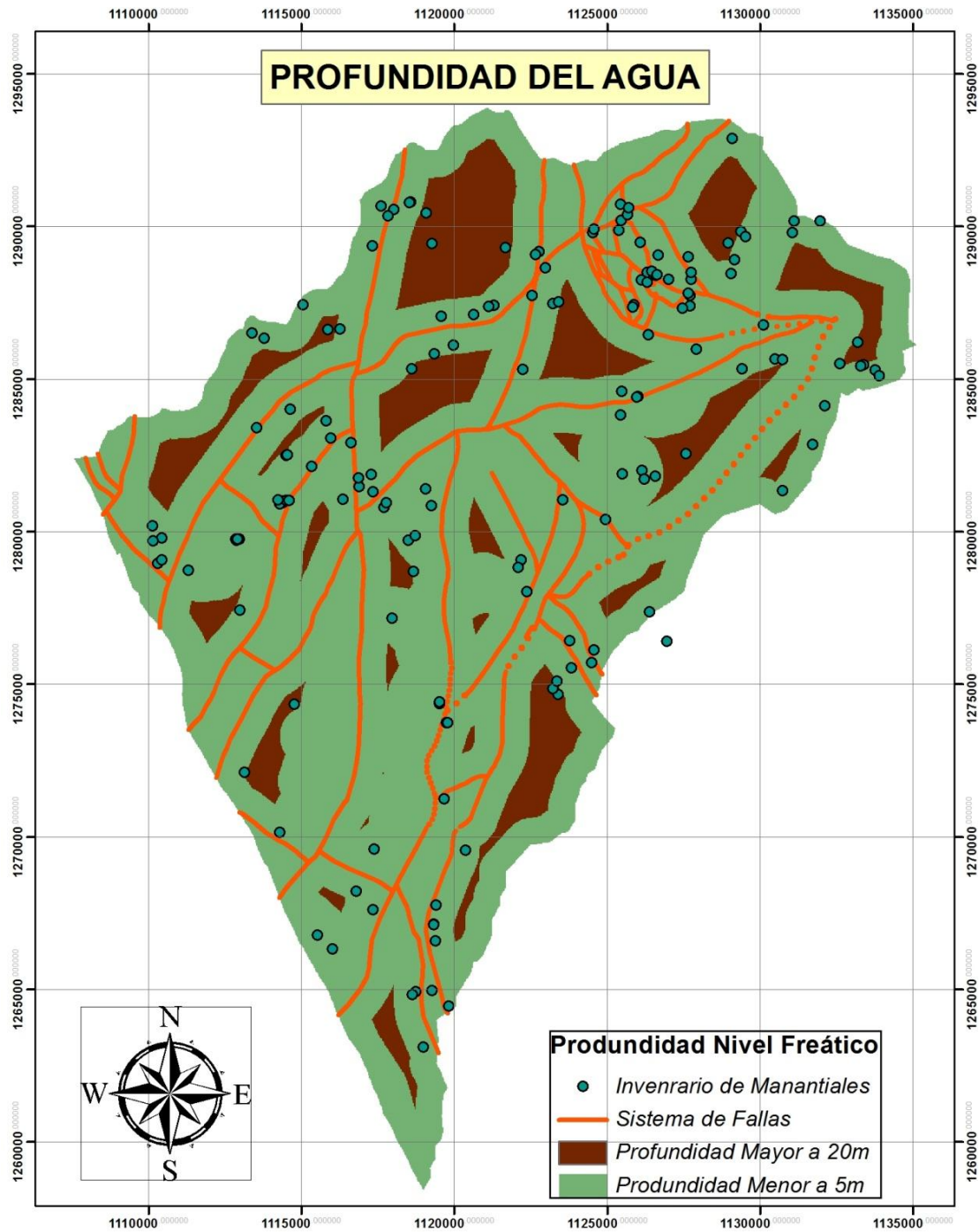


Figura 35 Primer escenario parámetro profundidad del agua subterránea aplicando modelo conceptual. Autor

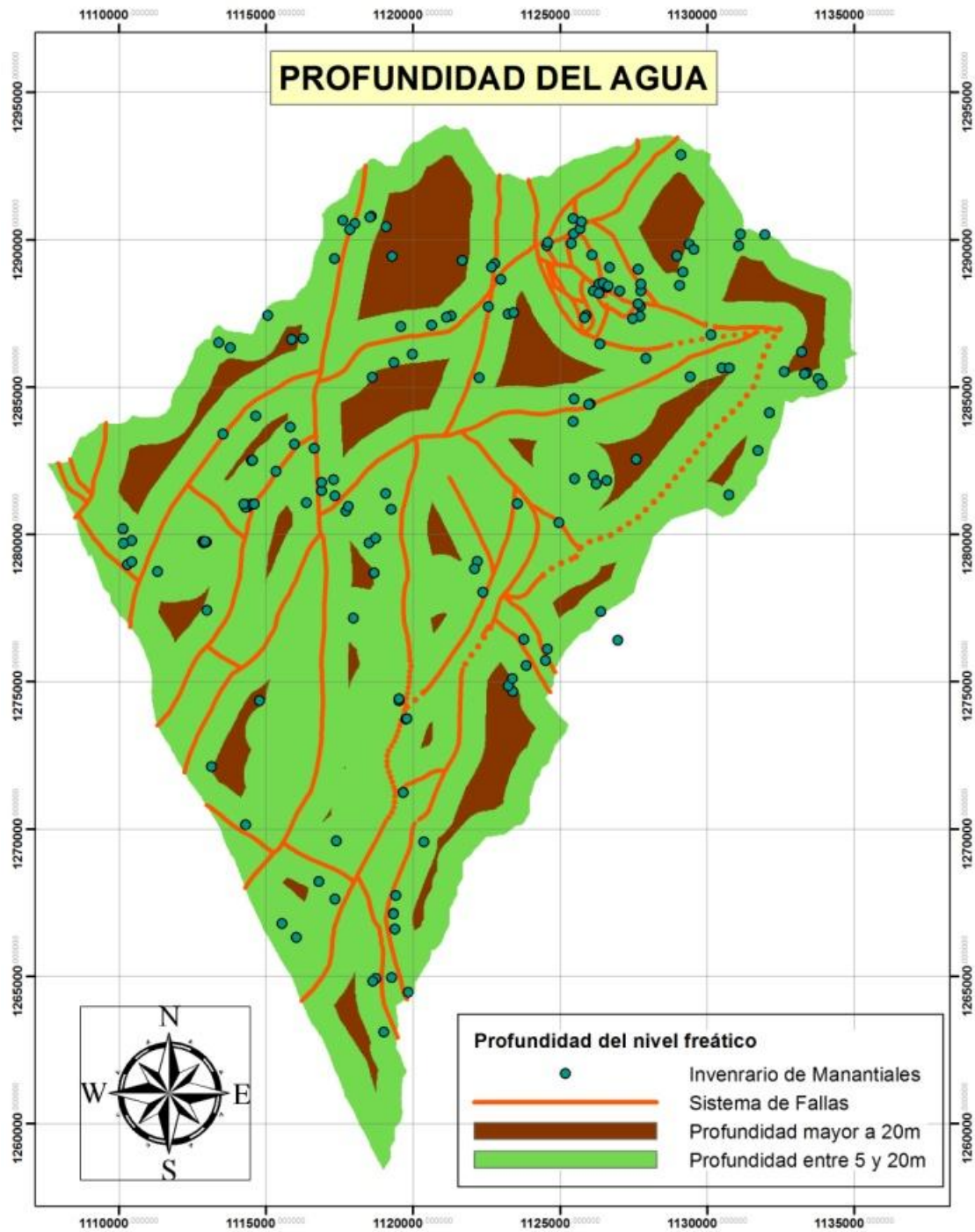


Figura 36 Segundo escenario parámetro profundidad del agua subterránea aplicando modelo conceptual. Autor

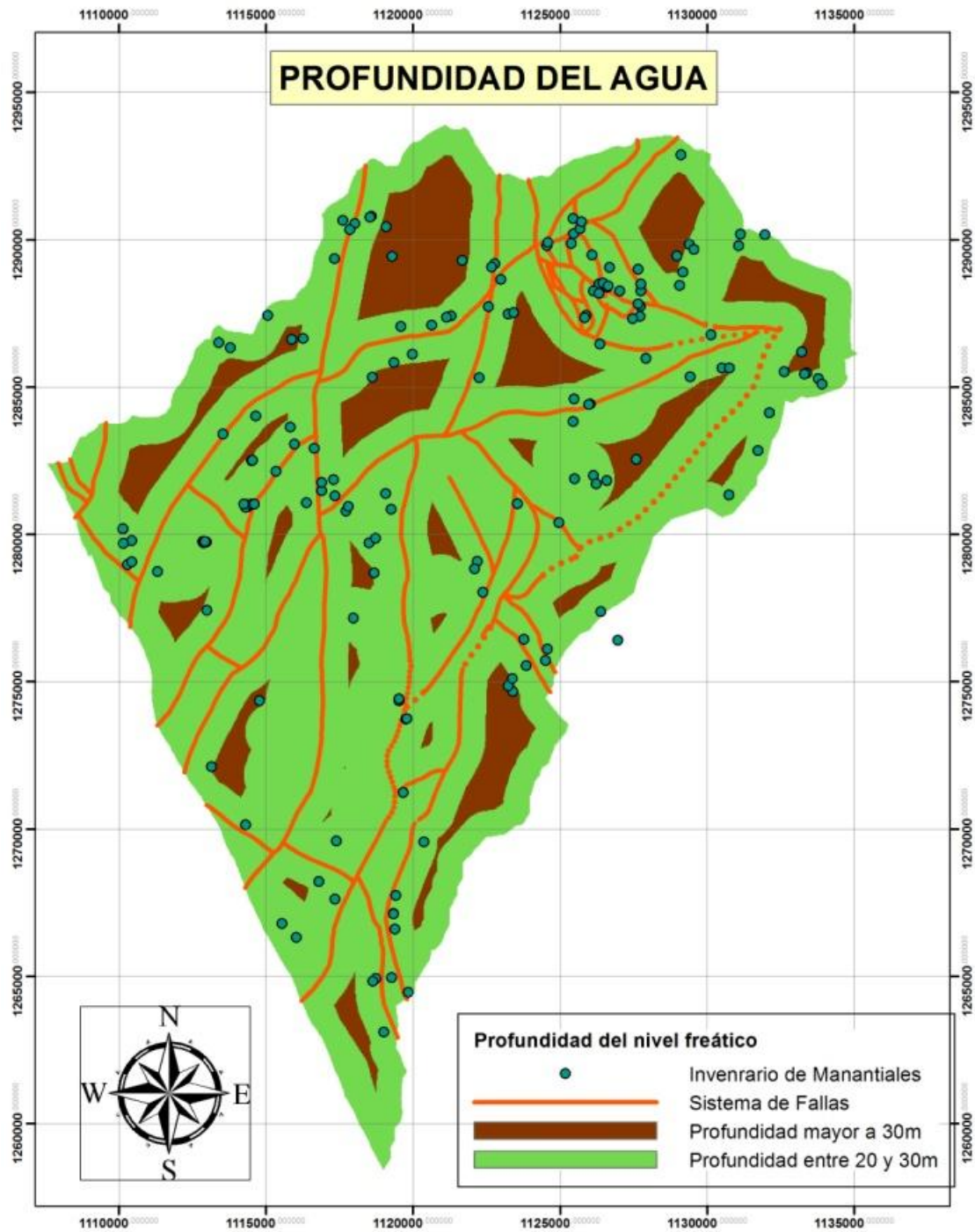


Figura 37 Tercer escenario parámetro profundidad del agua subterránea aplicando modelo conceptual. Autor

Una vez ajustado este parámetro, se realizó la evaluación de vulnerabilidad con la metodología PATHS (ver figura 38 a 40, y tabla 4 y 5) encontrando categorías que van desde vulnerabilidad baja, moderada, alta a extrema.

La nueva evaluación de la vulnerabilidad es menos conservadora, ya que disminuyó en un 24 % la proporción de área con vulnerabilidad extrema. La vulnerabilidad alta aumentó un 28 % con respecto a la última evaluación. La clasificación moderada aumentó un 4 %. La vulnerabilidad baja disminuye un 9 % y está representada sólo por 0.3Km².

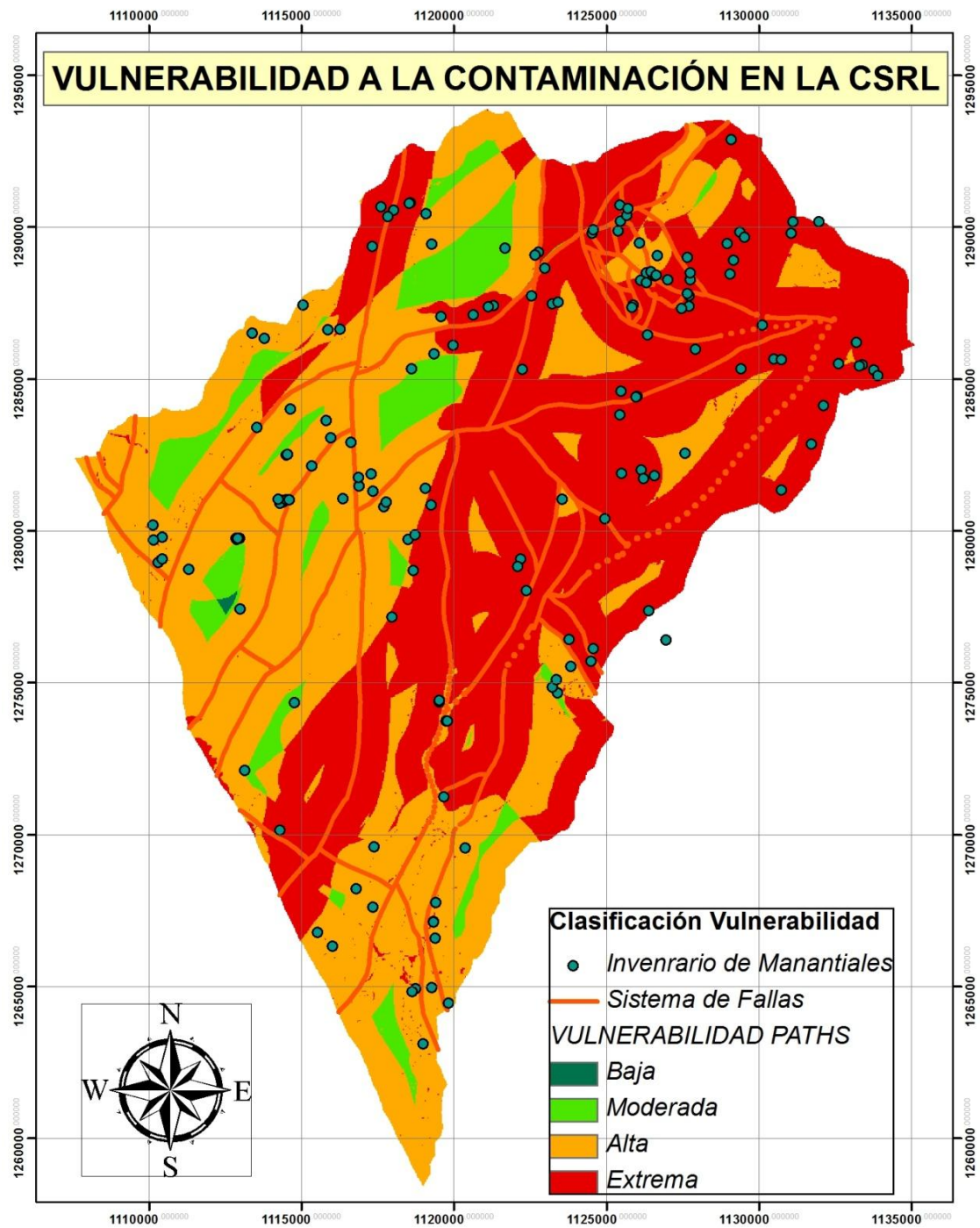


Figura 38 Primer escenario vulnerabilidad a la contaminación en la CSRL, ajustada al modelo conceptual. Autor

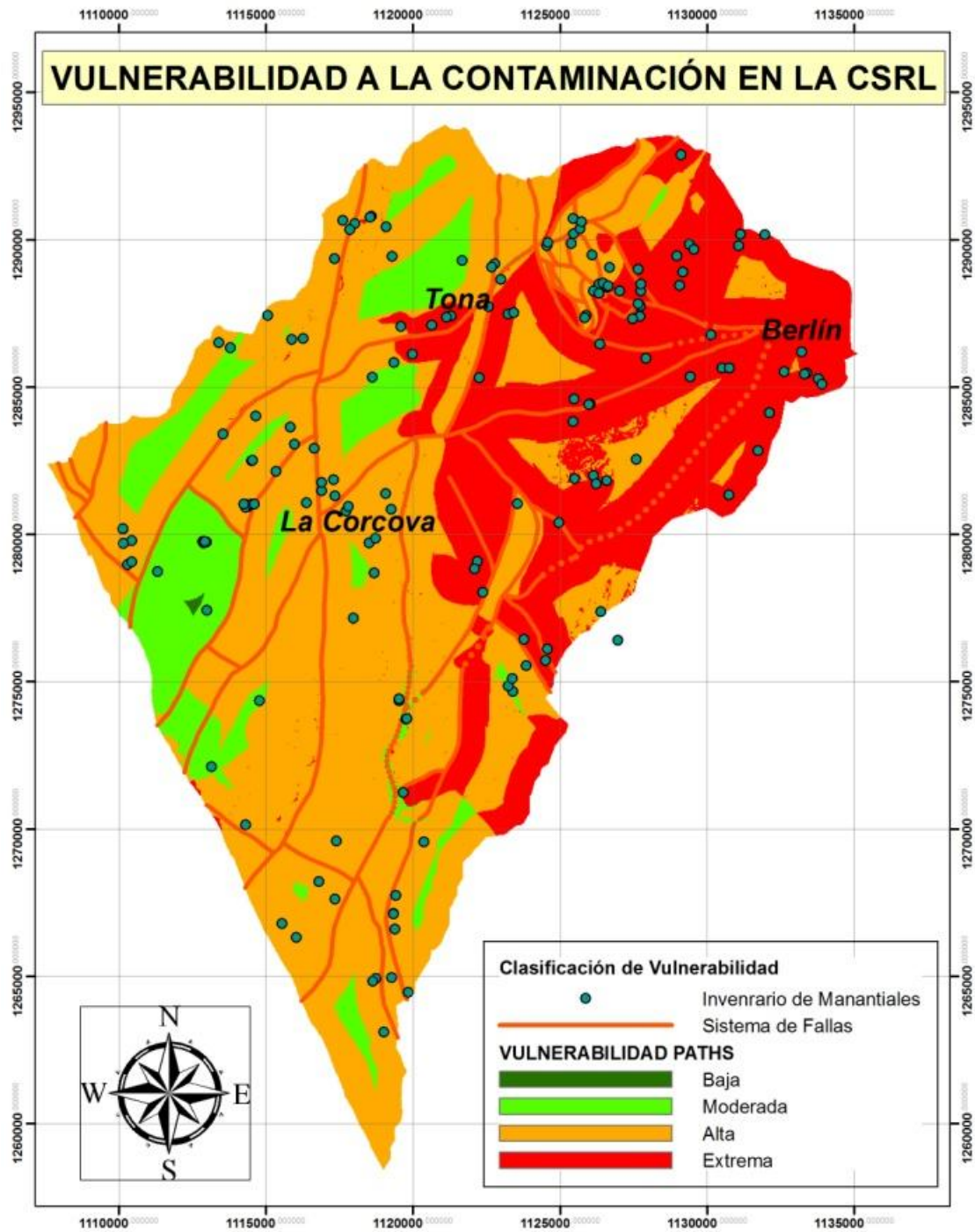


Figura 39 Segundo escenario vulnerabilidad a la contaminación en la CSRL, ajustada al modelo conceptual. Autor

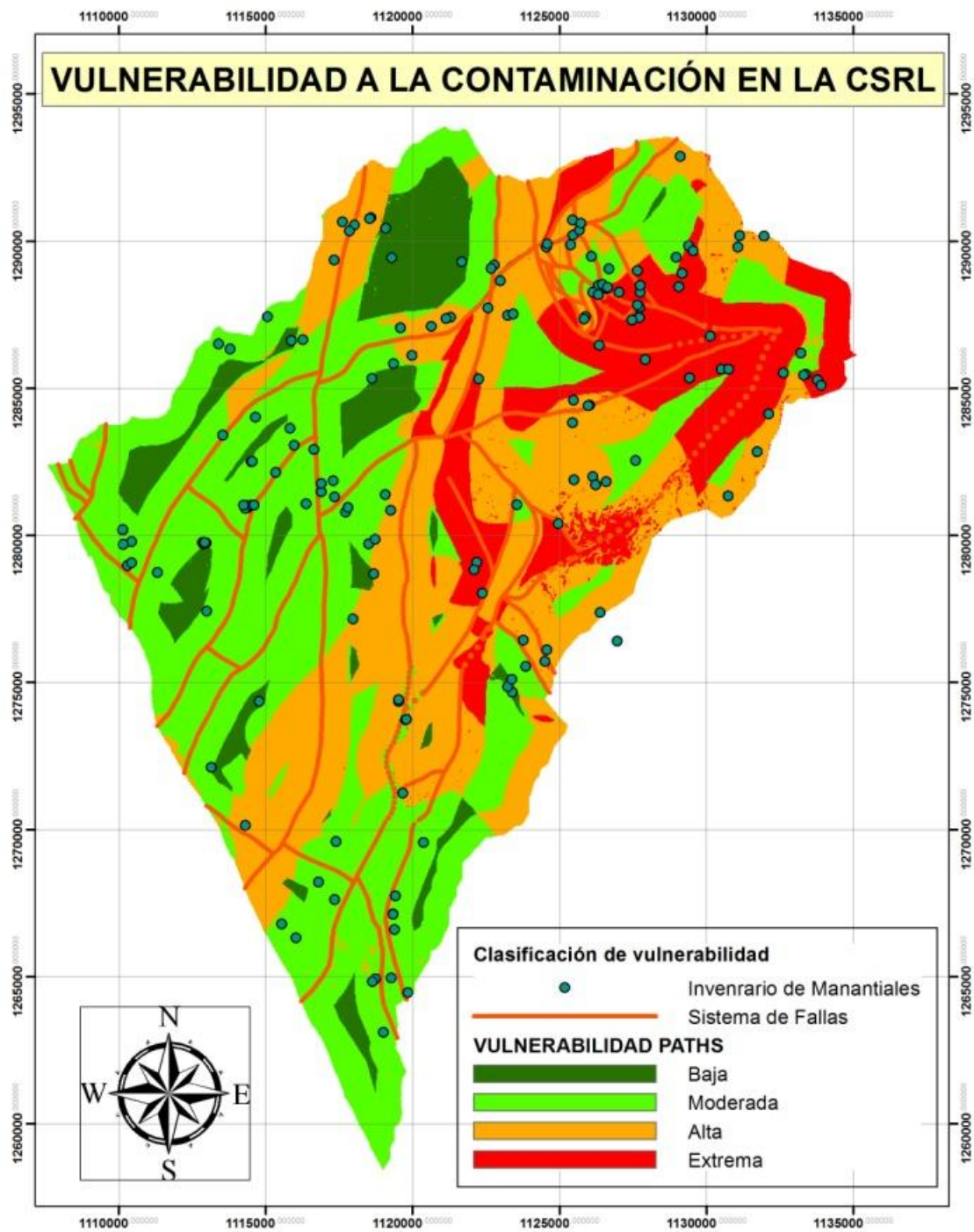


Figura 40 Tercer escenario vulnerabilidad a la contaminación en la CSRL, ajustada al modelo conceptual. Autor

ÍNDICE PATHS				
RANGOS DE VULNERABILIDAD		Escenario		
		1	2	3
		ÁREA Km ²	ÁREA Km ²	ÁREA Km ²
BAJA	< 100	0.3	0.31	36.13
MODERADA	100 - 120	28.7	50.75	194.31
ALTA	120 - 140	195.4	260.76	149.53
EXTREMA	> 140	220.8	133.38	65.23
		445.2 Km ²	445.2 Km ²	445.2 Km ²

Tabla 4 Resultados metodología PATHS, ajustados al modelo conceptual. Autor

ÍNDICE PATHS				
RANGOS DE VULNERABILIDAD		Escenario		
		1	2	3
		% ÁREA	% ÁREA	% ÁREA
BAJA	< 100	0.07	0.07	8.12
MODERADA	100 - 120	6.45	11.40	43.65
ALTA	120 - 140	46.89	58.57	33.59
EXTREMA	> 140	49.6	29.96	14.65
		100%	100%	100%

Tabla 5 Resultados relativos metodología PATHS, ajustados al modelo conceptual. Autor

Para el escenario uno se nota el impacto sobre la vulnerabilidad de la nueva clasificación de profundidad del agua, mostrando un aspecto similar a las franjas donde se identificó flujo subterráneo, indicando que es un parámetro muy sensible en la

aplicación de la metodología PATHS. Discriminando las clasificaciones obtenidas, se observa que todas las zonas con vulnerabilidad extrema tienen profundidades de agua subterránea entre 0 y 5m. Se pueden observar zonas de vulnerabilidad extrema en el sector de Berlín, parte norte de la cuarzomonzonita de La Corcova (en contacto con la formación Silgará) y la mayor parte de la cuenca del río Oro y Frío. La clasificación de vulnerabilidad alta se encuentra en la cuenca alta del río de Oro, Berlín y cuenca media del Oro como secciones intermedias rodeadas por franjas de vulnerabilidad extrema. La cuenca del Tona se clasifica en su mayoría como vulnerabilidad alta. El rango de vulnerabilidad moderada se encuentra en pequeñas franjas de la Formación Silgará y de la cuenca del río Tona, debido a la alta pluviosidad que se registra en estas zonas. La vulnerabilidad baja sólo se obtiene en inmediaciones de la cabecera del municipio de Tona debido a la resistencia hidráulica del suelo y en la franja paralela a la falla de Bucaramanga, resultado de la superposición de profundidad de agua, altas precipitaciones y no afectación de la tectónica. En los escenarios dos y tres se encontró una disminución sensible de la clasificación de vulnerabilidad extrema en la parte baja y media del macizo de Santander. El Berlín se encuentra vulnerabilidad extrema en todos los escenarios como resultado de la baja pluviosidad que ha demostrado tener un impacto importante en la aplicación del modelo PATHS.

El peligro fue evaluado a partir de la vulnerabilidad ajustada al modelo conceptual con el primer escenario de profundidad de nivel freático y de la amenaza a la contaminación presentada en el informe de investigación UIS-CDMB (2010). El mapa de peligro (ver figura 41) muestra clasificaciones que van desde peligro bajo, moderado, alto a extremo (ver tabla 6).

PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN			
	RANGOS DE PELIGRO	ÁREA Km2	% DEL ÁREA TOTAL
BAJO	< 500	19.46	4.37
MODERADO	501 - 1000	151.7	34.07
ALTO	1001 - 3000	248.6	55.84
EXTREMO	> 3001	25.44	5.71
NO DATA	0	0	0
445.2 Km2			100

Tabla 6 Resultados evaluación de peligro a la contaminación, ajustado al modelo conceptual. Autor

Los resultados encontrados en la revisión del peligro son menos conservadores que la primera aproximación de peligro, debido a que se contó con un modelo conceptual validado se acerca un poco más al flujo y almacenamiento de agua subterránea en el Macizo de Santander, pero que debe continuar en proceso de revisión e investigación en la medida que el modelo conceptual se fortalezca y las metodologías incluyan factores típicos de zonas de montaña, como meteorización, fracturamiento, entre otros. El peligro extremo está ubicado en Berlín, Tona y zona norte de la cuarzomonzonita de la Corcova junto al contacto con la formación Silgará, resultado de la superposición de vulnerabilidad extrema y amenaza extrema producida por cultivos transitorios y cultivos de pastos y rastrojos. Se encuentran puntos de peligro extremo diseminados en toda la zona de estudio, resultado de la superposición de vulnerabilidad extrema y amenaza extrema por actividades puntuales.

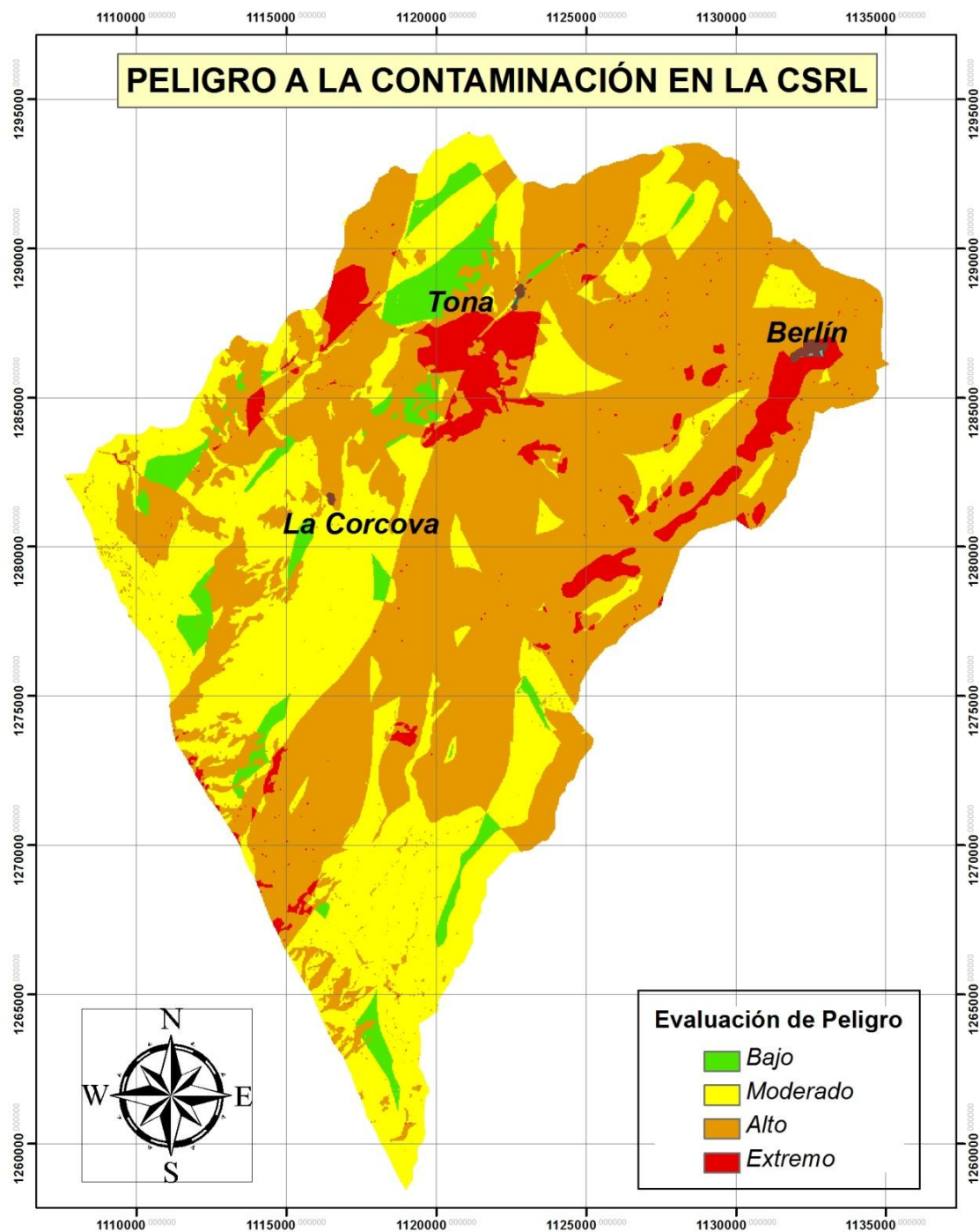


Figura 41 Peligro a la contaminación del agua subterránea en la CSRL, ajustado al modelo conceptual. Autor

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se desarrollarán las conclusiones que ha dejado el trabajo en la idealización del flujo de agua subterránea, la recarga de los sistemas acuíferos y la aplicación del modelo conceptual en la revisión de una evaluación de vulnerabilidad. También se presentan las recomendaciones y nuevas interrogantes que surgieron como nuevos problemas de investigación.

6.1. Conclusiones de la investigación

El macizo de Santander está compuesto por rocas cristalinas fracturadas y meteorizadas, que poseen zonas con propiedades hidráulicas aptas para el flujo y almacenamiento de agua subterránea. Se identifican dos zonas con estas características que presentan ocurrencia de puntos de agua. El primer tipo, donde se identificaron puntos de agua a lo largo de zonas de parteaguas en el macizo de Santander. Este flujo se da a través de perfiles de meteorización, que se hacen más profundos en las divisorias de aguas. Estas líneas de flujo son de corta a mediana distancia de pocos kilómetros, condicionados por la geomorfología, con conductividades eléctricas medias a bajas, como las encontradas en las divisorias del río Tona y Frío, y del río Oro y Lato. El segundo tipo de flujo a lo largo de fallas geológicas, también se encuentran puntos de nacimientos de agua que están asociados a líneas de flujo de larga distancia del orden de decenas de kilómetros, con altas conductividades eléctricas.

Existen dos zonas que presentan altas conductividades ubicadas en el macizo de Santander en rocas sedimentarias con presencia de calizas. Existe una zona de altas conductividades en la falla de Bucaramanga en rocas metamórficas e ígneas meteorizadas y fracturadas. La identificación de estas zonas permitió proponer una conexión entre las zonas sedimentarias en la parte alta del macizo de Santander con la falla de Bucaramanga, a través de las fallas geológicas La Colmillona y Zapamanga. Esta es la primera hipótesis de flujo de larga distancia que ha podido ser identificada y

validada con el apoyo de la distribución espacial del ion bicarbonato que presenta un comportamiento similar a la conductividad eléctrica. Otras dos líneas de flujo identificadas y validadas se ubican a lo largo de parteaguas del río Tona y Frío, y del río Oro y Lato. En este caso los diagramas de Piper y de Stiff muestran que estas aguas tienen un grado de evolución similar que va aumentando a lo largo de la línea divisoria. Con el uso de isótopos estables del agua se pudo validar el aporte de flujos de larga distancia a la falla de Bucaramanga. Para el caso del flujo a través de las zonas meteorizadas el aporte de los isótopos es muy vago y sólo plantea nuevas inquietudes. Los puntos de manantiales asociados a espesores meteorizados muestran valores de isótopos diferenciados del resto de resultados, por lo que se cree que el flujo puede ser de corta distancia en estas zonas de parteaguas en la cuenca del río Tona y del río de Oro. Estos resultados parciales deben ser tenidos en cuenta en futuros estudios del flujo de agua subterránea en la zona de estudio. Se encontró el valor más empobrecido de isótopos estables del agua en flujo base, tomado en la estación El Conquistador en el río de Oro a los 1100 m s. n. m.. Este resultado es una prueba de flujo de larga distancia proveniente de fuera de la cuenca de una altura de cerca de 3500 m s. n. m. en el alto de Berlín.

Se realizó una estimación de la recarga con un modelo hidrológico y se obtuvo un valor de 310 mm/año para el río de Oro, representativo para la zona de estudio ubicado dentro del rango de anteriores estimaciones y de 400 mm/año en el río Frío, que muestra un aporte mayor en a la recarga en el macizo de Santander. Los valores de recarga obtenidos muestran que los sistemas acuíferos tienen un gran aporte de agua proveniente de la precipitación, indicando la renovación y de aprovechamiento del recurso agua subterránea en la cuenca. La variación temporal de la recarga de acuíferos está condicionada por la disponibilidad de agua y presenta un comportamiento bimodal, con un aporte muy bajo en los meses de julio, agosto y diciembre.

Se encontró que los métodos de evaluación de vulnerabilidad deben ser desarrollados para un esquema de flujo y condiciones particulares del medio físico. La metodología

PATHS tiene en cuenta, con poco peso, la influencia de la tectónica en la vulnerabilidad, pero no tiene en cuenta la influencia de las zonas meteorizadas en la vulnerabilidad de acuíferos, por lo que no se ajusta exactamente al modelo conceptual de flujo propuesto para el macizo de Santander. Sin embargo, dentro de las metodologías disponibles, se consideró que el método más aplicable a la zona de estudio es PATHS. Una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad en la zona de estudio debe tener en cuenta variables que las propiedades hidráulicas secundarias de zonas meteorizadas y fallas geológicas y una jerarquización e interacción entre los flujos subterráneos de corta, media y larga distancia. Los resultados obtenidos de vulnerabilidad a la contaminación son menos conservadores al utilizar el modelo hidrogeológico conceptual. Se propusieron tres escenarios hipotéticos del parámetro profundidad del nivel freático ajustados al modelo hidrogeológico conceptual, se obtuvo como resultado que la metodología PATHS es sensible al cambio de la profundidad del agua subterránea. El escenario más conservador clasifica aproximadamente el 94 % del área de estudio como vulnerabilidad extrema y alta, mientras que el escenario menos conservador estas clasificaciones representan cerca del 49 % del área de estudio. El peligro a la contaminación evaluado con el escenario más conservador presenta el 5.7 % de la zona de estudio clasificada con el rango extremo, el 55.8 % en alto, el 34.1 % de moderado y el 4.4 % tiene un peligro bajo. La evaluación de la vulnerabilidad deberá seguir siendo ajustada conforme el modelo conceptual se afine con nueva información, además del uso de otras metodologías que se ajusten a las características de fracturamiento y meteorización del Macizo de Santander.

El agua subterránea en el macizo de Santander presenta características físico-químicas e hidrogeoquímicas que permiten caracterizarla y proponer una jerarquización del flujo que va desde corta y mediana, hasta larga distancia y que conectan el macizo de Santander con la falla de Bucaramanga. En la zona aluvial se cuenta con una caracterización isotópica que permiten identificar las zonas de recarga en el macizo de Santander. Por esta razón se espera encontrar una relación hidroquímica y físico-química entre la meseta de Bucaramanga y el macizo. En la actualidad sólo se cuenta con un punto de hidroquímica tomado en la escarpa occidental de la formación

Bucaramanga, caracterizado como un agua con baja conductividad asociada a líneas de flujo de mediana distancia y con una clasificación química diferente al resto de puntos de agua encontrados en la zona de estudio, esto sugiere que el agua analizada en la meseta de Bucaramanga sufrió algún tipo de afectación o mezcla. Por ahora, se plantea una hipótesis de mezcla con aguas de baja conductividad proveniente del sistema de acueducto enmascarando la evolución que se esperaría del agua, y por otro lado se sugiere un aporte de aguas provenientes del sistema de alcantarillado sanitario y pluvial, que cambiaría la facie hidrogeoquímica del agua del acuífero. A partir de los resultados actuales de hidroquímica no se puede realizar una conexión entre las aguas de la meseta de Bucaramanga y el macizo de Santander, sin embargo los resultados de isótopos estables del agua afirman que esta conexión existe.

6.2. Recomendaciones y prospectiva del estudio del agua subterránea en la zona de estudio

En el desarrollo de la presente investigación se identificaron temas que deben ser estudiados y tenidos en cuenta futuros trabajos, con el fin de enriquecer el conocimiento actual de la dinámica del agua subterránea.

Se deben llevar a cabo estudios que profundicen en la caracterización de las arcillas para enriquecer el entendimiento de la evolución de una línea de flujo por una zona meteorizada con presencia de este tipo de minerales.

Luego de haber encontrado dos líneas de flujo en zonas de parteaguas y que se conoce el indicio de la existencia de otras, se deben llevar a cabo investigaciones para identificar otras líneas de este tipo en la zona de estudio.

Debido a la incertidumbre que genera la contaminación de las aguas subterráneas en los análisis químicos, se propone realizar análisis de calidad del agua en paralelo con los muestreos hidrogeoquímicos e isotópicos. Con esto se espera llegar a conclusiones

mejor fundamentadas en casos anómalos de concentraciones de iones como los sulfatos, cloruros ó nitratos.

Se debe medir el gas carbónico en el agua subterránea y llevar a cabo investigaciones que aporten en el entendimiento del proceso de meteorización de rocas cristalinas con silicatos, el aporte de bicarbonatos al agua subterránea y la formación de arcillas. Estos procesos condicionan la evolución química del agua subterránea en los flujos identificados en el macizo de Santander.

Se deben llevar a cabo nuevos muestreos hidroquímicos e isotópicos en la zona de estudio, incluyendo nuevos puntos en la meseta de Bucaramanga y en la falla de Bucaramanga. La caracterización hidrogeoquímica e isotópica de estas zonas ayudará a entender la evolución del agua subterránea y su conexión con el macizo de Santander.

A partir de este trabajo se abren nuevas de líneas de investigación que apunten direccionadas a la modelación matemática de los fenómenos de flujo de agua subterránea y de transporte de contaminantes en el medio meteorizado y fracturado del macizo de Santander, y su interacción con los acuíferos de la zona aluvial de Bucaramanga.

Y para finalizar se tienen nuevas preguntas de investigación: ¿cómo es el flujo al interior de una falla geológica?, qué fallas geológicas transportan el agua subterránea del macizo de Santander a la falla de Bucaramanga?, la falla de Bucaramanga tiene flujos regionales que transportan agua de otras cuencas?, qué capacidad de almacenamiento y transporte tienen los acuíferos que se forman en las zonas meteorizadas de los parteaguas?, existen otros flujos de agua subterránea en el macizo de Santander?, qué procesos afectan el agua que se almacena en los acuíferos de la formación Bucaramanga?, cuál es la relación que existe entre el alto de Berlín y la cuenca del río de Oro?, existe alguna relación subterránea con la cuenca del río

Suratá?, de ser así, sería afectada la calidad del agua subterránea en la zona de estudio?.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acueducto Metropolitano de Bucaramanga – amb (2011). Gestión 2011. Informe de sustentabilidad. 32 p.
- [2] Appelo, C y Postma, D (1999). Geochemistry, groundwater and pollution. Segunda edición. Taylor and Francis group. 649 p.
- [3] Arenas, J y Ruiz, J (2005). Estudio de la variación del régimen de lluvias en la Cuenca Superior del río Lebrija (C.S.R.L.). Trabajo de grado ingeniería civil, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [4] Auge, M (2004). Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos. Universidad de Buenos Aires. 38 p.
- [5] Barajas, A y Gómez, A (2010). Caracterización hidrogeológica con base en identificación geomorfológica y estructural en la Cuenca Superior de río Lato, Piedecuesta, Santander. Trabajo de grado geología, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [6] Barrera, B (2006). Estimación de la recarga en la Cuenca Superior del Río Lebrija mediante el balance de masa del ión cloruro. Trabajo de grado ingeniería civil, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [7] Beltrán, R y Rey, A (2002). Comportamiento estructural asociado al sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta, sección entre Piedecuesta (río de Oro) y Bucaramanga (río Suratá). Trabajo de grado geología, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [8] Betancur, T (2008). Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso estudio: El bajo Cauca antioqueño. Tesis doctoral, Universidad de Antioquia. Colombia.
- [9] Bredehoeft (2005). The conceptualization model problem-surprise. Springer J. Hydrogeology 13 37-46.
- [10] Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga – CDMB (2003). Estudio plan de ordenamiento ambiental de la microcuenca del río de Oro.

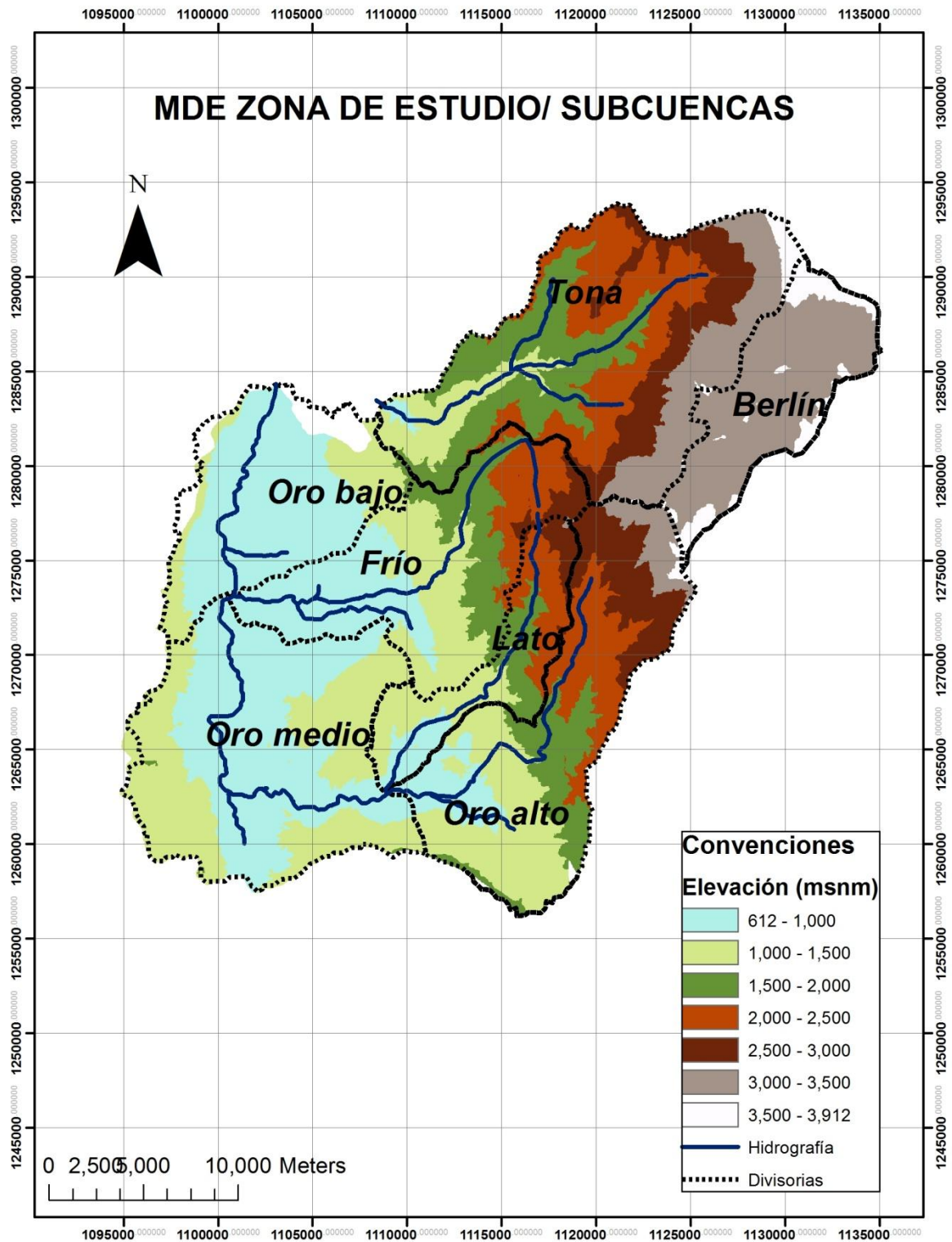
- [11] Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga – CDMB (2003). Estudio plan de ordenamiento territorial municipio de Bucaramanga.
- [12] Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga – CDMB (2003). Estudio plan de ordenamiento territorial municipio de Piedecuesta.
- [13] Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga – CDMB (2003). Estudio plan de ordenamiento territorial municipio de Girón.
- [14] Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga – CDMB (2003). Estudio plan de ordenamiento territorial municipio de Floridablanca.
- [15] Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga – CDMB (2003). Estudio esquema de ordenamiento territorial municipio de Tona.
- [16] COLCIENCIAS (2003). Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el Macizo de Santander e identificación de acuíferos. Colombia. 124 p.
- [17] Craig (1961). Isotopic variations in meteoric waters. Sciences 133 1702-1703.
- [13] Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE (2005). Censo General 2005. www.dane.gov.co
- [18] Francés, F, Vélez, J, Múnera, J, Medici, Ch y Bussi, G (2012). Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.8. Universidad Politécnica de Valencia. 85 p.
- [19] Gómez, S y Anaya, A (2004). Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de acuíferos de la región de Bucaramanga. Avances en Recursos Hídricos. Número 11.
- [20] Gómez, S y Guzmán, J (2011). Separación de flujo base en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Revista Facultad de Ingenierías Universidad de Antioquia. 61 52-63.
- [21] Gómez, S, Taupin, J y Rueda, J (previsto para 2013). Estudio isotópico y geoquímico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga.
- [22] Holdridge, L (1967). Life Zone Ecology. Tropical Science Center.

- [23] INGEOMINAS (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Fase II. Convenio realizado entre la CDMB e INGEOMINAS – Subdirección de Amenazas Geoambientales. Bogotá, 270 p.
- [24] INGEOMINAS-UIS (2007). Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la región central del departamento de Santander. Tomo I: memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el Macizo de Santander.
- [25] INGEOMINAS (2009). Informe hidrogeológico del Macizo de Santander.
- [26] Isaza, O (2005). Estimación de la recarga mensual en la cuenca del río de Oro por medio de un modelo hidrológico distribuido. Trabajo de grado ingeniería civil, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [27] Lozano, J (2012). Caracterización del perfil de meteorización de las rocas cristalinas en la cuenca superior del río Lato y sus implicaciones hidrogeológicas, Piedecuesta Santander. Trabajo de grado geología, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [28] Molina, L (2009). Estimación de los tiempos de residencia a partir de la información de isótopos estables en la cuenca superior del río Lebrija, estación Café Madrid. Trabajo de grado ingeniería civil, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [29] Pérez, D (2010). Elaboración de un modelo digital de elevaciones y generación del mapa de clasificación vegetal para la Cuenca Superior del río Lebrija. Trabajo de grado ingeniería civil, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [30] Puricelli, M (2003). Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente. 436 p.
- [31] Rodríguez, J y Torres, D (2011). Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga. Trabajo de grado ingeniería civil, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [32] Rueda, O y Betancur, T (2006). Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en el Bajo Cauca Antioqueño. Avance en recursos Hidráulicos. Universidad Nacional sede Medellín. 13 71-88. Colombia.

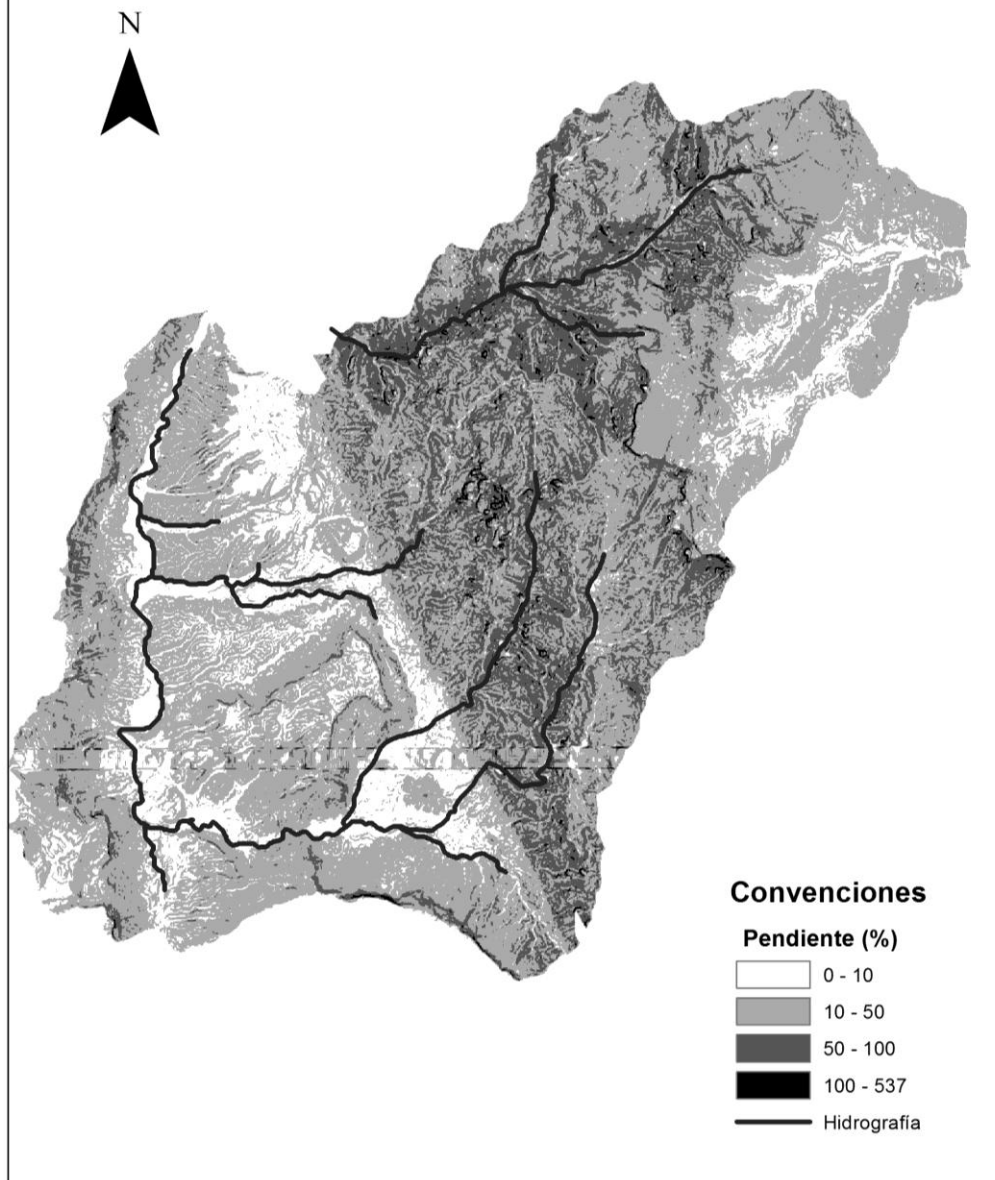
- [33] Sierra, L (2011). Estudio geoelectrico para determinar zonas de meteorización en tres localidades del Macizo de Santander. Informe técnico Asesorías Geológicas. Colombia.
- [34] UIS-CDMB (2010). Evaluación del peligro a la contaminación del recurso hídrico subterráneo en la Cuenca Superior del río Lebrija. Informe proyecto de investigación.
- [35] Vargas, J (2009). Adquisición y procesamiento de datos sísmicos someros 2D en la falla de Bucaramanga en el área de Piedecuesta (Santander). Trabajo de grado geología, Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- [36] Vásquez, L y Bermoude, O (2004). Modelo geológico-geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga. Informe de investigación INGEOMINAS. 9p.
- [37] Velandia, F (2010). Análisis de fracturas para exploración de aguas subterráneas en el centro de Santander. Capítulo de libro "Hidrogeología para la gestión del recurso hídrico". Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia. 159-168.
- [38] Vergara, O (2002). Prospección geológica para aguas subterráneas en rocas cristalinas fracturadas del Macizo de Santander. Zona Oriental de Bucaramanga. Trabajo de grado geología, Universidad Industrial de Santander. Colombia
- [39] Ward, D y Goldsmith (1973). Geología de los cuadrángulos H12 y H13, Bucaramanga y Pamplona. Volumen XX, Número 1-3. INGEOMINAS.
- [40] Zheng, C y Bennet, G (1995). Applied contaminant transport modeling. US

ANEXOS

Anexo A. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES



PENDIENTE ZONA DE ESTUDIO



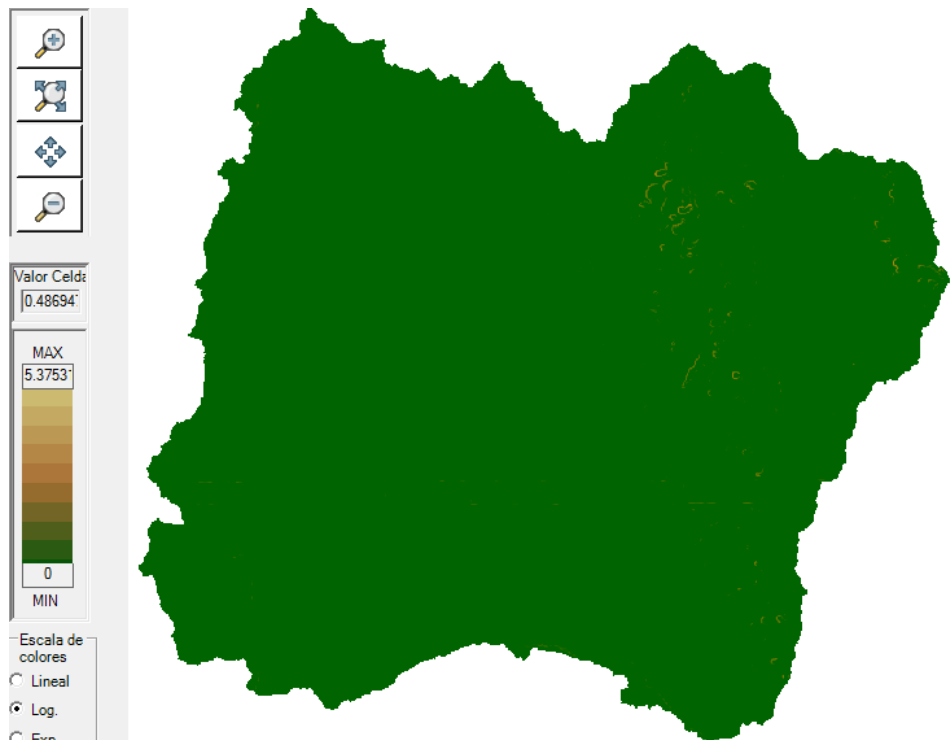
Anexo B. UBICACIÓN PUNTOS DE AGUA MUESTREADOS PARA ANÁLISIS DE IONES EN LA ZONA DE ESTUDIO

Las coordenadas este y norte se encuentran en el sistema de referencia MAGNA SIRGAS

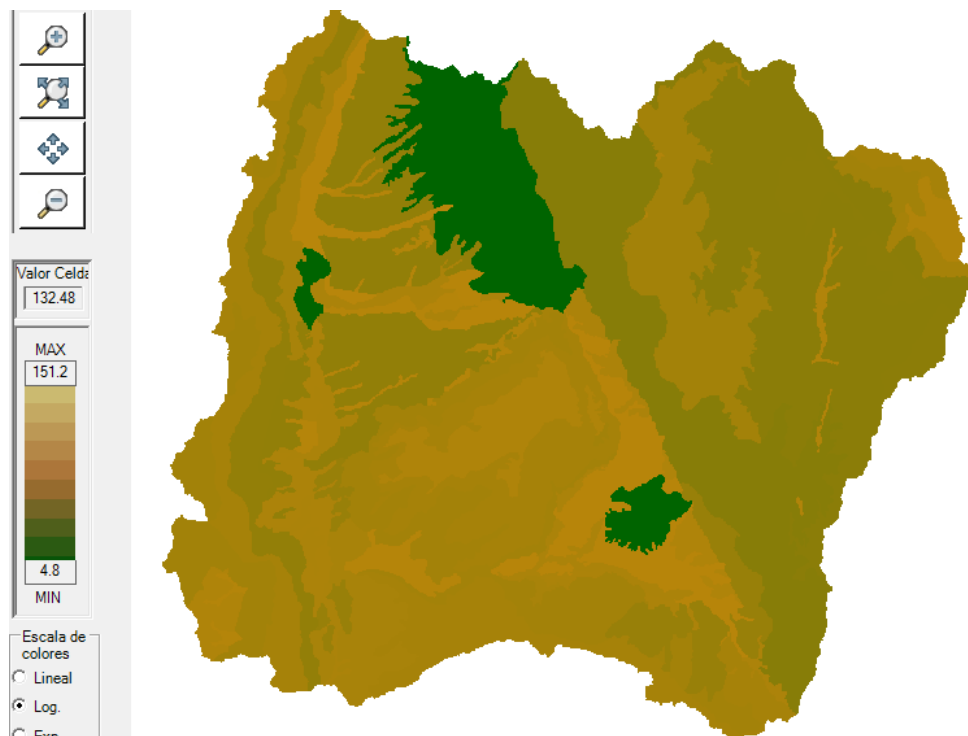
Rótulo	Número	Nom	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)	COMENTARIOS
MS-01	1	km26	1117799	1280907	2229	Punto ubicado en la Finca La Mariana
MS-02	2	El Carajo	1115361	1282015	2203	Punto ubicado en la Finca El Carajo
MS-03	3	Km 20	1113526	1280540	1893	Punto ubicado a la izquierda de la vía Bucaramanga - Cúcuta. El manantial llena un tanque que abastece casas al borde de la vía.
MS-04	4	Retiro Chiquito	1110428	1279811	1548	Punto que abastece el acueducto de la vereda Retiro Chiquito
MS-05	5	Km 9	1110154.5	1278241.7	1523	Punto ubicado a la izquierda de la vía Bucaramanga - Cúcuta, en el PR +9 del trazado de los trabajos que se estaban realizando en la vía.
MS-06	6	Km 11	1110443.2	1279110.6	1634	Punto ubicado a la izquierda de la vía Bucaramanga - Cúcuta, en el PR +11 del trazado de los trabajos que se estaban realizando en la vía. El manantial llena un tanque que abastece requerimientos varios en la vía.
MS-07	7	Falla Silla	1117095	1267519	1929	Punto ubicado en la vía ICP - Sevilla, 300 metros arriba de la falla de silla donde se encuentra una tienda y una cancha de fútbol en tierra.
MS-08	8	Cubín Granadillo Bajo	1116317	1266591	1800	Punto ubicado 300 m delante de la finca los Castaños en la vía ICP - Sevilla. A la derecha de la vía. La primera fuente de agua que se encuentra a la izquierda y que cae a otro hilo de agua.

Rótulo	Número	Nom	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)	COMENTARIOS
MS-09	9	Cubín Granadillo Alto	1116317	1266591	1800	Punto ubicado 300 m delante de la finca los Castaños en la vía ICP - Sevilla. A la derecha de la vía. La primera fuente de agua que se encuentra subiendo en el talud cerca de 100 m.
ZF-01	10	La Flora superficial-Julio	1107269	1278191	970	Punto tomado en el piezómetro superficial del parque la Flora, ubicados junto a la puerta de acceso contigua a la mediatorta.
ZF-01	11	La Flora superficial-Mayo	1107269	1278191	970	Punto tomado en el piezómetro superficial del parque la Flora, ubicados junto a la puerta de acceso contigua a la mediatorta.
ZF-02	12	La Flora Profundo	1107269	1278191	970	Punto tomado en el piezómetro profundo del parque la Flora, ubicados junto a la puerta de acceso contigua a la mediatorta.
ZF-03	13	Pan de Azúcar-Superficial	1107865	1279048	1045	Punto ubicado en el barrio Bajos de Pan de Azúcar, agua tomada del piezómetro superficial.
ZF-04	14	Pan de Azúcar-Profundo	1107865	1279048	1045	Punto ubicado en el barrio Bajos de Pan de Azúcar, agua tomada del piezómetro profundo.
ZF-05	15	Jardin La Colina	1108271	1275466	1030	Punto ubicado en el cementerio Jardín La Colina. El agua es bombeada hasta un almacenamiento al aire libre para ser utilizada en oficios varios.
MB-01	16	La Rosita	1105251	1278261	894	Punto ubicado bajando por la calle la Rosita donde se están realizando los trabajos del viaducto La Novena. Es uno de los drenes construidos por la CDMB para el control de erosión en la escarpa occidental de Bucaramanga.

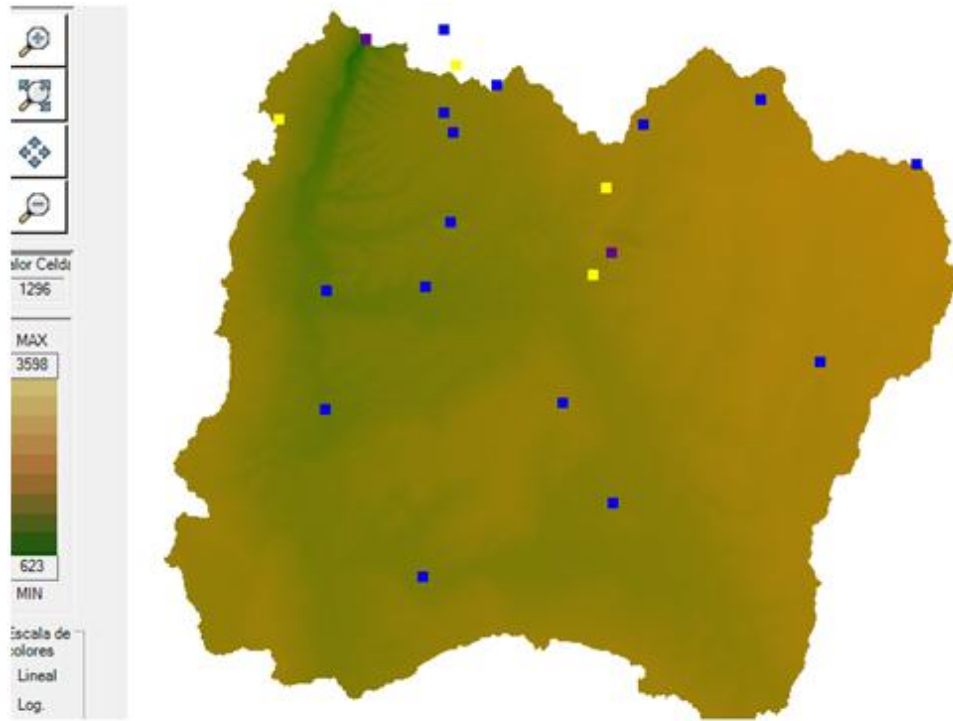
Anexo C. INSUMOS MODELO TETIS



Mapa velocidad de flujo en laderas (m/s)



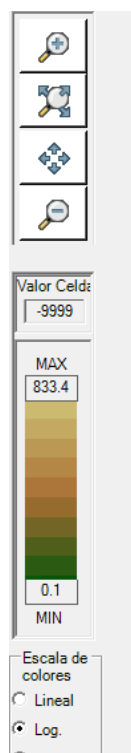
Mapa de capacidad de almacenamiento estático del suelo (mm)



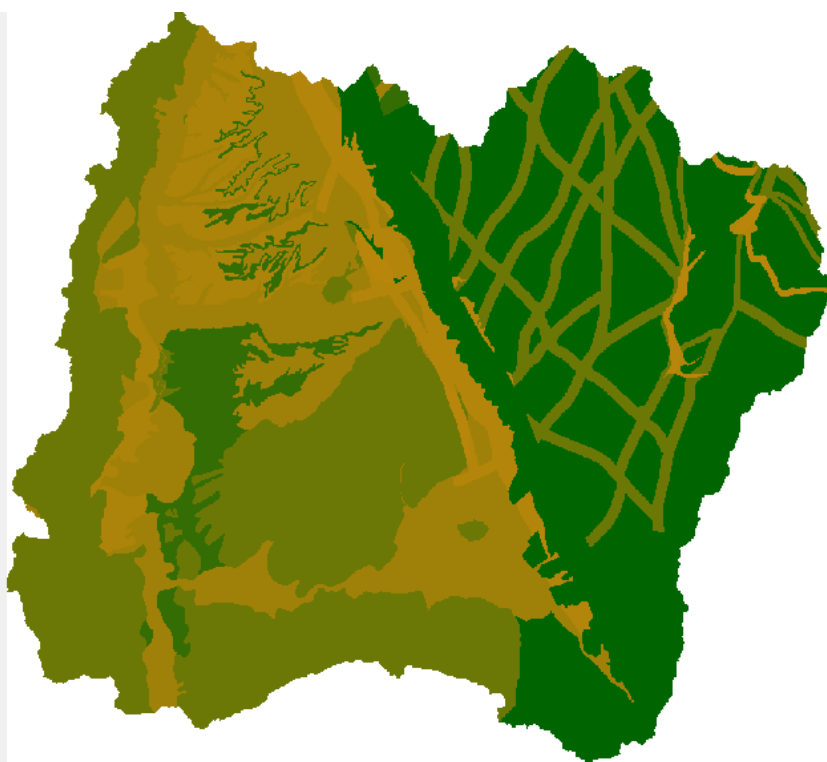
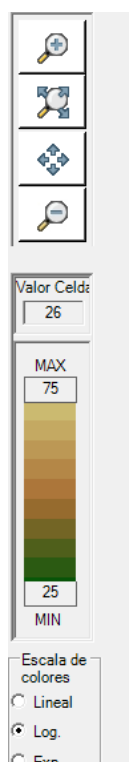
Mapa de Ubicación de estaciones climáticas modelo TETIS. Azul: P. Violeta: Caudales. Amarilla: Evapotranspiración.



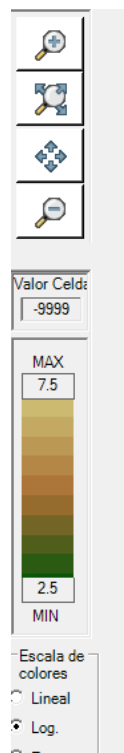
Mapa direcciones de flujo



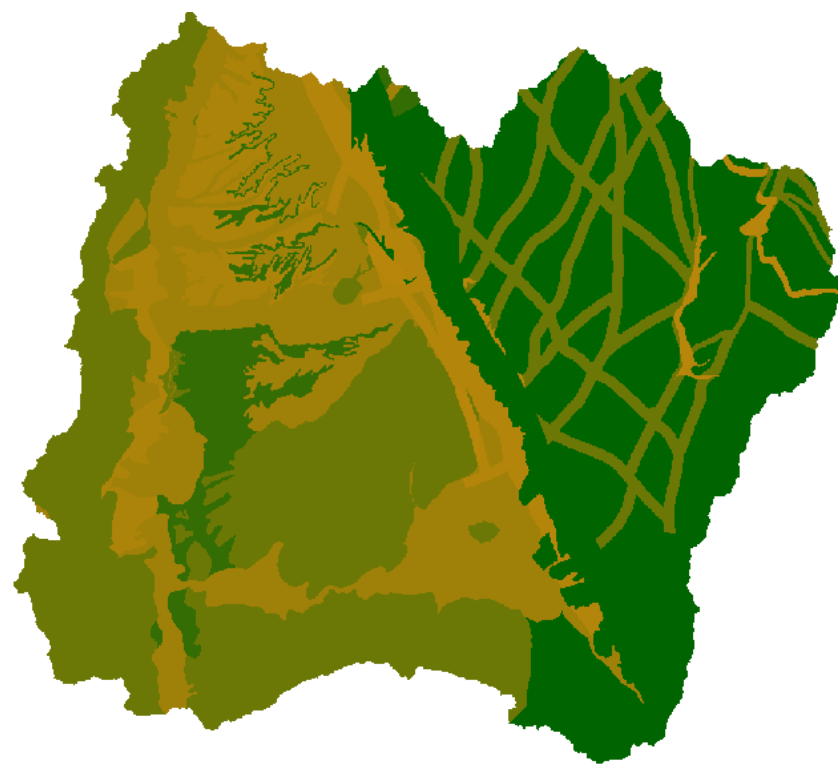
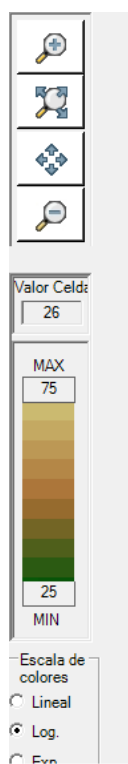
Mapa conductividad hidráulica interflujo



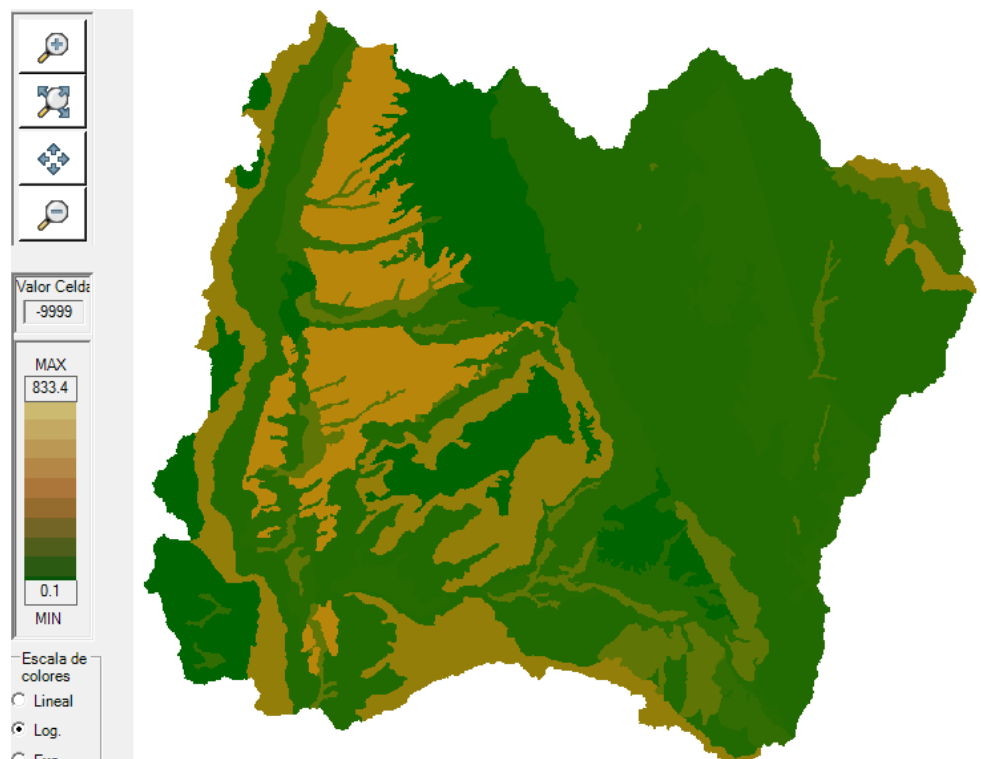
Mapa conductividad hidráulica acuífero



Mapa de capacidad de pérdidas del acuífero



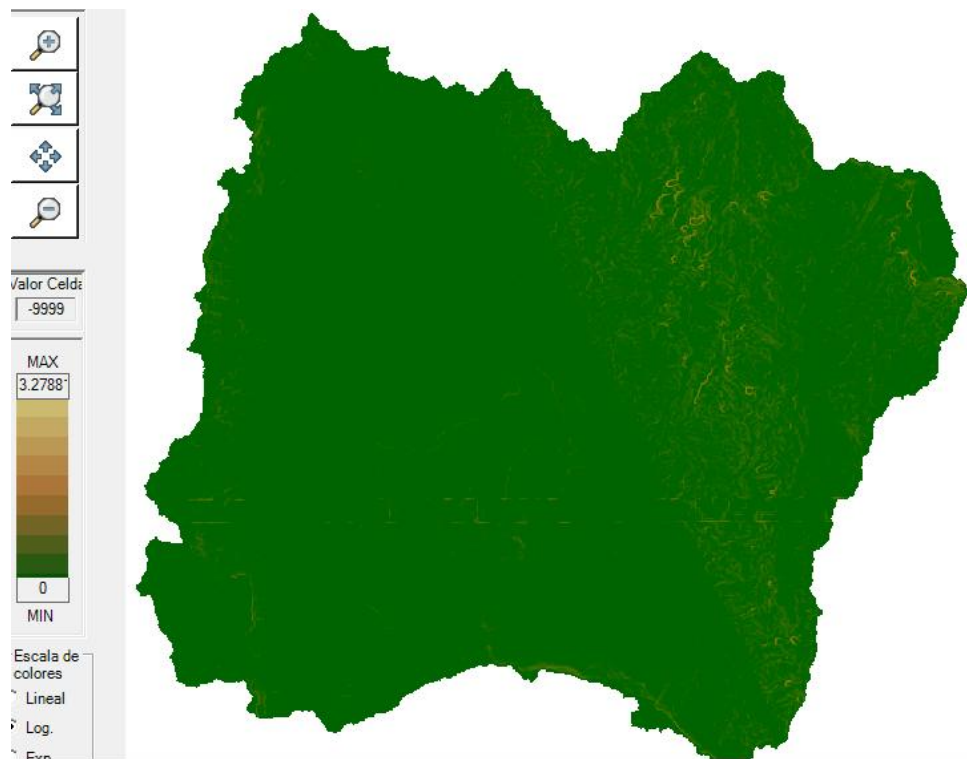
Mapa de capacidad de percolación



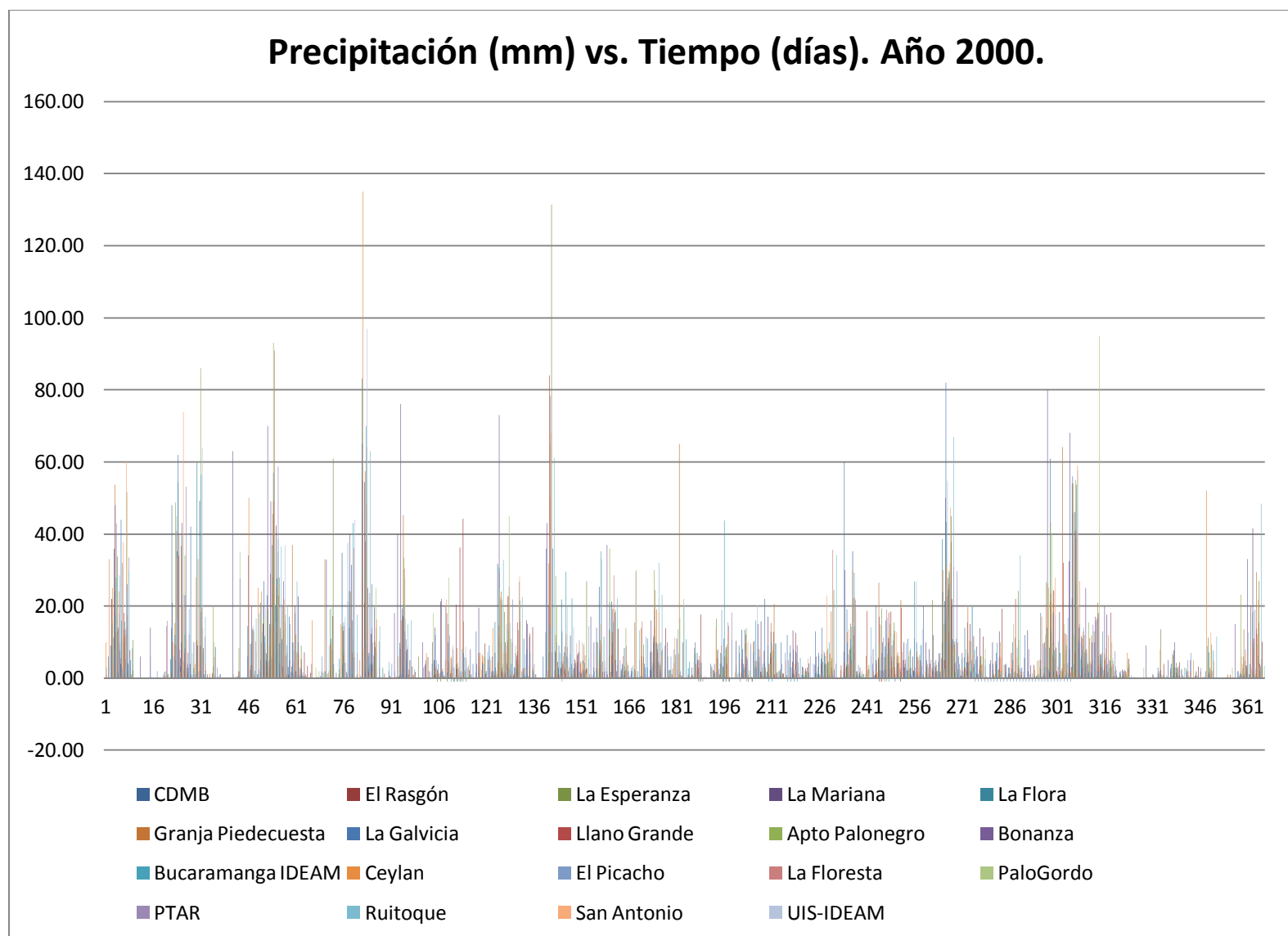
Mapa de capacidad de infiltración



Mapa de celdas acumuladas



Mapa de pendientes



Información de precipitación usada en el modelo TETIS.