

Modelo Hidrodinámico de Flujos Subterráneos en Sistemas Cársticos y su Interacción con las  
Rocas Adyacentes. Caso de Estudio: Parte Alta de la Cuenca del Río de Oro, Departamento de  
Santander

Maria Alejandra Cetina Tarazona

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Ingeniería Civil

Directora

Sully Gómez Isidro

PhD. en Ingeniería

Universidad Industrial De Santander  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil  
Magister en Ingeniería Civil  
Bucaramanga

2019

*Dedicatoria*

*Dedico este trabajo a mis amados padres, William Cetina y Elba Cecilia Tarazona, a mi hermana y colega Lina María, a mi querido Fabián y a mis amigos y compañeros con quienes compartí esta maravillosa experiencia, gracias a todos por su infinito apoyo.*

### **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería Civil, al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental-GPH y especialmente a la profesora Sully Gómez Isidro, por apoyarme, guiarme y permitirme culminar de manera satisfactoria mis estudios de maestría. Igualmente agradezco a los profesores Jean Denis Taupin y Juan Diego Colegial por sus valiosos aportes, comentarios, sugerencias y recomendaciones en la evaluación de este trabajo. Finalmente doy gracias a la comunidad del sector El Picacho y Llano Adentro, por su colaboración en el trabajo de campo.

## Tabla de Contenido

|                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introducción .....</b>                                                                                                | <b>16</b> |
| <b>1. Objetivos .....</b>                                                                                                | <b>19</b> |
| <b>2. Generalidades .....</b>                                                                                            | <b>20</b> |
| 2.1. Localización y Aspectos Fisiográficos del Área de Estudio.....                                                      | 20        |
| 2.2. Metodología.....                                                                                                    | 24        |
| <b>3. Marco de Referencia.....</b>                                                                                       | <b>32</b> |
| 3.1. Geología Regional.....                                                                                              | 32        |
| 3.2. Aspectos Hidrológicos .....                                                                                         | 34        |
| 3.3. Aspectos Hidrogeológicos .....                                                                                      | 36        |
| <b>4. Resultados .....</b>                                                                                               | <b>39</b> |
| 4.1. Modelo Geológico.....                                                                                               | 39        |
| 4.1.1. Estratigrafía del área de estudio. ....                                                                           | 39        |
| 4.1.2. Geomorfología del área de estudio.....                                                                            | 49        |
| 4.1.3. Geología estructural.....                                                                                         | 51        |
| 4.2. Hidrología.....                                                                                                     | 53        |
| 4.2.1. Precipitación de la zona de estudio.....                                                                          | 53        |
| 4.2.2. Estimación de la oferta hídrica.....                                                                              | 56        |
| 4.2.3. Análisis de caudales. ....                                                                                        | 61        |
| 4.3. Isótopos Estables del Agua.....                                                                                     | 66        |
| 4.3.1. Composición isotópica de la precipitación. ....                                                                   | 68        |
| 4.3.2. Composición isotópica de los manantiales y de corrientes superficiales.....                                       | 73        |
| 4.3.3. Análisis del comportamiento temporal de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de los manantiales..... | 76        |

|           |                                                                                                                                |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.4.    | Análisis del comportamiento temporal de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de las corrientes superficiales..... | 86         |
| 4.3.5.    | Análisis de la zona de recarga de los flujos subterráneos. ....                                                                | 88         |
| 4.3.6.    | Análisis de eventos de lluvia en el sistema cárstico del Subsistema 1 .....                                                    | 91         |
| 4.4.      | Análisis Hidroquímicos .....                                                                                                   | 95         |
| 4.4.1.    | Comportamiento de parámetros fisicoquímicos. ....                                                                              | 95         |
| 4.4.2.    | Análisis de iones mayoritarios. ....                                                                                           | 102        |
| 4.4.3.    | Procesos geoquímicos identificados. ....                                                                                       | 108        |
| 4.5.      | Modelo Hidrodinámico Conceptual .....                                                                                          | 110        |
| <b>5.</b> | <b>Conclusiones</b> .....                                                                                                      | <b>112</b> |
|           | <b>Referencias Bibliográficas</b> .....                                                                                        | <b>116</b> |

### Lista de Tablas

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Información hidrológica disponible. ....                                                                                                                             | 25 |
| <b>Tabla 2.</b> Ubicación de los manantiales de la zona de estudio. ....                                                                                                             | 26 |
| <b>Tabla 3.</b> Ubicación de los recolectores de agua lluvia de la zona de estudio. ....                                                                                             | 28 |
| <b>Tabla 4.</b> Ubicación de los muestreos de agua superficial. ....                                                                                                                 | 30 |
| <b>Tabla 5.</b> Características e importancia hidrogeológica de las unidades geológicas del área de estudio según INGEOMINAS -UIS (2007). ....                                       | 37 |
| <b>Tabla 6.</b> Precipitación media anual de las estaciones pluviométricas y climáticas. ....                                                                                        | 57 |
| <b>Tabla 7.</b> Temperatura promedio mensual de las estaciones Berlín y El Rasgón. ....                                                                                              | 59 |
| <b>Tabla 8.</b> Humedad relativa promedio mensual de las estaciones Berlín y El Rasgón. ....                                                                                         | 59 |
| <b>Tabla 9.</b> Valores de evapotranspiración potencial. ....                                                                                                                        | 59 |
| <b>Tabla 10.</b> Valores de evapotranspiración real. ....                                                                                                                            | 59 |
| <b>Tabla 11.</b> Caudales de los manantiales de la zona de estudio. ....                                                                                                             | 62 |
| <b>Tabla 12.</b> Resultados de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ ) del agua Lluvia en la Estación Picacho. ....                                  | 69 |
| <b>Tabla 13.</b> Resultados de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ ) del agua Lluvia en la Estación Truchería El Horno. ....                       | 69 |
| <b>Tabla 14.</b> Resultados de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ ) de manantiales. ....                                                          | 74 |
| <b>Tabla 15.</b> Resultados de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ ) de agua superficial. ....                                                     | 75 |
| <b>Tabla 16.</b> Composición Isotópica $\delta^{18}\text{O}$ de los manantiales del Subsistema 1. ....                                                                               | 78 |
| <b>Tabla 17.</b> Composición Isotópica $\delta^{18}\text{O}$ de los manantiales del Subsistema 2. ....                                                                               | 81 |
| <b>Tabla 18.</b> Composición Isotópica $\delta^{18}\text{O}$ de los manantiales del Subsistema 3. ....                                                                               | 85 |
| <b>Tabla 19.</b> Comparación de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de la lluvia y agua de corriente superficial, metros abajo del cierre de la Quebrada La Moza. .... | 86 |
| <b>Tabla 20.</b> Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de la parte media alta de la Quebrada la Moza y los manantiales M3, M6 y M7. ....                                    | 87 |
| <b>Tabla 21.</b> Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de la microcuenca hidrográfica Quebrada la Moza del mes de agosto 2018. ....                                         | 88 |
| <b>Tabla 22.</b> Resultados del muestreo intensivo realizado en la Quebrada Picacho. ....                                                                                            | 93 |
| <b>Tabla 23.</b> Parámetros Fisicoquímicos del agua mensual de los recolectores. ....                                                                                                | 96 |
| <b>Tabla 24.</b> Parámetros Fisicoquímicos de Manantiales. ....                                                                                                                      | 98 |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 25.</b> Datos de Conductividad Eléctrica (CE) y Caudales (Q) de los manantiales. ....                          | 99  |
| <b>Tabla 26.</b> Parámetros Fisicoquímicos de aguas de corrientes superficiales. ....                                   | 102 |
| <b>Tabla 27.</b> Resultados de los Análisis Fisicoquímicos de las muestras de manantial y de agua superficial.<br>..... | 104 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Localización geográfica del área de estudio.....                                                                                                                               | 20 |
| <b>Figura 2.</b> Localización geológica del área de estudio a nivel regional. Tomado y modificado de Cediel et al. (2003).....                                                                  | 21 |
| <b>Figura 3.</b> Pendientes moderadas y altas visualizadas del perfil longitudinal del cauce de la quebrada La Moza.....                                                                        | 22 |
| <b>Figura 4.</b> Curva Hipsométrica de la microcuenca hidrográfica de la quebrada La Moza.....                                                                                                  | 23 |
| <b>Figura 5.</b> Cortes transversales (A-A') y (B-B') de la microcuenca hidrográfica de la quebrada La Moza. ....                                                                               | 23 |
| <b>Figura 6.</b> Esquema general de la metodología usada en el trabajo de investigación. ....                                                                                                   | 24 |
| <b>Figura 7.</b> Localización de los manantiales, puntos de muestreo de corrientes superficiales, ubicación de Diver y de los recolectores de agua lluvia de la zona de estudio. ....           | 28 |
| <b>Figura 8.</b> A) Recolector de agua lluvia Picacho. B) Recolector de agua lluvia Truchería El Horno. ....                                                                                    | 29 |
| <b>Figura 9.</b> Parte del mapa geológico publicado por INGEOMINAS (2006).....                                                                                                                  | 33 |
| <b>Figura 10.</b> Ciclo anual de la Lluvia registrado en la Estación El Picacho (años 1967 – 2017).....                                                                                         | 35 |
| <b>Figura 11.</b> Parte del Mapa de Zonas de Interés Hidrogeológico del Macizo de Santander Cuenca Superior del Rio Lebrija (INGEOMINAS, 2006). ....                                            | 38 |
| <b>Figura 12.</b> Mapa geológico del área de estudio.....                                                                                                                                       | 41 |
| <b>Figura 13.</b> A) Afloramiento de la Formación Silgara sobre la vía principal Bucaramanga – Berlín. B) Detalle de la lineación mineral que presenta los esquistos cuarzo-feldespáticos. .... | 42 |
| <b>Figura 14.</b> A) Afloramiento de la Cuarzomonzonita de La Corcova sobre el camino hacia la vereda el Reventón. B) Detalle del granito de color blanco. ....                                 | 42 |
| <b>Figura 15.</b> A) Afloramiento de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. B) Detalle de la granodiorita. ....                                                                                   | 43 |
| <b>Figura 16.</b> A) Afloramiento de la Formación Girón que aflora sobre camino hacia la quebrada La Moza. B) Detalle de limolitas arenosas.....                                                | 44 |
| <b>Figura 17.</b> Afloramiento de la Formación Los Santos compuesta por cuarzoarenitas. ....                                                                                                    | 46 |
| <b>Figura 18.</b> Afloramiento de la Formación Rosablanca sobre la carretera Picacho – Berlín donde se observan capas gruesas de calizas y arcillolitas. ....                                   | 48 |
| <b>Figura 19.</b> Escarpes de falla en el sector Alto El Picacho.....                                                                                                                           | 50 |



|                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 20.</b> Geomorfología cárstica desarrollada en rocas de la Formación Rosablanca (Kir) que se encuentra en contacto fallado con la Formación Los Santos (Kils), observada en el sector Alto El Picacho. ....                                       | 51 |
| <b>Figura 21.</b> Contraste entre las laderas escarpadas en las rocas sedimentarias, formaciones Girón (Jg) y Los Santos (Kils), y el relieve ondulado de las rocas metamórficas de los Esquistos del Silgará (pDs)....                                     | 51 |
| <b>Figura 22.</b> Mapa estructural de la zona de estudio, donde se muestran los patrones de fracturamiento (Diagramas Rosas), el tensor de esfuerzo establecido en Bejarano y Navas (2018) y las direcciones potenciales de flujo de agua subterránea. .... | 54 |
| <b>Figura 23.</b> Lluvia de la Estación El Picacho correspondiente a los años 2017 y 2018. El dato de diciembre 2017 corresponde al registrado por el recolector de lluvia mensual Picacho.....                                                             | 56 |
| <b>Figura 24.</b> Distribución espacial de la lluvia en la zona de estudio.....                                                                                                                                                                             | 58 |
| <b>Figura 25.</b> Valores de precipitación promedio mensual de la estación El Picacho (1967-2017) y evapotranspiración real mensual calculada por Budyco (Thornwaite). ....                                                                                 | 60 |
| <b>Figura 26.</b> Variación temporal de los valores de caudales medidos en los manantiales de la zona de estudio.....                                                                                                                                       | 63 |
| <b>Figura 27.</b> Caudales diarios versus lluvia diaria durante el periodo de marzo 2018 a enero 2019 (ausencia datos de agosto y septiembre). ....                                                                                                         | 63 |
| <b>Figura 28.</b> Aproximación a la Curva maestra de Recesión de la quebrada Picacho.....                                                                                                                                                                   | 65 |
| <b>Figura 29.</b> Separación del flujo base a partir de los caudales de la quebrada Picacho. ....                                                                                                                                                           | 66 |
| <b>Figura 30.</b> Variación temporal de la precipitación y $\delta^{18}\text{O}$ en la Estación Picacho y Truchería El Horno. ....                                                                                                                          | 70 |
| <b>Figura 31.</b> Exceso de deuterio versus cantidad de precipitación. A) Estación Picacho. B) Estación Truchería El Horno.....                                                                                                                             | 71 |
| <b>Figura 32.</b> Gradiente altitudinal de $\delta^{18}\text{O}$ de la cuenta del Rio de Oro (Gómez et al., 2015) y gradiente altitudinal $\delta^{18}\text{O}$ local.....                                                                                  | 72 |
| <b>Figura 33.</b> Línea meteórica local del área de estudio (LML) y línea meteórica global (GMWL). ....                                                                                                                                                     | 73 |
| <b>Figura 34.</b> Relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de agua manantial y agua superficial respecto a la Línea Meteórica Local (agua lluvia, rombos azules) y la lluvia promedio ponderada (rombos celestes). .          | 75 |
| <b>Figura 35.</b> Comparación de las variaciones temporales isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ de agua lluvia mensual (Estación Picacho) y manantiales.....                                                                                                | 76 |
| <b>Figura 36.</b> División de la zona de estudio en subsistemas.....                                                                                                                                                                                        | 77 |
| <b>Figura 37.</b> A) Afloramiento de calizas de la Formación Rosablanca. B) Planos de fracturas irregulares por disolución. C) Dolinas. D) Manantial M1. ....                                                                                               | 77 |

|                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 38.</b> Variación temporal de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de los manantiales M1 y M9.....                                                                                                                                   | 78  |
| <b>Figura 39.</b> Bloque diagrama del Subsistema 1 donde se muestran los posibles flujos subterráneos y la composición isotópica de los manantiales M1, M9 y M10.....                                                                                       | 79  |
| <b>Figura 40.</b> A) Escarpe de la Formación Rosablanca. B) Afloramiento de la Formación Rosablanca. C) Grieta con abertura. D) Superficies irregulares. E) Manantial M2.....                                                                               | 80  |
| <b>Figura 41.</b> Variación temporal de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de los manantiales M2, M3, M4, M5 y M8. ....                                                                                                                      | 81  |
| <b>Figura 42.</b> Comparación de los contenidos isotópicos de la lluvia mensual de la Estación Picacho y los manantiales M4 y M8. ....                                                                                                                      | 82  |
| <b>Figura 43.</b> Bloque diagrama del Subsistema 2 donde se muestran los posibles flujos subterráneos y la composición isotópica de los manantiales M2, M3, M4, M5 y M8. ....                                                                               | 84  |
| <b>Figura 44.</b> Variación temporal de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de los manantiales M6 y M7.....                                                                                                                                   | 85  |
| <b>Figura 45.</b> Bloque diagrama del Subsistema 3 donde se muestran los posibles flujos subterráneos y la composición isotópica de los manantiales M6 y M7.....                                                                                            | 85  |
| <b>Figura 46.</b> Comportamiento temporal de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de la lluvia de la Estación Truchería El Horno y metros abajo del cierre de la corriente superficial Quebrada La Moza, a nivel de la Truchería El Horno..... | 86  |
| <b>Figura 47.</b> Estimación de la zona de recarga de los flujos subterráneos.....                                                                                                                                                                          | 89  |
| <b>Figura 48.</b> Esquema de la zona de recarga de los flujos subterráneos.....                                                                                                                                                                             | 90  |
| <b>Figura 49.</b> Hidrograma de la Quebrada Picacho (cada 10 minutos) de los días 6, 7, 8, 9, 10 y 11 de mayo del 2018. ....                                                                                                                                | 94  |
| <b>Figura 50.</b> Hidrograma de la Quebrada Picacho (cada 30 minutos) versus composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y conductividad eléctrica. ....                                                                                                 | 94  |
| <b>Figura 51.</b> Variación temporal de la precipitación y la conductividad eléctrica en la Estación Picacho y Truchería El Horno.....                                                                                                                      | 97  |
| <b>Figura 52.</b> Conductividad eléctrica versus caudal.....                                                                                                                                                                                                | 101 |
| <b>Figura 53.</b> Diagrama Stiff de las aguas manantiales y agua superficial, tomadas en época lluviosa y seca. ....                                                                                                                                        | 105 |
| <b>Figura 54.</b> Diagramas Schöller de las muestras manantiales y agua superficial, tomadas en época lluviosa y seca. ....                                                                                                                                 | 105 |
| <b>Figura 55.</b> Diagrama Piper general de las muestras de manantiales y agua superficial. ....                                                                                                                                                            | 106 |
| <b>Figura 56.</b> Concentración de los iones mayoritarios versus conductividad eléctrica. ....                                                                                                                                                              | 106 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 57.</b> Relación de $\text{HCO}_3^-$ y $\text{Ca}^{2+}$ de las muestras de manantial y agua superficial. ....                                                                                                                                                                            | 109 |
| <b>Figura 58.</b> Modelo hidrodinámico conceptual de la microcuenca quebrada La Moza. Donde, P= Precipitación, ETR= Evapotranspiración Real, R.P= Recarga Potencial, Esc. Sup= Escorrentía Superficial, * = $\delta^{18}\text{O}$ y $\text{HCO}_3\text{Ca}$ = Aguas Bicarbonatadas Cálcidas.. .... | 111 |

### Resumen

**TÍTULO:** MODELO HIDRODINÁMICO DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS EN SISTEMAS CÁRSTICOS Y SU INTERACCIÓN CON LAS ROCAS ADYACENTES. CASO DE ESTUDIO: PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO DE ORO, DEPARTAMENTO DE SANTANDER

**AUTORA:** MARIA ALEJANDRA CETINA TARAZONA

**PALABRAS CLAVES:** MODELO HIDRODINÁMICO CONCEPTUAL, PATRONES DE FRACTURAMIENTO, HIDROLOGÍA, ISOTOPÍA, HIDROQUÍMICA.

En la microcuenca de la quebrada La Moza (nacimiento del Río de Oro) afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, con baja a nula porosidad primaria, y un depósito coluvial. En este sistema se identificaron 10 puntos de manantiales que afloran en rocas de las unidades Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, Formación Los Santos y Formación Rosablanca, así como en el depósito coluvial. Estos puntos de manantiales están asociados a flujos subterráneos por porosidad secundaria generada por fracturamiento, que es aumentada por procesos de disolución (en rocas calcáreas) y por el fenómeno de meteorización (en granodioritas). Se estableció un patrón de fracturamiento principal NE-SW paralelo al eje principal de compresión, que configura fracturas abiertas las cuales propician el flujo de agua subterránea. La evaluación de la disponibilidad de agua en la zona arrojó una oferta hídrica anual de 600 mm y una recarga potencial estimada de 340 mm. Se estableció para la zona un gradiente isotópico altitudinal de  $-0,12\text{‰}$  cada 100 msnm. Se validó el carácter subterráneo de los manantiales (de origen meteórico), evidenciado por la composición isotópica del agua que muestra poca variabilidad temporal y espacial ( $\delta^{18}\text{O}$  de  $-11,5$  a  $-10,1\text{‰}$  -vs VSMOW-), exceptuando algunos manantiales que presentan mezclas con escorrentía subsuperficial. Se establecieron facies hidroquímicas bicarbonatadas-cálcicas, con poca evolución geoquímica y un corto tiempo de residencia de los flujos subterráneos. Se estableció que los flujos subterráneos mantienen el flujo base de las corrientes superficiales con un porcentaje de 70%. La recarga de los flujos subterráneos es local y abarca parte de la cuenca adyacente del Río Jordán donde se localiza el Páramo de Berlín.

**Abstract**

**TITLE:** HYDRODYNAMIC MODEL OF UNDERGROUND FLOWS IN KARSTIC SYSTEMS AND THEIR INTERACTION WITH THE ADJACENT ROCKS. CASE STUDY: HIGH PART OF THE BASIN OF THE RIO DE ORO, DEPARTMENT OF SANTANDER

**AUTHOR:** MARIA ALEJANDRA CETINA TARAZONA

**KEYWORDS:** CONCEPTUAL HYDRODYNAMIC MODEL, FRACTURING PATTERNS, HYDROLOGY, ISOTOPY, HYDROCHEMISTRY.

Metamorphic, igneous and sedimentary rocks, with low to no primary porosity, and a colluvial deposit emerge in the micro-basin of La Moza Creek (source of the Rio de Oro). In this system, 10 points of springs were identified that emerge in rocks of the Cuarzomonzonita and Santa Barbara units, Los Santos Formation and Rosablanca Formation, as well as in the colluvial deposit. These spring points are associated with underground flows due to secondary porosity generated by fracturing, which is increased by dissolution processes (in calcareous rocks) and by meteorization phenomena (in granodiorites). A NE-SW main fracture pattern was established parallel to the main compression axis, which configures open fractures which propitiate the flow of groundwater. The evaluation of water availability in the area showed an annual water supply of 600 mm and an estimated potential recharge of 340 mm. An altitudinal isotopic gradient of - 0.12‰ per 100 masl was established for the zone. The underground character of the springs (of meteoric origin) was validated, evidenced by the isotopic composition of the water that shows little temporal and spatial variability ( $\delta^{18}\text{O}$  de -11,5 a -10,1‰ -vs VSMOW-), except for some springs that present mixtures with subsurface runoff. Ca-HCO<sub>3</sub> hydrochemical facies were established, with little geochemical evolution and a short residence time of underground flows. It was established that the underground flows maintain the base flow of the surface currents with a percentage of 70%. The recharge of the subterranean flows is local and covers part of the adjacent basin Jordan River where the Berlin Paramo is located.

---

Master Thesis

Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, director: Sully Gómez Isidro, Phd.

## Introducción

La zona de estudio del presente trabajo de investigación corresponde al nacimiento del Río de Oro (enmarcado por la quebrada La Moza), donde gran parte de su área se encuentra protegida por el “Parque Natural Regional Bosque Andinos El Rasgón” (CDMB, 2009), resaltándose su importancia en la conservación de sus recursos naturales, debido a que aguas abajo esta cuenca hidrográfica abastece al acueducto Piedecuestana de Servicios Públicos del municipio de Piedecuesta, que cuenta con aproximadamente 150.000 habitantes (Alcaldía de Piedecuesta, 2017). Por otra parte, se ha evidenciado que los manantiales presentes en la zona más alta del área de estudio constituyen la única fuente de agua de los acueductos veredales de zonas más bajas. De acuerdo con lo anterior, se hace indispensable el estudio de los flujos de agua subterránea que permitan la correcta gestión del recurso hídrico, con el fin de proteger y garantizar la sostenibilidad de la oferta hídrica para las comunidades que se benefician de estas fuentes.

La topografía del área se caracteriza por presentar fuertes escarpes y alturas que van de los 2600 a 3500 msnm, clasificándose una parte como zona de páramo húmedo, aledaña al Páramo de Berlín, que forma parte del complejo Jurisdicción de Santurbán (Instituto Humboldt, 2007). El complejo de Santurbán es considerado de gran importancia en el almacenamiento y regulación del recurso hídrico regional, donde se origina el nacimiento de los principales ríos y, posiblemente, puede corresponder a la zona de recarga de los acuíferos presentes en la región Oriental de Colombia. Por otro lado, el área de estudio se ubica dentro del Macizo de Santander, donde afloran rocas metamórficas del paleozoico, rocas ígneas jurásicas y una faja sedimentaria jurásica-cretácica, cuyo interés hidrogeológico radica en la porosidad secundaria generada por los sistemas de fracturación y procesos de meteorización que permiten el desarrollo de acuíferos poco

profundos (INGEOMINAS -UIS, 2007; Gómez, 2014), donde se ha reportado una continuidad hidráulica de los flujos, los cuales se encuentran conectados con los acuíferos (superficial y profundo) presentes en el abanico de Bucaramanga (Rueda, 2013; Gómez *et al.*, 2015).

El objeto del presente trabajo de investigación consistió en analizar y comprobar la existencia de acuíferos cársticos y/o flujos subterráneos en rocas carbonatadas (sistemas cársticos) y su relación con los posibles acuíferos porosos y fracturados y/o flujos subterráneos presentes en rocas siliciclásticas y cristalinas, basándose en las siguientes preguntas de investigación: ¿Existen acuíferos en los sistemas cársticos y en las rocas cristalinas y siliciclásticas de la zona de estudio? ¿Cuál es el origen y cómo ocurren los flujos de agua subterránea que alimentan el posible sistema acuífero cárstico en el sector Picacho (modelo físico)? ¿Estos flujos se encuentran conectados con los posibles acuíferos desarrollados en las rocas siliciclásticas y cristalinas que afloran tanto en el sector Picacho como en el Páramo de Berlín? Y, finalmente, ¿Los flujos de aguas subterráneas del sector Picacho y/o de Berlín mantienen el flujo base de la parte alta del Río de Oro?

Para resolver los anteriores cuestionamientos, se realizó un estudio hidrodinámico que permitió realizar la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual enfocado en: cartografía geológica, análisis de las estructuras geológicas, información hidrológica e inventario de puntos de agua. El modelo fue corroborado por medio del análisis de la composición hidroquímica e isotópica del agua lluvia, agua subterránea y agua de corrientes superficiales. A partir de los resultados se construyó un bloque diagrama explicativo de cómo podría funcionar el sistema hidrogeológico en la zona de estudio.

El presente trabajo de investigación se encuentra dividido en seis capítulos. El primer capítulo corresponde a la introducción del trabajo, el segundo capítulo muestra los objetivos, el tercer

capítulo hace referencia a las generalidades, donde se describe la localización del área de estudio, sus aspectos fisiográficos y la metodología planteada para el desarrollo de la investigación, resaltándose el diseño de las campañas de muestreos de las aguas lluvia, subterráneas y de corrientes superficiales. El cuarto capítulo trata sobre el marco de referencia que abarca los temas de geología, hidrología e hidrogeología, donde se expone el conocimiento previo de la zona de estudio. El quinto capítulo corresponde al análisis de los resultados que abarcan el modelo geológico y análisis estructural, la interpretación de los datos hidrológicos y el análisis de la composición isotópica e hidroquímica del agua, todo lo anterior integrándose en el modelo físico de los flujos subterráneos presentes en el área de estudio. Finalmente, el capítulo número seis presenta las conclusiones de la investigación.

La generación de esta información base podrá mejorar las políticas y programas de mitigación enmarcadas en la Gestión Integral del Recurso Hídrico por parte de las administraciones municipales relacionadas (Tona y Piedecuesta) y de la corporación ambiental competente, para la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo y, a su vez, de los flujos base de las corrientes superficiales en zonas rurales.



## **1. Objetivos**

### **1.1.Objetivo General**

Proponer el modelo físico de los flujos de agua subterránea que circulan en los sistemas cársticos y su interacción con los desarrollados en rocas siliciclásticas y cristalinas, presentes en la Parte Alta del Rio de Oro y en las zonas de Páramo alrededor del Alto El Picacho, mediante el estudio de las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y el estudio dinámico de las propiedades fisicoquímicas, hidroquímicas e isotópicas del agua subterránea.

### **1.2.Objetivos Específicos**

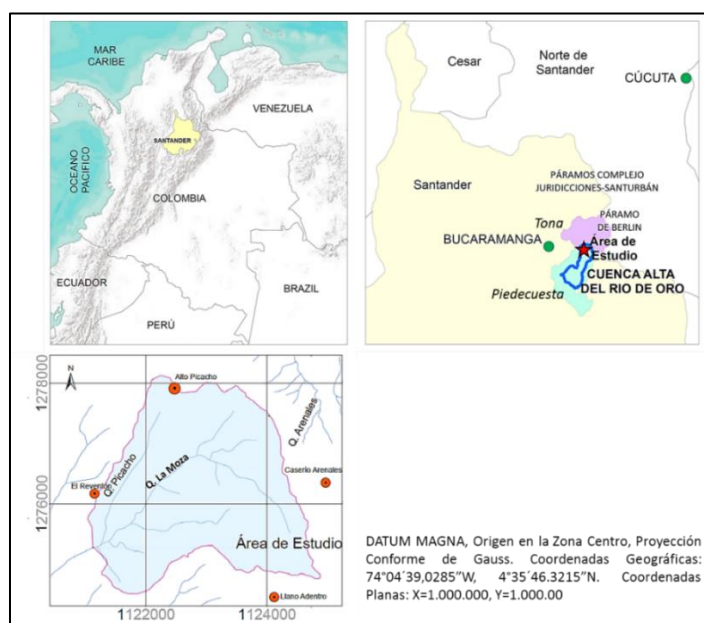
- Elaborar el modelo geológico de la zona de estudio a partir de la cartografía geológica a escala 1:10.000, la geomorfología y el análisis cinemático de las estructuras presentes, como base para el modelo hidrogeológico conceptual.
- Caracterizar las aguas subterráneas de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, hidroquímicas e isotópicas, por medio de mediciones realizadas a lo largo del año, con el fin de establecer en los diferentes puntos de agua subterránea sus relaciones e identificar posibles direcciones de flujos subterráneos.
- Identificar las zonas de recarga de los flujos de agua subterránea presentes en las rocas carbonatadas, siliciclásticas y cristalinas, por medio del análisis de firmas isotópicas.
- Estudiar el flujo base del nacimiento del Rio de Oro (quebrada la Moza), a partir de la medición de caudales en épocas de estiaje que permita tener una estimación de la proporción del agua subterránea en la corriente.

## 2. Generalidades

Se presentan las generalidades del proyecto de investigación que incluye la localización y características fisiográficas del área de estudio, así como la metodología empleada.

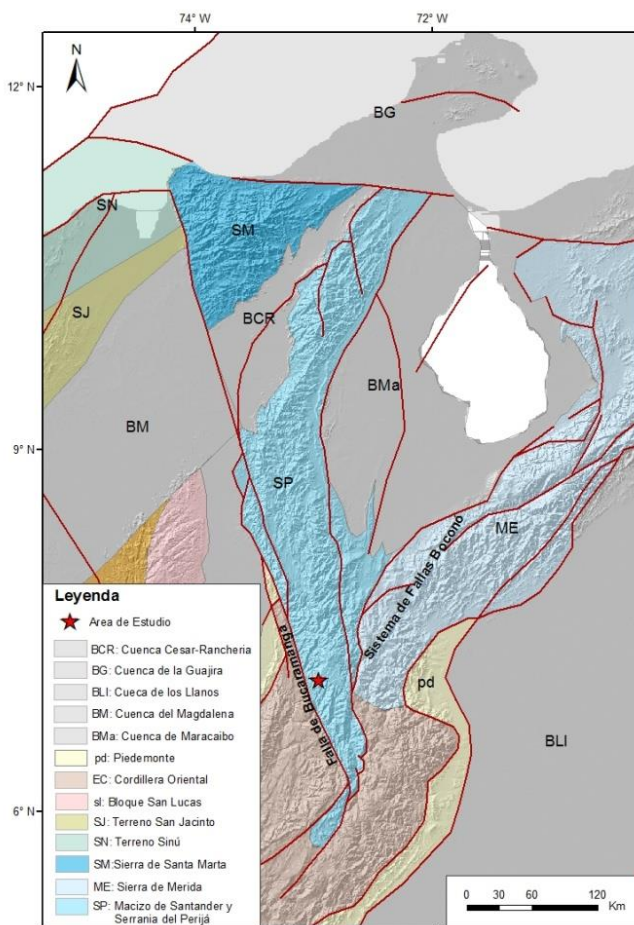
### 2.1. Localización y Aspectos Fisiográficos del Área de Estudio

El área de estudio se encuentra enmarcada por la microcuenca hidrográfica de la quebrada La Moza (nacimiento del Río de Oro), ubicada dentro del municipio de Tona en límites con el municipio de Piedecuesta, al noreste del departamento de Santander a 46 Km de la ciudad de Bucaramanga, y hace parte de la cuenca del Río de Oro, justamente en la divisoria con la cuenca del Río Jordán que drena sus aguas hacia el departamento de Norte de Santander, alimentando al río Chitagá y después al Río Arauca. Localmente, la microcuenca se encuentra limitada al norte por el sitio conocido como Alto El Picacho, al este por el caserío Arenales, al sur por la vereda Llano Adentro y al Occidente por la vereda Reventón (**Figura 1**).



**Figura 1.** Localización geográfica del área de estudio.

Colindante a la zona de estudio se encuentra el Páramo de Berlín, que hace parte del complejo Páramos Complejo Jurisdicciones Santurbán (Instituto Humbolt, 2007). Por otro lado, en un contexto geológico regional, el área de estudio se encuentra ubicada en el Macizo de Santander (Cordillera Oriental de los Andes Colombianos), limitado al sur-oeste por la Falla Bucaramanga y al sur-este por el Sistema de Fallas Boconó (Cediel *et al.*, 2003; **Figura 2**).

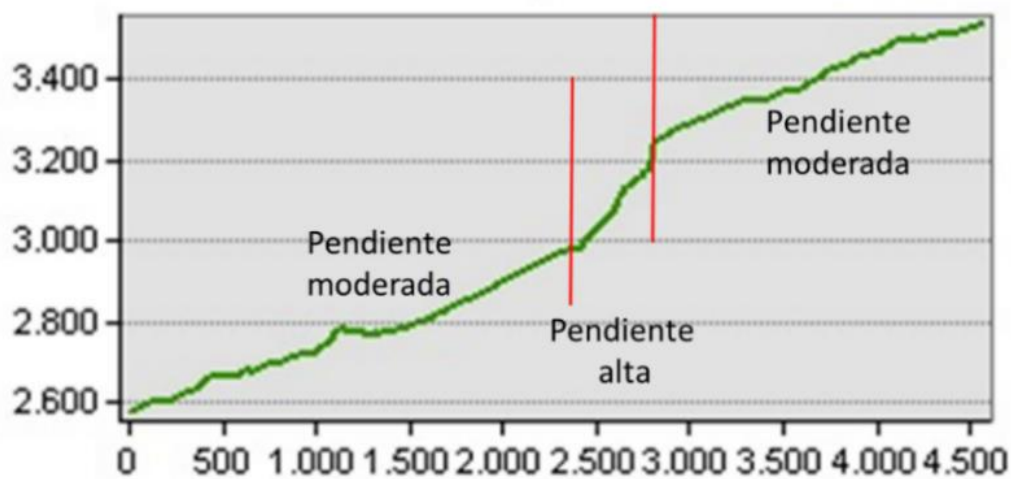


**Figura 2.** Localización geológica del área de estudio a nivel regional. Tomado y modificado de Cediel *et al.* (2003).

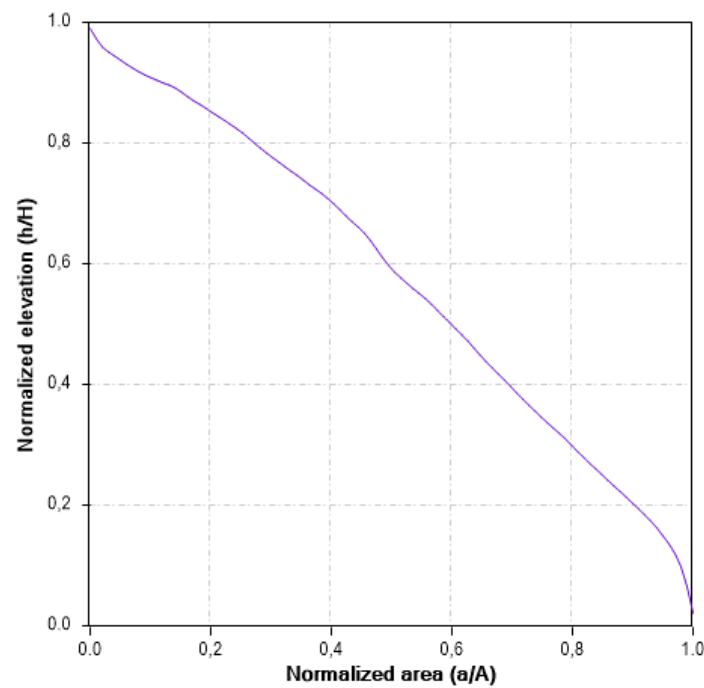
Específicamente, la microcuenca de la quebrada La Moza es de tipo exorreico y de alta montaña (alturas desde 2500 a 3500 msnm). Presenta un área de 9 Km<sup>2</sup> con una topografía abrupta que

forma franjas con fuertes escarpes. La corriente principal en su punto de cierre es de orden cuarto (calculado a escala 1:60.000) y presenta una densidad de corrientes ( $D_s$ ) de 2,8. Se determina una pendiente moderada de  $\approx 15\%$  y, a partir del análisis del perfil longitudinal, se observa una zona con pendiente alta y dos zonas con pendiente moderada (**Figura 3**), que permite inferir una alta velocidad de respuesta al escurrimiento.

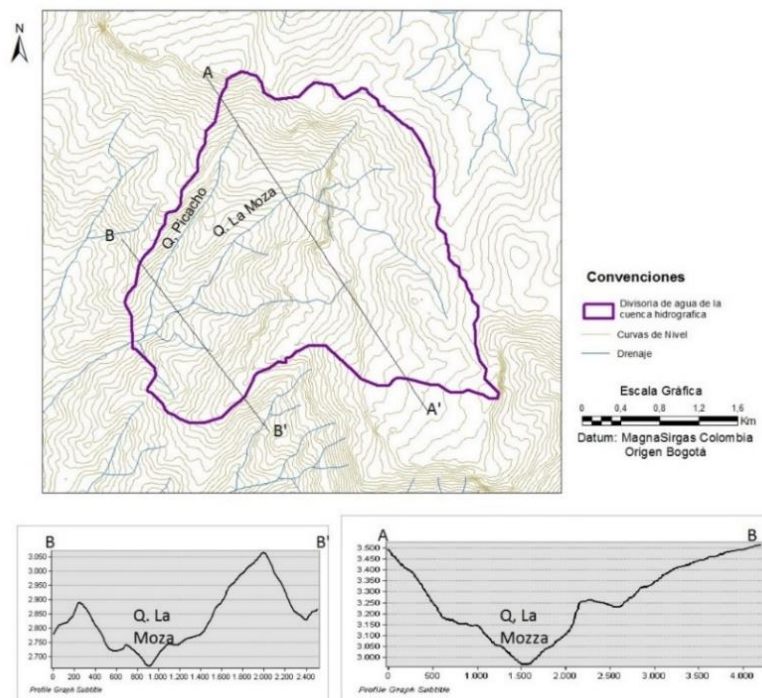
Por otro lado, a partir de la curva hipsométrica generada de la microcuenca (**Figura 4**), se puede inferir que se encuentra afectada por procesos erosivos en la mayoría del área, pues la curva es ligeramente cóncava hacia abajo (Strahler, 1952). Sin embargo, también se observa que la parte alta de la curva es cóncava hacia arriba, indicando espacio para la acumulación de sedimentos (Strahler, 1952). Finalmente, se realizaron cortes transversales de la cuenca, donde se observa que la quebrada La Moza geomorfológicamente presenta un cauce en V, con un mayor pronunciamiento en la parte baja, mostrando en sus laderas cambios bruscos en las pendientes, los cuales pueden corresponder a posibles cambios litológicos (**Figura 5**).



**Figura 3.** Pendientes moderadas y altas visualizadas del perfil longitudinal del cauce de la quebrada La Moza.



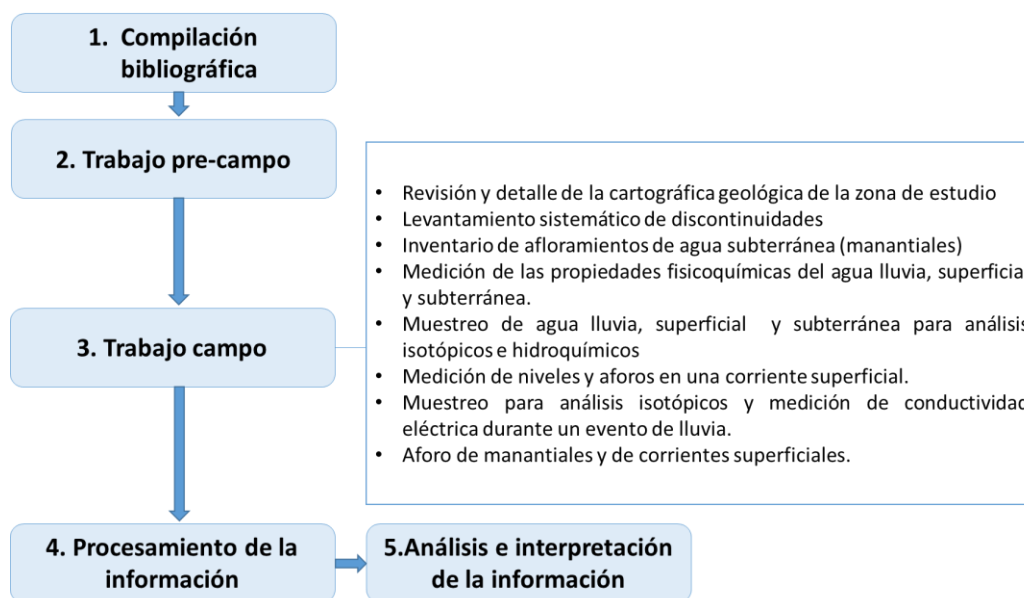
**Figura 4.** Curva Hipsométrica de la microcuenca hidrográfica de la quebrada La Moza.



**Figura 5.** Cortes transversales (A-A') y (B-B') de la microcuenca hidrográfica de la quebrada La Moza.

## 2.2. Metodología

De acuerdo con el objetivo general y los objetivos específicos planteados, a continuación, se definen los pasos y procedimientos que se siguieron para la realización del trabajo de investigación (**Figura 6**), los cuales se dividen en 5 etapas: 1) Compilación bibliográfica, 2) Trabajo pre-campo, 3) Trabajo de campo, 4) Procesamiento de la información, 5) Análisis e interpretación de la información.



**Figura 6.** Esquema general de la metodología usada en el trabajo de investigación.

### Compilación Bibliográfica

La consulta bibliográfica consistió en referencias científicas y una recopilación de los trabajos anteriores realizados en la zona de estudio, que se limitan a las áreas de geología, hidrología e hidrogeología.

A nivel de la geología de la zona, se cuenta con la cartografía geológica oficial en los trabajos de Ward *et al.* (1977) e INGEOMINAS (2006). Por otro lado, en Velandia (2010) se propone el

modelo estructural de la zona centro del Macizo de Santander a nivel regional y en el trabajo de grado de Bejarano y Navas (2018), se aborda con más detalle parte de la geología estructural del área de estudio. En el área de la hidrología e hidrogeología se cuenta con los trabajos de INGEOMINAS-UIS (2007), INGEOMINAS (2009), Rueda (2013), Gómez *et al.* (2015), Gómez y Gómez, (2016), entre otros. Los datos de hidrología fueron tomados de 5 estaciones, 3 pluviométricas y 2 climáticas (**Tabla 1**), de las cuales la estación El Picacho se encuentra localizada dentro del área de estudio y las otras son cercanas.

| Estación    | Tipo          | Entidad Operadora | Series de Tiempo Disponibles        | Parámetros                                   | Coordenadas |         | Altura (msnm) |
|-------------|---------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|-------------|---------|---------------|
|             |               |                   |                                     |                                              | Norte       | Este    |               |
| EL PICACHO  | Pluviométrica | IDEAM             | 1967-2018                           | Precipitación                                | 1277828     | 1123563 | 3435          |
| BERLIN      | Climática     | IDEAM             | 1969-2017                           | Precipitación, temperatura, humedad relativa | 1286396     | 1133945 | 3250          |
| LA GALVICIA | Pluviométrica | IDEAM             | 1968-2004                           | Precipitación                                | 1279371     | 1113124 | 1779          |
| EL RASGÓN   | Climática     | CDMB              | 1987-2010<br>1995-2000<br>2013-2016 | Precipitación, temperatura, humedad relativa | 1270294     | 1119914 | 1950          |
| LA MARIANA  | Pluviométrica | IDEAM             | 1981-2009                           | Precipitación                                | 1280310     | 1117627 | 2250          |

**Tabla 1.** Información hidrológica disponible.

### Trabajo Pre-campo

En esta etapa se realizó el procesamiento e interpretación del modelo de elevación digital (DEM) de la zona de estudio, generado a partir de una imagen de radar del 2011 que fue descargada desde la página Alaska Satellite Facility (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>), tomada por el satélite ALOS (operado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, JAXA) a través del sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar). La imagen de radar ALOS PALSAR presenta una resolución espacial de 12,5 m con un tamaño de escena de 50 x 70 Km. A partir del DEM se elaboró el mapa de pendientes y de sombras de la zona de estudio, que

permitieron realizar una interpretación preliminar de la geología y planear el trabajo de campo enfocado en la cartografía geológica y en la identificación de los principales rasgos estructurales.

### Trabajo de campo

El trabajo de campo se llevó a cabo en las siguientes etapas:

#### Etapas Inicial

Se realizó el reconocimiento de la zona de estudio y la verificación e identificación de los puntos de afloramiento de agua subterránea (manantiales), teniendo en cuenta para ello el inventario de manantiales existentes en el área de estudio, encontrados en las bases de datos del grupo GPH y del Servicio Geológico Colombiano (antiguo INGEOMINAS). A partir de la información existente y del reconocimiento en campo de los manantiales, en época de verano, se identificaron 10 manantiales representativos que presentan una buena distribución espacial (**Tabla 2, Figura 7**).

| Código de Manantial | Cordenadas |         | Altura<br>(msnm) |
|---------------------|------------|---------|------------------|
|                     | Norte      | Este    |                  |
| M1                  | 1277662    | 1122361 | 3285             |
| M2                  | 1275458    | 1123928 | 3441             |
| M3                  | 1275595    | 1124485 | 3556             |
| M4                  | 1275410    | 1123808 | 3444             |
| M5                  | 1275133    | 1123386 | 3341             |
| M6                  | 1276758    | 1124056 | 3437             |
| M7                  | 1276829    | 1124041 | 3447             |
| M8                  | 1275612    | 1123441 | 3301             |
| M9                  | 1277518    | 1122516 | 3277             |
| M10                 | 1276964    | 1122659 | 3056             |

**Tabla 2.** Ubicación de los manantiales de la zona de estudio.



### Fase de cartografía geológica

Se realizaron dos salidas de campo, una destinada a la revisión y detalle de la cartografía geológica y otra enfocada al levantamiento sistemático de los planos de discontinuidades presentes en las rocas.

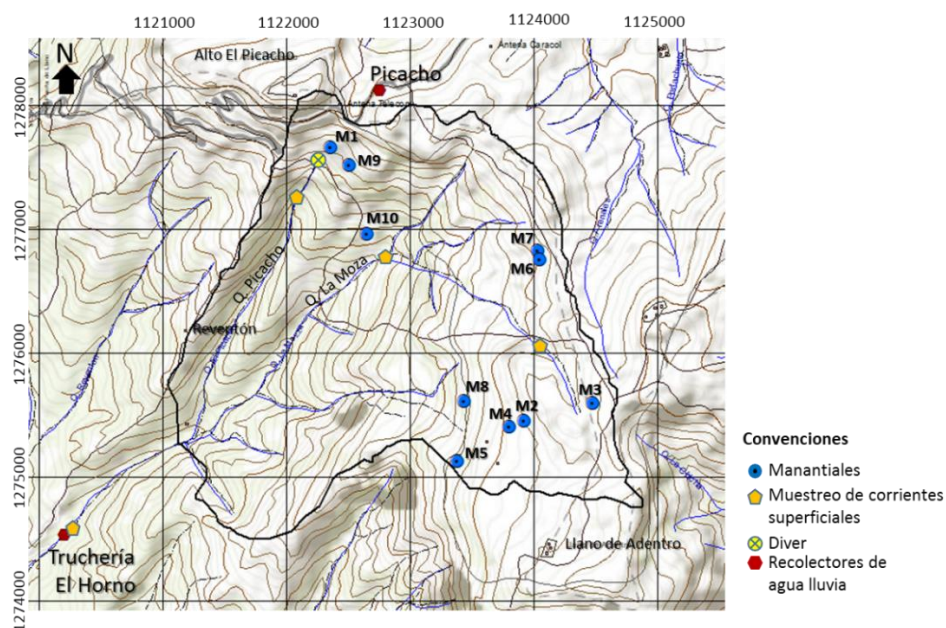
### Fase de diseño y campañas de muestreo

Se realizaron salidas de campo para el muestreo de los diferentes tipos de agua, que fueron objeto de análisis isotópicos e hidroquímicos. Los análisis hidroquímicos fueron determinados en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander (UIS), por medio de los métodos titrimétrico, turbidimétrico, espectrofotométrico y absorción atómica. Por su parte, los análisis isotópicos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Isotopos Estables LAMA de la universidad de Montpellier de Francia, usando un espectrómetro de masas radio isotopos ISOPRIME (IRMS, por sus siglas en inglés).

- . Muestreo de agua lluvia

Para el muestreo de agua lluvia se instalaron en el mes de junio del 2017 dos recolectores de agua (o totalizadores), uno en la parte alta de la microcuenca, al lado de la estación pluviométrica El Picacho del IDEAM, y el otro, metros abajo del cierre de la quebrada, en predios de la Truchería El Horno (**Tabla 3, Figura 7 y 8**). De estos recolectores se tomó muestras compuestas mensuales para análisis isotópicos durante 15 meses, de julio del 2017 a septiembre del 2018, con el fin de obtener un ciclo anual completo para la construcción de la línea meteórica local. En los primeros 11 meses se pudo medir parámetros fisicoquímicos (conductividad eléctrica, temperatura y pH), sobre el agua recolectada. Se debe tener en cuenta que la medida de los parámetros fisicoquímicos

no se relaciona directamente con el agua lluvia, debido a la presencia de partículas finas en los recolectores que modifica la señal original del agua lluvia, por tanto, estos datos solo se usaron para realizar una comparación aproximada con los parámetros del agua subterránea. Los parámetros fisicoquímicos se midieron usando los equipos portátiles conductivímetro y pH-metro marca Mettler Toledo, los cuales fueron calibrados antes de cada muestreo. Para la toma de muestras se siguió el protocolo de muestreo, para garantizar la validez de la muestra, descrito en el trabajo de grado de Camacho y Guzmán (2005).



**Figura 7.** Localización de los manantiales, puntos de muestreo de corrientes superficiales, ubicación de Diver y de los recolectores de agua lluvia de la zona de estudio.

| Código de la Estación | Cordenadas |         | Altura (msnm) |
|-----------------------|------------|---------|---------------|
|                       | Norte      | Este    |               |
| Picacho               | 1277993    | 1122638 | 3435          |
| Truchería El Horno    | 1274535    | 1120202 | 2440          |

**Tabla 3.** Ubicación de los recolectores de agua lluvia de la zona de estudio



**Figura 8.** A) Recolector de agua lluvia Picacho. B) Recolector de agua lluvia Truchería El Horno.

- Muestreo de agua subterránea

Se diseñaron dos campañas principales de muestreo de agua subterránea (una en época seca y otra en época lluviosa) en los meses de octubre 2017 y febrero 2018, para análisis hidroquímicos e isotópicos, con el fin de realizar la caracterización isotópica e hidroquímica de las aguas subterráneas. Complementario a estas campañas se realizó un muestreo para análisis isotópicos en cuatro meses (mayo-2017, marzo-2018, mayo-2018, junio-2018), de los manantiales más accesibles, con el fin de observar la variabilidad isotópica temporal y espacial.

El muestreo de aguas subterráneas, para análisis hidroquímicos, siguió también un protocolo que permitiera asegurar la validez de la muestra y la representatividad del agua del acuífero o de los flujos subterráneos objeto de estudio, donde se tuvo en cuenta las normas NTC-ISO 5667-11 (2003) “Guía para el muestreo de aguas subterráneas” y NTC-ISO 5667-3 (2003) “Directrices para la conservación y el manejo de muestras”. El protocolo en el muestreo para análisis isotópicos incluye que la muestra debe recolectarse lo más cercano posible al punto del afloramiento de agua, acompañado de la medición de parámetros fisicoquímicos (conductividad eléctrica, temperatura y pH) y del caudal del manantial. En zonas de alta montaña, con manantiales de bajos

caudales, fue posible realizar aforos volumétricos que presentan un error, estimado por la sensibilidad de los recipientes usados, de 0,1 a 1 litro.

- Muestreo de agua superficial

El muestreo de agua de corrientes superficiales se realizó en tres partes de la quebrada La Moza (metros a bajo de su nacimiento, en su parte media alta y metros a bajo de su cierre) y en la quebrada Picacho (**Tabla 4 y Figura 7**). En el mes de febrero de 2018, se tomó una muestra para análisis hidroquímicos e isotópicos de la parte media alta de la quebrada La Moza; y durante los primeros días de los meses de enero, febrero, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre del 2018, se tomaron muestras para análisis isotópicos metros más abajo del cierre de la microcuenca, con el fin de observar la variabilidad isotópica temporal de las aguas superficiales en este punto de la corriente. Así mismo, se realizó el aforo de 4 corrientes superficiales durante el mes de agosto 2018 (época seca), en la quebrada Picacho y en las diferentes partes de la quebrada La Moza, los cuales fueron acompañados de muestreos isotópicos, con el fin de estimar la variabilidad isotópica espacial del agua superficial de la microcuenca hidrográfica.

| Corriente Superficial                                   | Cordenadas |         | Altura<br>(msnm) |
|---------------------------------------------------------|------------|---------|------------------|
|                                                         | Norte      | Este    |                  |
| Qb. La Moza metros abajo del nacimiento                 | 1276085    | 1124043 | 3442             |
| Qb. La Moza Parte Media Alta                            | 1276800    | 1122802 | 2975             |
| Trucheria El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | 1274535    | 1120202 | 2440             |
| Qb. Picacho                                             | 1277097    | 1122114 | 2978             |

**Tabla 4.** Ubicación de los muestreos de agua superficial.

Se debe tener en cuenta en el muestreo para análisis isotópicos que la muestra debe recolectarse de la zona central de la quebrada o río, o de una zona donde se observe que el agua se encuentra

en movimiento, esto con el fin de evitar aguas estancadas que pueden presentar procesos de evaporación y de obtener una muestra bien mezclada que sea representativa de la corriente de agua.

Finalmente, se instaló un medidor de niveles de agua (diver) en el nacimiento de la quebrada Picacho (**Figura 7**), programado con un intervalo de tiempo de cada 10 minutos, y se realizaron 4 aforos para obtener la curva de calibración y generar el respectivo hidrograma. Este medidor se ubicó cerca del manantial M1, que aflora en rocas calizas de la Formación Rosablanca, para poder observar la respuesta de este sistema cárstico ante eventos de lluvia y eventos de recesión. Para ello, también se realizó un muestreo durante eventos de lluvia los días 7, 8 y 9 de mayo de 2018, donde se analizó el contenido isotópico y los valores reportados de conductividad eléctrica.

#### **Procesamiento de la Información:**

El procesamiento de la información se realizó mediante el uso de software especializado en cada una de las áreas. El modelo geológico fue elaborado a partir de la cartografía geológica existente, la interpretación de la imagen de radar ALOS PALSAR y la información obtenida en campo de los afloramientos de roca. Toda la información cartográfica fue integrada en el sistema de información geográfica *ArcGIS* 10.4 y el procesamiento de los planos de discontinuidades se realizó usando el software *TectonicsFP* 1.7.7. La información hidrológica e isotópica fue procesada en Excel y los datos de hidroquímica en el software *Diagrammes*.

#### **Interpretación y Análisis de Resultados:**

En esta fase se realizó la interpretación y el análisis de la información obtenida, arrojando como resultados el modelo geológico, la caracterización hidrológica del área de estudio, el comportamiento espacial y temporal de la composición isotópica del agua lluvia, de los

manantiales y de las corrientes superficiales, las facies hidroquímicas del agua y los procesos geoquímicos identificados. Las interpretaciones y el análisis de los resultados permitieron proponer el modelo hidrodinámico conceptual de la zona de estudio, dando cumplimiento al objetivo principal del presente estudio.

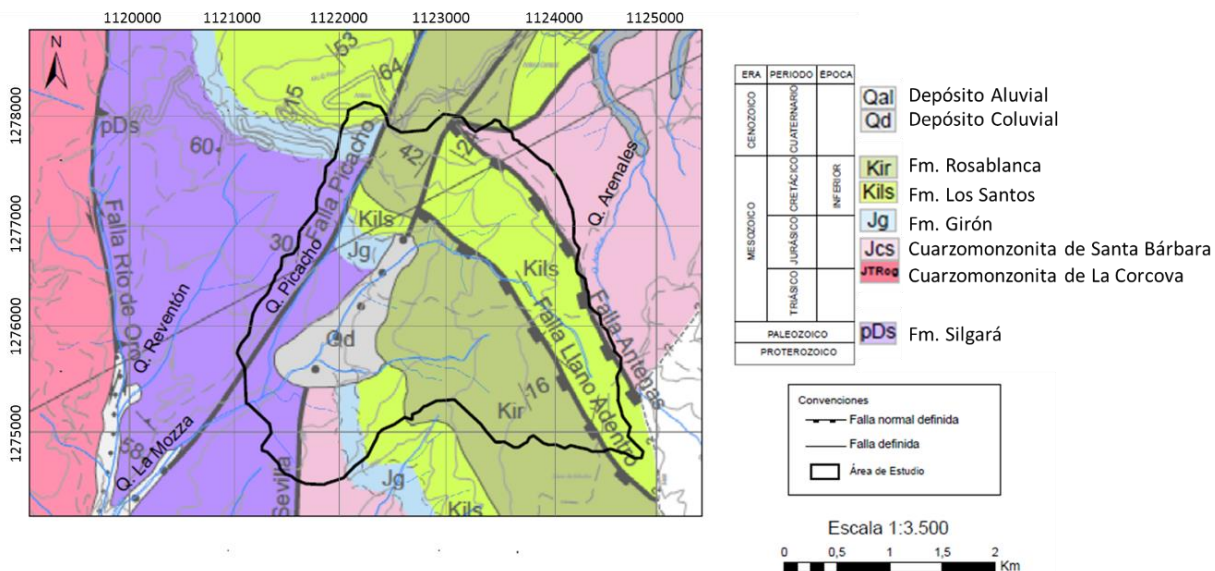
### **3. Marco de Referencia**

El marco de referencia del presente trabajo de investigación se centró en exponer el estado actual del conocimiento de la zona de estudio, limitándose a las áreas de geología, hidrología e hidrogeología.

#### **3.1. Geología Regional**

Como se mencionó anteriormente, el área de estudio se encuentra ubicada en el Macizo de Santander (Cordillera Oriental de los Andes Colombianos). Según el esquema estructural de Royero y Clavijo (2001) el área se ubica en el bloque Ocaña, caracterizado tectónicamente por presentar un estilo estructural de fallamiento en bloques, separados por fallas inversas en dirección SW-NE. La zona es interpretada como un bloque levantado donde afloran rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que abarcan edades desde el Proterozoico hasta el Cretácico, con depósitos cuaternarios recientes (Ward *et al.*, 1973). Este bloque presenta un régimen transcurrente que se relaciona al arrastre producido por el bloque colgante de la Falla Bucaramanga (Velandia, 2010).

La cartografía geológica oficial más reciente (INGEOMINAS, 2006), muestra que en la zona afloran rocas metamórficas de la Formación Silgara, compuesta por esquistos, filitas y cuarcitas; rocas ígneas de las unidades Cuarzomonzonita de La Corcova, que localmente varía a granito, y Cuarzomonzonita de Santa Bárbara; y una faja sedimentaria conformada por la Formación Girón, compuesta por areniscas de grano medio a fino, localmente conglomeráticas, intercaladas con limolitas; la Formación Lo Santos, que presenta cuarzoarenitas de grano medio a muy grueso ligeramente conglomeráticas, con intercalaciones de lodolitas silíceas al tope; y la Formación Rosablanca, que presenta calizas micriticas con niveles de conchas de bivalvos fragmentadas, calizas con aportes terrígenos y delgados niveles de limolitas (**Figura 9**).



**Figura 9.** Parte del mapa geológico publicado por INGEOMINAS (2006).

De acuerdo con lo anterior, el basamento del área de estudio corresponde a las rocas metamórficas de la Formación Silgará, recientemente redefinida para la zona como Esquistos del Silgará, para la cual se reporta una edad de metamorfismo del Paleozoico inferior asociada al evento orogénico Quetame-Caparoneis (Mantilla *et al.*, 2016), intruida por cuerpos ígneos que

reportan una edad de 195 y 192 Ma, asociados al magmatismo Jurásico que afectó el Macizo de Santander (Ward *et al.*, 1973). Suprayaciendo discordantemente estos cuerpos se encuentra la secuencia sedimentaria con edades Jurásico-Cretácico Inferior de la Formación Girón (Royero y Clavijo, 2001), Valangeniense-Hauteriviense de la Formación Los Santos (Ward *et al.*, 1973) y Hauteriviense medio y tardío de la Formación Rosablanca (Guerrero, 2002), según estudios paleontológicos y estratigráficos.

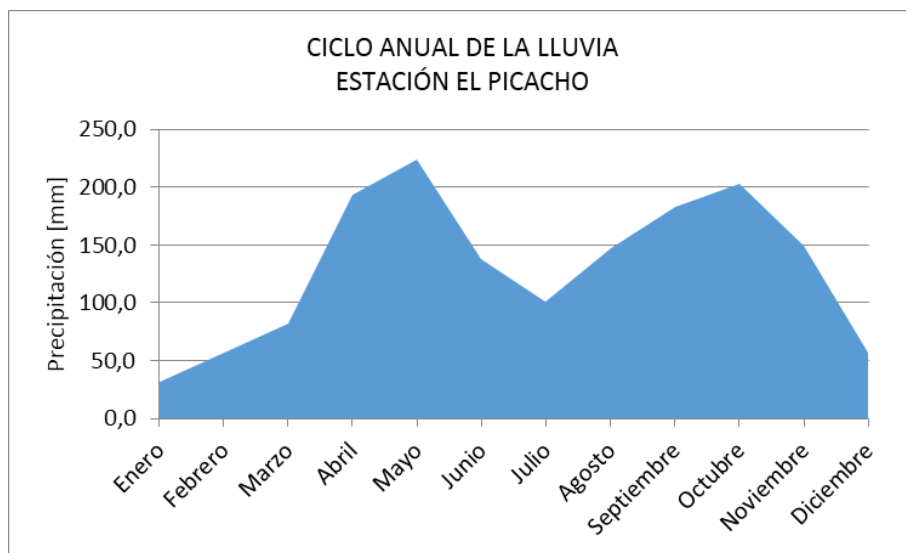
Velandia (2010) plantea el modelo estructural para la zona centro del macizo de Santander, donde determina un régimen transcurrente que da lugar a zonas abiertas que pueden favorecer el paso de fluidos como el agua subterránea. Adicional a lo anterior, se han realizado diferentes trabajos de grado que aportan aproximaciones a la geología estructural de la zona de estudio, resaltando el trabajo de Bejarano y Navas (2018), donde establecen la cinemática de las estructuras y se propone un tensor de esfuerzo en rumbo, con un eje principal de compresión ( $\sigma_1$ ) en dirección N77E/02 y un eje principal de tensión ( $\sigma_3$ ) en dirección N12W/23, muy importante a la hora de establecer la dirección de las fracturas de tensión en el área.

### 3.2. Aspectos Hidrológicos

En el Macizo de Santander se ha establecido un régimen de precipitación bimodal, con dos épocas lluviosas en Marzo –Abril y en Octubre – Noviembre, y dos épocas secas en Junio – Julio y en Diciembre – Enero (Arenas y Ruiz, 2005). Este comportamiento es típico de la región Andina Colombiana, influenciado principalmente por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), con variaciones en algunos años por la presencia del fenómeno ENSO (Poveda *et al.*, 2011). El ciclo anual de la lluvia en la zona de estudio se muestra por medio de los datos de la



estación El Picacho (años 1967-2017), de los cuales se determina una precipitación media anual de 1544 mm (**Figura 10**).



**Figura 10.** Ciclo anual de la Lluvia registrado en la Estación El Picacho (años 1967 – 2017).

La Parte Alta del Rio de Oro hace parte de la cuenca Superior del Rio Lebrija, en donde diferentes estudios han abordado la hidrología (e.g. Arenas y Ruiz, 2005; INGEOMINAS -UIS, 2007 y Rueda, 2013), reportando valores de precipitación multianual promedio de 1206 a 1217 mm/año; evapotranspiración real multianual promedio de 690 a 780 mm/año; cálculo de escorrentía directa multianual promedio de 113 mm/año y oferta hídrica anual promedio entre 374 y 734 mm/año. Así mismo, ha sido evaluada la recarga potencial para esta cuenca, arrojando un valor promedio de 192 mm, con valores mayores en las áreas de Tona y Charta, que varían de 400 a 500 mm/año.

El clima de la zona de estudio está determinado por la orografía de la zona y las masas de humedad que se relacionan con los aspectos físicos de la cuenca. El Atlas Climatológico de Colombia reporta una temperatura media anual de 6 a 12°C, clasificando la zona en el piso térmico

Muy frio y una clasificación climática de Muy Frio seco (IDEAM, 2005). Según la clasificación de Holdridge (1967), para las elevaciones que abarcan la zona de estudio, de 2720 a 3650 msnm, la provincia climática corresponde a bosque húmedo montano.

Finalmente, cabe resaltar que para la cuenca Alta del Rio de Oro se reporta una componente del flujo base anual de aproximadamente 80%, el cual es alimentado por los sistemas subterráneos (Gómez y Gómez, 2012; Machuca, 2012; Arias *et al.*, 2015; Gómez y Gómez, 2016).

### 3.3.Aspectos Hidrogeológicos

El Macizo de Santander constituye un sistema físico de características hidrogeológicas particulares por estar conformado en su mayoría por rocas cristalinas de baja a nula porosidad primaria, pero que por los procesos de meteorización y fracturamiento de las rocas se han generado niveles con altos grados de porosidad secundaria y espesores considerables (Colegal *et al.*, 2017).

Las principales características hidrogeológicas de las unidades que afloran en el área de estudio son resumidas en la **Tabla 5**, de acuerdo a lo planteado por INGEOMINAS-UIS (2007). En este mismo trabajo, se definieron siete zonas de interés hidrogeológico en todo el macizo, donde el área de estudio corresponde a la Zona de Interés Hidrogeológico (ZIH) III, caracterizada por presentar rocas de composición silícea y calcárea, con porosidad primaria y secundaria a partir de procesos de disolución y fracturamiento, de alto interés hidrogeológico (**Figura 11**). Estas características también fueron vistas en el trabajo de campo realizado a una escala más detallada, las cuales fueron de gran importancia al momento de proponer los flujos subterráneos.

| UNIDAD GEOLÓGICA                 | CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS                                                                                                                                                                          | IMPORTANCIA<br>HIDROGEOLÓGICA                   |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Formación Silgará                | Espesor de meteorización de hasta 2 m, con minerales arcillosos de alteración que generan baja permeabilidad                                                                                             | Barrera del flujo                               |
| Cuarzomonzonita de La Corcova    | Espesor de meteorización de hasta 12 m, con texturas arenosas y buena porosidad.                                                                                                                         | Acuífero Libre                                  |
| Cuarzomonzonita de Santa Bárbara | Perfiles de meteorización en la superficie con texturas arenosas y buena porosidad.                                                                                                                      | Acuífero Libre                                  |
| Formación Girón                  | Texturalmente es una arenisca mal calibrada y compacta. No presenta un espesor y exposición areal considerables.                                                                                         | Acuífero                                        |
| Formación Los Santos             | Baja porosidad primaria y alto grado de fracturamiento. Presenta niveles blandos.                                                                                                                        | Acuitardo<br>Acuífero<br>Acuífugo               |
| Formación Rosa Blanca            | Altamente fracturada con diaclasas abiertas que generan un grado alto de permeabilidad. Presenta un grado de meteorización medio – alto. Los Procesos de disolución favorecen el grado de permeabilidad. | Acuífero libre<br>(alto grado de productividad) |

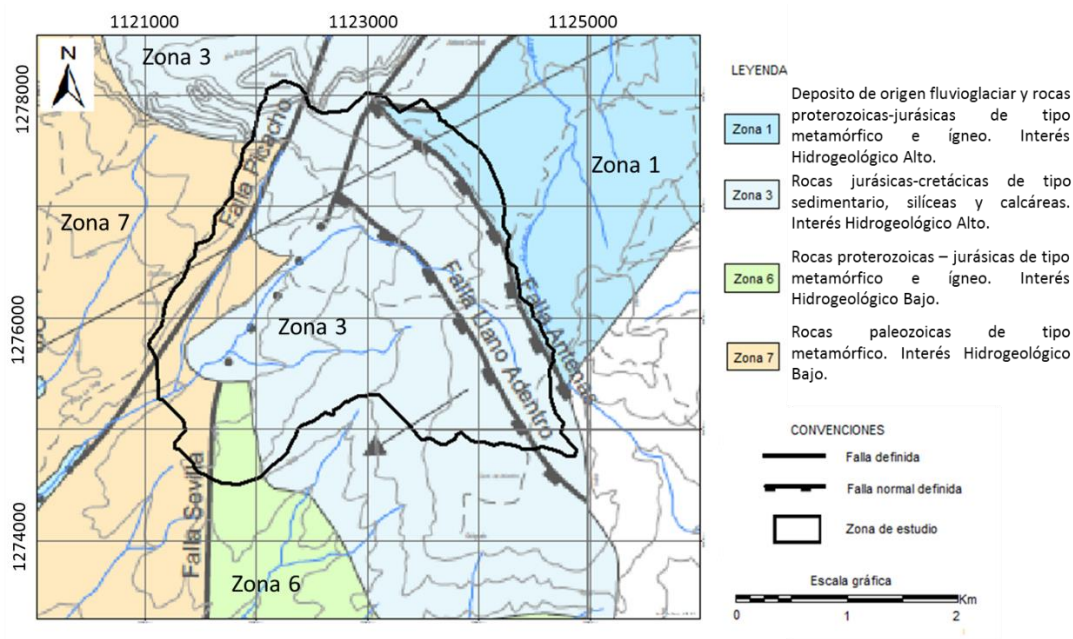
**Tabla 5.** Características e importancia hidrogeológica de las unidades geológicas del área de estudio según INGEOMINAS -UIS (2007).

Dentro de la información hidrogeológica existente, también se cuenta con inventarios de puntos de afloramientos de agua subterránea (INGEOMINAS, 2009; Castillo y Hernández, 2013; Rueda 2013). Dentro del inventario presentado por INGEOMINAS (2009) se resaltan los bajos valores de caudales (0,1 a 2 l/s) reportados, y que en algunos manantiales que afloran en unidades de naturaleza silicatada (Formación Silgara, Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y Formación Los Santos) se presentan bajos valores de conductividad eléctrica (20 a 38  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Los anteriores datos fueron medidos en una sola época y, por tanto, se requiere de un estudio hidrodinámico para reconocer su verdadero comportamiento, el cual es realizado en la presente investigación en los manantiales identificados para la zona de estudio (ver capítulo de Resultados).

Por otro lado, también se cuenta con datos de iones mayoritarios que caracterizan las facies hidroquímicas del agua subterráneas del Macizo de Santander. En INGEOMINAS (2009) las facies son clasificadas como mixtas, variando de bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas

magnésico-sódicas, bicarbonatadas sódico-cálcicas, bicarbonatadas cálcico-sódicas, bicarbonatadas sulfatadas sódicas y sulfatadas bicarbonatadas magnésico-cálcicas. Por su parte, Rueda (2013) y Gómez *et al.*, (2015), las clasifican como bicarbonatadas cálcicas, mixtas y sódicas, donde se expone también que existe un aumento en la conductividad eléctrica en dirección este-oeste, evidenciando la continuidad hidráulica de los flujos subterráneos del acuífero superficial presente en el Macizo de Santander.

En Gómez *et al.* (2015) se exponen los resultados de análisis isotópicos llevados a cabo a nivel del Macizo de Santander, donde se define una línea meteórica local, definida por la ecuación:  $\delta^2\text{H} = 8,15\delta^{18}\text{O} + 12,81$ ; un gradiente altitudinal del fraccionamiento isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  de  $-0,16\text{‰}$  cada 100 msnm; y una contribución importante de los flujos subterráneos presentes en el macizo rocoso al flujo base del Rio de Oro.



**Figura 11.** Parte del Mapa de Zonas de Interés Hidrogeológico del Macizo de Santander Cuenca Superior del Rio Lebrija (INGEOMINAS, 2006).

## 4. Resultados

En el presente capítulo se plasman los resultados obtenidos a partir del procesamiento y la interpretación de la información referente a la geología, hidrología, composición isotópica e hidroquímica, donde cada componente aporta al planteamiento del modelo hidrodinámico conceptual final de la zona de estudio.

### 4.1. Modelo Geológico

Como se mencionó en la metodología, el modelo geológico fue realizado a partir de la cartografía oficial existente (Ward *et al.*, 1973 y INGEOMINAS, 2006), la interpretación de imágenes de radar y las observaciones de campo (**Figura 12**). En el presente estudio se trabajó con una escala de mayor detalle (1:10.000), permitiendo mejorar los contactos geológicos y determinar la cinemática de las estructuras y los patrones de fracturamiento.

4.1.1. Estratigrafía del área de estudio. El área de estudio presenta unidades geológicas con edades que van desde el Paleozóico inferior hasta depósitos cuaternarios. A continuación, se describen las características litológicas e hidrogeológicas de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente, las cuales aportan información importante para el modelo físico de la zona de estudio.

**Formación Silgara (pDs):** Aflora al oeste de la zona de estudio, formando una franja alargada a lo largo del camino hacia la vereda Reventón. Localmente se observan rocas metamórficas con lineación mineral y textura nematoblástica, las cuales presentan cristales de cuarzo (45%), plagioclasa (35%), hornblenda (15%), minerales de alteración verdosos (1%), micas moscovitas (3%) y otros (1%), clasificándose como esquistos cuarzo-feldespáticos de color negro violáceo en

la superficie (por meteorización) y un color interno marrón claro (**Figura 13**). La naturaleza cristalina de la unidad le imprime una porosidad primaria de baja a nula. El gran contenido de feldespato que se alteran a minerales arcillosos, el contenido de micas moscovitas que no se alteran y la foliación mineral, no permiten un buen desarrollo de porosidad producto de la meteorización. Debido a lo anterior la unidad actúa como una barrera de flujo, limitando el paso de fluidos. Este comportamiento de la unidad también es expuesto en el trabajo de INGEOMINAS – UIS (2007), y se puede validar en la zona de estudio puesto que no hay presencia de manantiales en la unidad.

**Cuarzomonzonita de La Corcova (JTRcl):** Aflora en la esquina suroeste de la zona de estudio, donde se encuentra intruyendo rocas de la Formación Silgara. Corresponde a un cuerpo plutónico con textura fanerítica, que presenta cristales de hasta 1 cm de diámetro con un promedio de 2 a 3 mm. Los cristales corresponden a cuarzo (35%), feldespato potásico (35%), plagioclasa (30%), y trazas de moscovitas, clasificándose como un granito, el cual se encuentra afectado por procesos de meteorización (**Figura 14**).

Al igual que los esquistos de la Formación Silgara, las rocas ígneas por su naturaleza cristalina poseen de baja a nula porosidad primaria. Sin embargo, el proceso de meteorización que afecta la unidad deja como producto un material arenoso, debido a la alteración de los feldespatos que desintegra la estructura cristalina de la roca y deja como residuo cristales de cuarzo de gran tamaño, resistentes a la meteorización, aumentando así la porosidad y la permeabilidad de las rocas, permitiendo el paso de los fluidos y la posibilidad de constituir acuíferos libres (INGEOMINAS-UIS, 2007). No obstante, aunque se han reportado manantiales en esta unidad, no se reconocieron en el presente trabajo, pues su área de exposición es muy limitada.

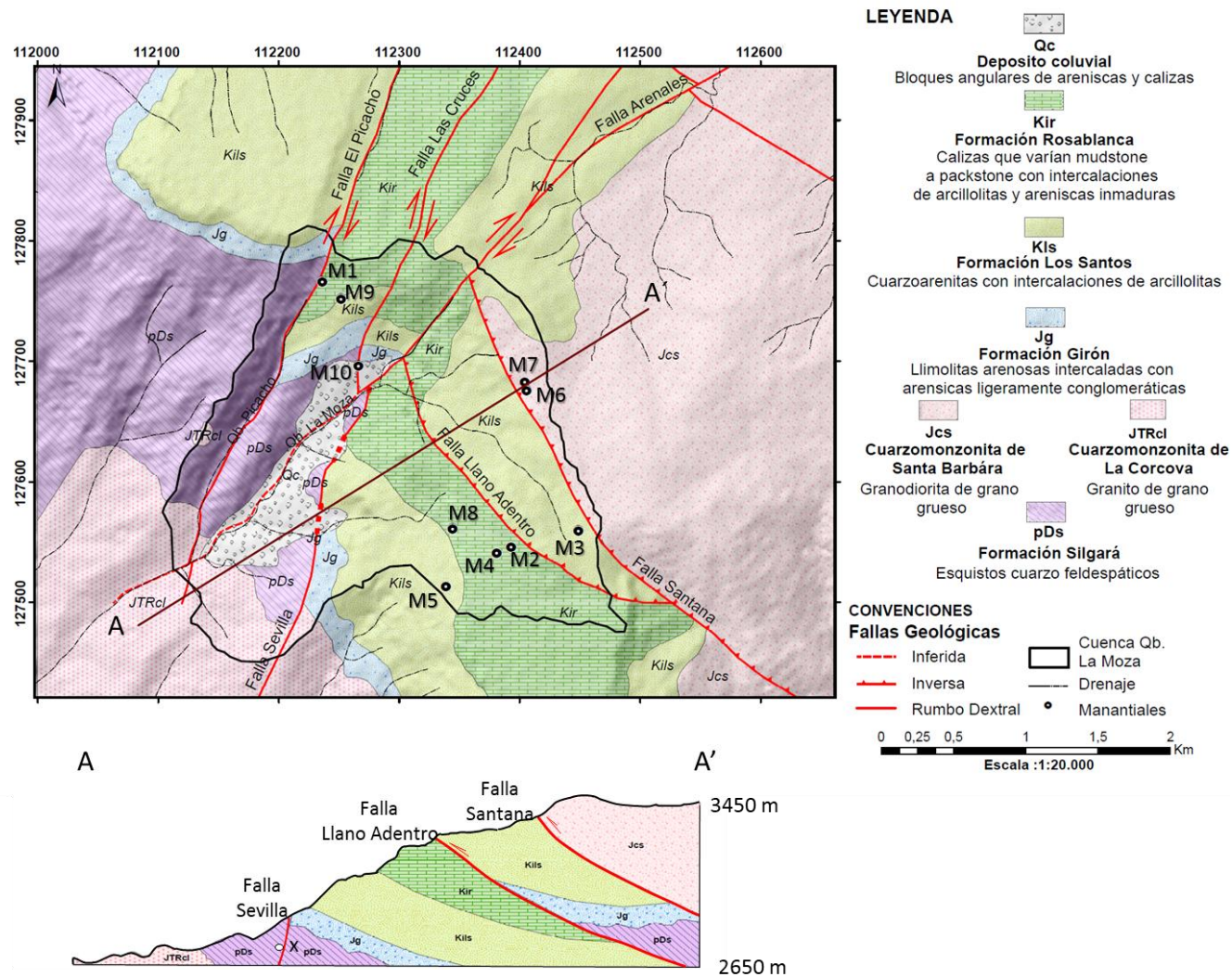
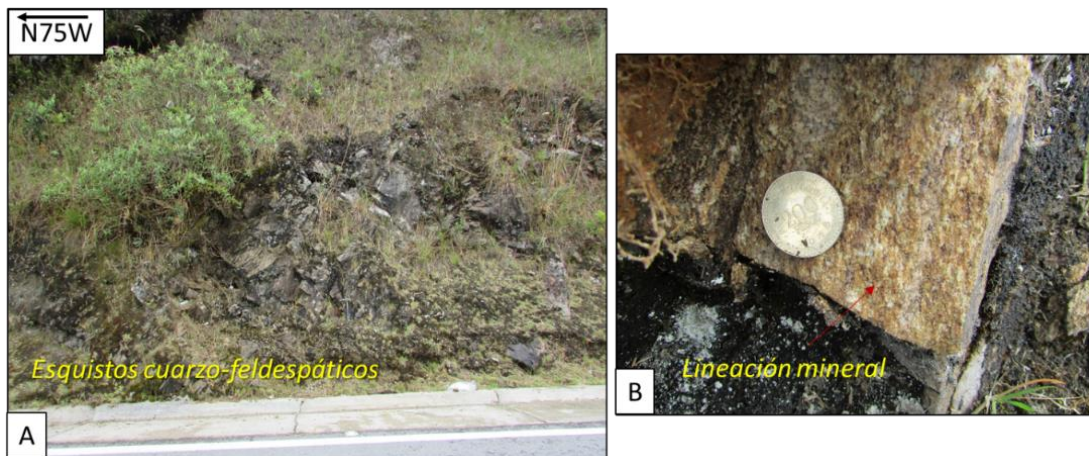
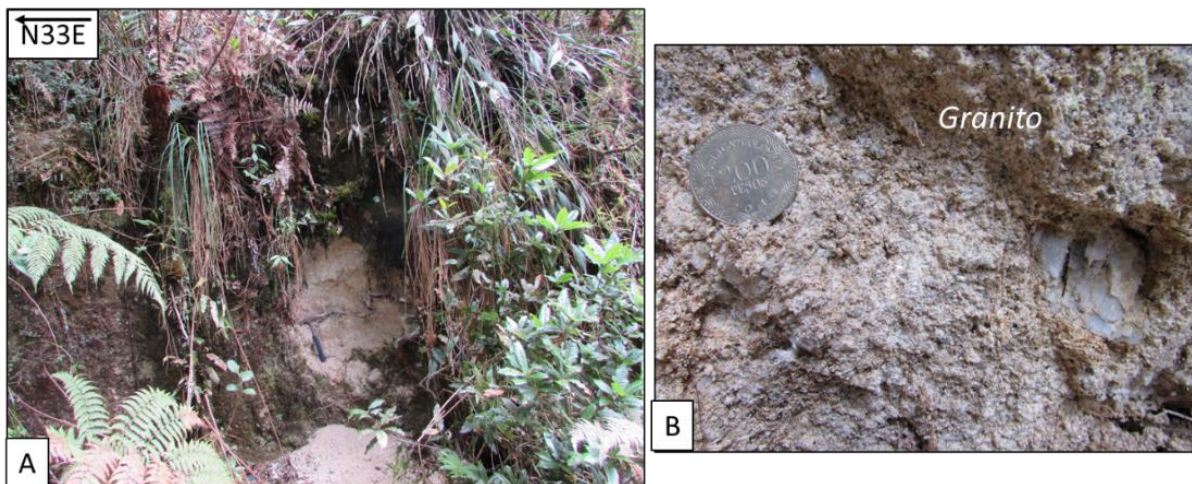


Figura 12. Mapa geológico del área de estudio.





**Figura 13.** A) Afloramiento de la Formación Silgara sobre la vía principal Bucaramanga – Berlín. B) Detalle de la lineación mineral que presenta los esquistos cuarzo-feldespáticos.



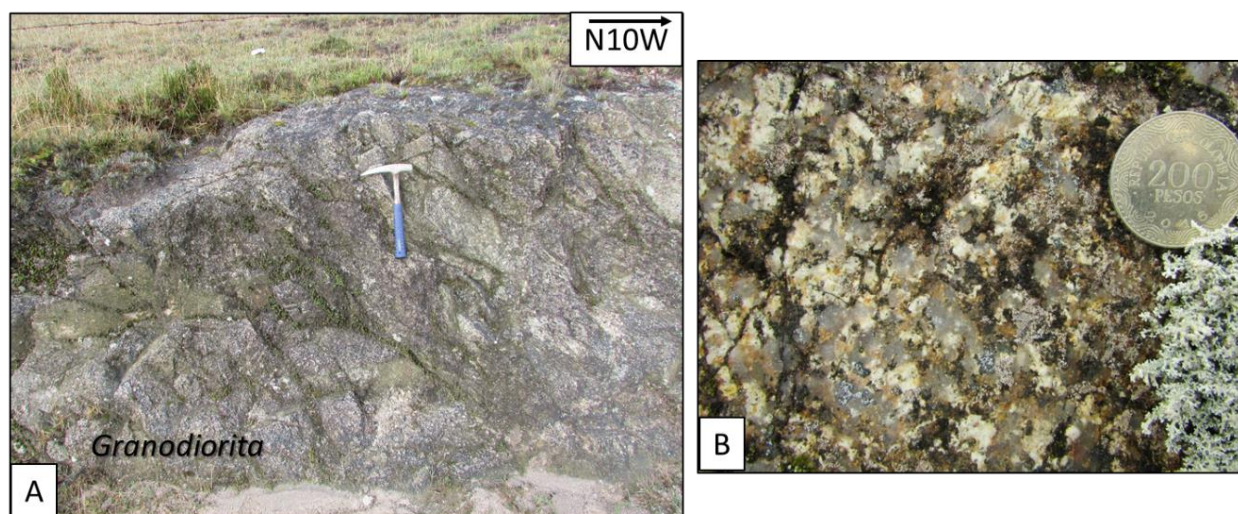
**Figura 14.** A) Afloramiento de la Cuarzomonzonita de La Corcova sobre el camino hacia la vereda el Reventón. B) Detalle del granito de color blanco.

***Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs):*** La unidad aflora al este del área de estudio, en los sectores de Caserío Arenales y vereda Llano Adentro, mostrando un relieve ondulado, donde se observa un cuerpo ígneo con textura fanerítica, compuesto por cuarzo (30 a 60%) anhedral con tamaño de 3 y 5 mm, plagioclasa (20 a 45%) subhedral y alterada a arcillas, feldespato potásico (10 a 15%) de color rosado pálido, biotita (1%) con habito laminar de color verdoso, óxidos de



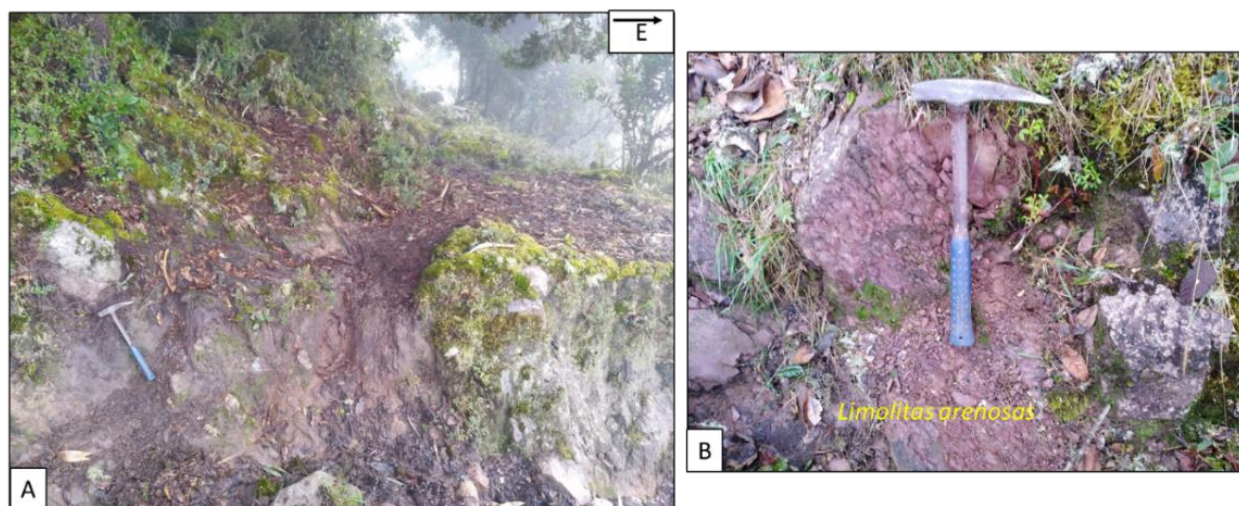
hierro de menor tamaño (1 mm, 2%) y minerales accesorios (4%), clasificándose en campo como Granodiorita (**Figura 15**). La roca de esta unidad desarrolla suelos principalmente arenosos, en algunas zonas incipientes y en otras zonas con un perfil de suelo desarrollado ( $\approx 2\text{m}$ ), donde en campo se midieron espesores de 10 cm del horizonte A, 30 cm de Horizonte B y 1,5 m de horizonte C (su parte visible).

Al igual que la Cuarzomonzonita de La Corcova, las rocas de esta unidad presentan una buena porosidad producto del fenómeno de meteorización, que le permite constituir acuíferos libres (INGEOMINAS-UIS, 2007). Adicional a ello, en la zona de estudio, la unidad se encuentra afectada por patrones de fracturamiento que le imprimen una buena porosidad secundaria y mejoran la permeabilidad de la roca. Sobre esta unidad se reconocieron dos manantiales (M6 y M7), los cuales afloran cerca de la divisoria de agua y su descarga es relacionada a la posible impermeabilización que encuentran los flujos en su camino debido a la acción de la falla inversa Santana (**Figura 12**).



**Figura 15.** A) Afloramiento de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. B) Detalle de la granodiorita.

**Formación Girón (Jg):** Aflora sobre la vía principal Bucaramanga – Picacho y en el sector conocido como La Moza. En la zona de estudio presenta una disminución del espesor respecto al que se reporta en el Valle Medio del Magdalena. Sin embargo, presenta su litología característica compuesta por capas medianas y gruesas que corresponden a limolitas arenosas micáceas de color rojo moderado con presencia esporádica de líticos, porosa y compacta (**Figura 16**), intercalada con niveles de areniscas de grano grueso ligeramente conglomeráticas con granos subangulares a angulares, subredondeados compuestos por cuarzo (80 a 85%), plagioclasa (3%), minerales ferromagnesianos (5 a 10%) y otros (5%). El potencial hidrogeológico de la Formación Girón radica en la buena porosidad primaria que presentan los niveles conglomeráticos, sin embargo, por presentar un bajo espesor y exposición areal, solo podría configurarse el paso de fluidos sin almacenamiento. Sobre rocas de esta formación no se encontraron afloramientos de aguas subterráneas en el presente estudio.



**Figura 16.** A) Afloramiento de la Formación Girón que aflora sobre camino hacia la quebrada La Moza.  
B) Detalle de limolitas arenosas.

**Formación Los Santos (Kils):** Aflora en la parte central de la zona de estudio, donde genera fuertes escarpes producto de la tectónica que afecta el área y de la erosión diferencial por la

resistencia de las rocas. De base a techo, la formación en el área de estudio se encuentra compuesta por:

- Hacia la base, capas principalmente tabulares medianas de areniscas de grano medio a fino muy cementadas, de color gris verdoso a gris claro (roca fresca) y amarillo naranja (roca alterada) con presencia de glauconita y matriz arcillosa (<5%). Los granos son subangulares y subesféricos, bien seleccionados, compuestos por cuarzo (90 a 95%), óxidos de hierro (1 a 2%), líticos negros (1 a 2 %), glauconita (1%) y otros (5%), clasificándose la roca según Folk (1974) como sublitoarenita que varía a cuarzoarenita.
- Hacia la parte media, capas delgadas a medianas, que varían su espesor de 5 a 25 cm, de formas tabulares, cuneiformes y levemente plegadas, con contactos netos ondulados. Las capas corresponden a areniscas de grano fino de color gris claro cementada, con granos subangulares y subredondeados, compuestos por cuarzo (95%), líticos negros (2%) y otros (3%), clasificándose según Folk (1974) como cuarzoarenitas, con estratificación interna irregular y bioperturbada, definida por niveles con materia orgánica (**Figura 17**).
- Hacia el techo, capas delgadas (10 cm) y medianas (20 cm) con contactos irregulares predominantemente tabulares que corresponden a intercalaciones de arcillolitas de color gris oscuro medio, micáceas con presencia de materia orgánica y laminación interna irregular y discontinúa; areniscas de grano medio, cementadas, con granos subangulares a subesféricos que están compuestos principalmente por cuarzo clasificándose según Folk (1974) como cuarzoarenita; areniscas de grano muy fino a fino con granos subangulares a subesféricos, algunos con bordes difusos, compuestos por cuarzo hialino principalmente clasificando la roca

según Folk (1974) como cuarzoarenita; y lodolitas de color marrón rojizo oscuro con alto contenido de materia orgánica.

Esta formación sedimentaria presenta baja porosidad primaria en sus tres niveles, debido al nivel de compactación de las areniscas y al carácter impermeable de las arcillolitas. Su potencial hidrogeológico se da por la porosidad secundaria y la permeabilidad producto del fracturamiento, que en los niveles competentes (areniscas) puede llegar a configurar fracturas de tensión (abiertas) interconectadas que permiten el paso de los fluidos y constituir acuíferos libres, como se menciona en INGEOMINAS –UIS (2007). Sobre las rocas de esta unidad se identificaron tres manantiales, M3, M5 y M9 (**Figura 12**). En los manantiales M3 y M9 se observa claramente que el agua brota de las fracturas generadas sobre las cuarzoarenitas de la unidad. Por su parte, el manantial M5 aflora sobre un suelo residual arcilloso del nivel de arcillolitas de la formación, el cual se tuvo en cuenta por hacer parte de los manantiales identificados en el trabajo de INGEOMINAS (2009).

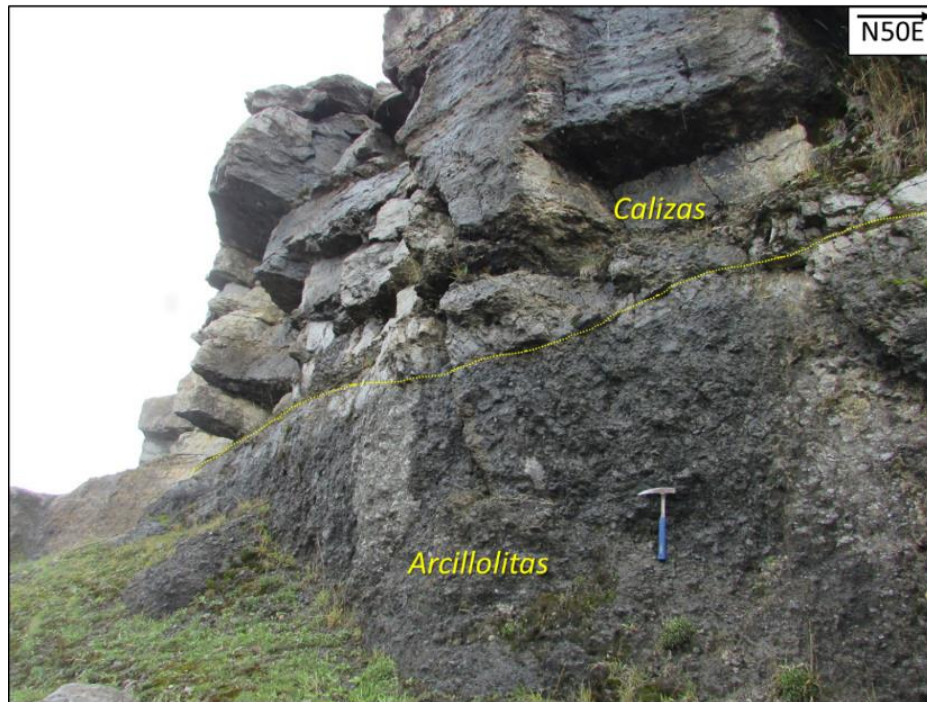


**Figura 17.** Afloramiento de la Formación Los Santos compuesta por cuarzoarenitas.

**Formación Rosablanca (Kir):** Aflora en la parte central de la zona de estudio, de norte a sur, donde genera fuertes escarpes al igual que la Formación Los Santos, producto de la tectónica que afecta el área de estudio y de la erosión diferencial por la resistencia de las rocas. De base a techo, la formación en el área de estudio se encuentra compuesta por:

- Hacia la base: capas gruesas y muy gruesas con contactos irregulares, aparentemente tabulares, que corresponden a intercalaciones de calizas que varían de tipo *packstone* a *mudstone*, de color gris azulado a gris oscuro, calizas tipo *packstone* de color gris claro medio con restos de conchillas (algunas completas y otras desarticuladas y fragmentadas) y arcillolitas finamente laminadas con alto contenido de materia orgánica (carbonáceas, **Figura 18**).
- Hacia la parte media, capas delgadas, medianas y gruesas con contactos ondulados a irregulares que corresponden a arcillolitas limosas fisiles micáceas de color gris azulado con oxidación en sus planos de discontinuidad y en algunas zonas meteorización esferoidal; areniscas inmaduras de grano fino a medio de color gris amarillento con presencia de cuarzo (97%), líticos negros (2%) y óxidos de hierro (1%) bioperturbadas; y calizas tipo *mudstone* de color gris medio.
- Hacia el techo, capas gruesas a muy gruesas tabulares de 80 cm a 1,5 m de espesor con contactos ondulados a irregulares, que corresponden a calizas tipo *mudstone* que varían a *packstone* de color gris oscuro con presencia abundante de lodo calcáreo y precipitación de calcita.





**Figura 18.** Afloramiento de la Formación Rosablanca sobre la carretera Picacho – Berlín donde se observan capas gruesas de calizas y arcillolitas.

La Formación Rosablanca presenta de baja a nula porosidad primaria por su carácter calcáreo, debido a que al precipitar los minerales de carbonato no dejan espacio para la generación de poros. Sin embargo, es bien conocido que los minerales de carbonato (como la calcita, dolomita, aragonito, siderita, etc) en presencia de agua son fácilmente disueltos, permitiendo la generación de cavidades o conductos que configuran los denominados acuíferos cársticos. En estos sistemas complejos la disolución de las rocas funciona como vías de gran apertura y baja tortuosidad que influyen en gran medida en las velocidades y direcciones del flujo de agua subterránea (Dreiss, 1989). Por otro lado, las rocas de la formación en la zona de estudio se encuentran afectadas por las fallas geológicas y el fracturamiento, que genera fracturas posiblemente interconectadas que permiten el paso de los fluidos. De acuerdo con lo anterior, la Formación Rosablanca en la zona de estudio presenta un buen potencial hidrogeológico por porosidad secundaria, que permite la

generación de fracturas que posteriormente son afectadas por procesos de disolución y permiten canales más amplios para la circulación del agua subterránea. En la zona de estudio se identificaron cuatro manantiales, M1, M2, M4 y M8 (**Figura 12**). El manantial M1 representa el sistema cárstico presente al norte del área de estudio, cuya hidrodinámica es estudiada en el capítulo de hidrología e isotopía. Los manantiales M2, M4 y M8 representan el sistema cárstico presente al sur del área de estudio. Los dos sistemas cársticos se encuentran separados geográficamente y por la acción de las fallas geológicas, y son estudiados a detalle en los siguientes apartados.

***Deposito Coluvial (Qc):*** El deposito coluvial se observa en los márgenes de la quebrada La Moza, es clastosoportado y está compuesto por bloques métricos (de hasta 5 m de diámetro) de calizas tipo mudstone y areniscas cuarzosas en una matriz arenoarcillosa. Presenta buena porosidad primaria por corresponder a materiales no consolidados y sobre él se identificó el manantial M10 (**Figura 12**).

4.1.2. Geomorfología del área de estudio. En el presente trabajo se reconocieron geoformas según su origen, a partir de las observaciones de campo y de la interpretación fotogeológica del área de estudio.

***Geoformas de origen estructural- denudacional:*** Estas geoformas incluyen escarpes de falla, pendientes estructurales y contrapendientes estructurales de las formaciones Los Santos y Rosablanca, en los sectores Alto El Picacho y vereda Llano Adentro (**Figura 19**).



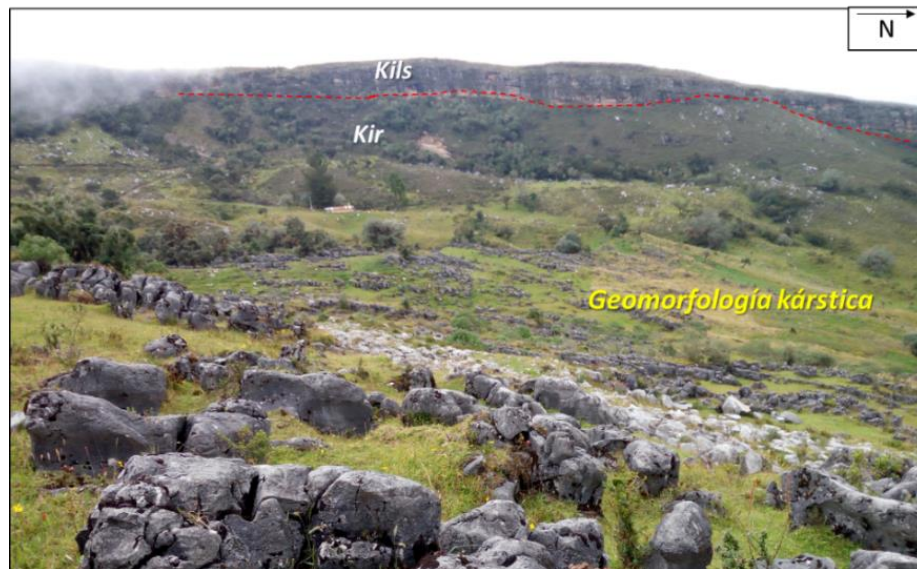
**Figura 19.** Escarpes de falla en el sector Alto El Picacho.

**Geoformas de origen cárstico:** Geoformas desarrolladas sobre las rocas carbonatadas de la Formación Rosablanca, que incluyen depresiones cársticas o dolinas, pendientes denudacionales cársticas y superficies de las rocas afectadas por procesos de disolución, observadas en el sector Alto El Picacho y vereda Llano Adentro (**Figura 20**), características propias del desarrollo de sistemas cársticos.

**Geoformas de origen denudacional:** Geoformas debidas a procesos denudacionales que generan relieves ondulados de pendientes moderadas sobre las rocas metamórficas de la Formación Silgará, las rocas ígneas de la Cuarzomonzonita de La Corcova y Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, y en algunos sectores de las rocas sedimentarias de la Formación Los Santos (**Figura 21**). También se presentan crestas afiladas y zonas escarpadas desarrolladas sobre las formaciones sedimentarias, así como depósitos de coluvión acumulados en los márgenes de la quebrada La Moza y depósitos de talus a la base de los escarpes de las formaciones sedimentarias.



**Geoformas de origen degradacional:** Se presentan como cicatrices de movimientos en masa, observados en algunas partes de las laderas de la quebrada La Moza.



**Figura 20.** Geomorfología cárstica desarrollada en rocas de la Formación Rosablanca (Kir) que se encuentra en contacto fallado con la Formación Los Santos (Kils), observada en el sector Alto El Picacho.



**Figura 21.** Contraste entre las laderas escarpadas en las rocas sedimentarias, formaciones Girón (Jg) y Los Santos (Kils), y el relieve ondulado de las rocas metamórficas de los Esquistos del Silgará (pDs).

4.1.3. Geología estructural. Como resultado del análisis estructural realizado en este trabajo se elaboró el mapa estructural del área de estudio, donde se muestran las fallas geológicas que afectan

las rocas aflorantes, las cuales presentan dos tendencias principales, una tendencia en dirección NNE representada por las fallas de rumbo dextral El Picacho, Sevilla, Las Cruces y Arenales, y otra tendencia en dirección NW representada por las fallas inversas Llano Adentro y Santana (**Figura 22**). La mayoría de los nombres de las fallas se conservan del mapa publicado por INGEOMINAS (2006). La cinemática de las estructuras fue establecida de acuerdo a la cartografía geológica, teniendo en cuenta el trazo de los planos, la relación de las unidades antiguas y nuevas, las características geomorfológicas y las observaciones realizadas en campo.

A partir de los datos de planos de discontinuidades tomados en campo se determinaron dos patrones de fracturamiento principales con tendencias en direcciones NNW y NE, mostrados por medio de Diagramas Rosas (**Figura 22**), los cuales son concordantes con las tendencias de las fallas geológicas cartografiadas y que, por su naturaleza sistemática, se puede establecer que son producto de los esfuerzos tectónicos presentes en el área (Arlegui y Simón, 1993). Por otro lado, a partir del análisis de estrías de falla presentes en los planos de las rocas, realizado por Bejarano y Navas (2018), se estableció para la zona un campo de esfuerzo en rumbo, con un eje principal de compresión ( $\sigma_1$ ) en dirección N77E/02 y un eje principal de tensión ( $\sigma_3$ ) en dirección N12W/23. Así, de acuerdo a la ley de fracturamiento de Anderson (1951) y a la elipse de deformación convencional (Rosello, 2001), se observa que el tensor establecido explica claramente la cinemática en rumbo dextral de las fallas Picacho, Sevilla, Las Cruces y Arenales y el movimiento inverso de las fallas Llano Adentro y Santana.

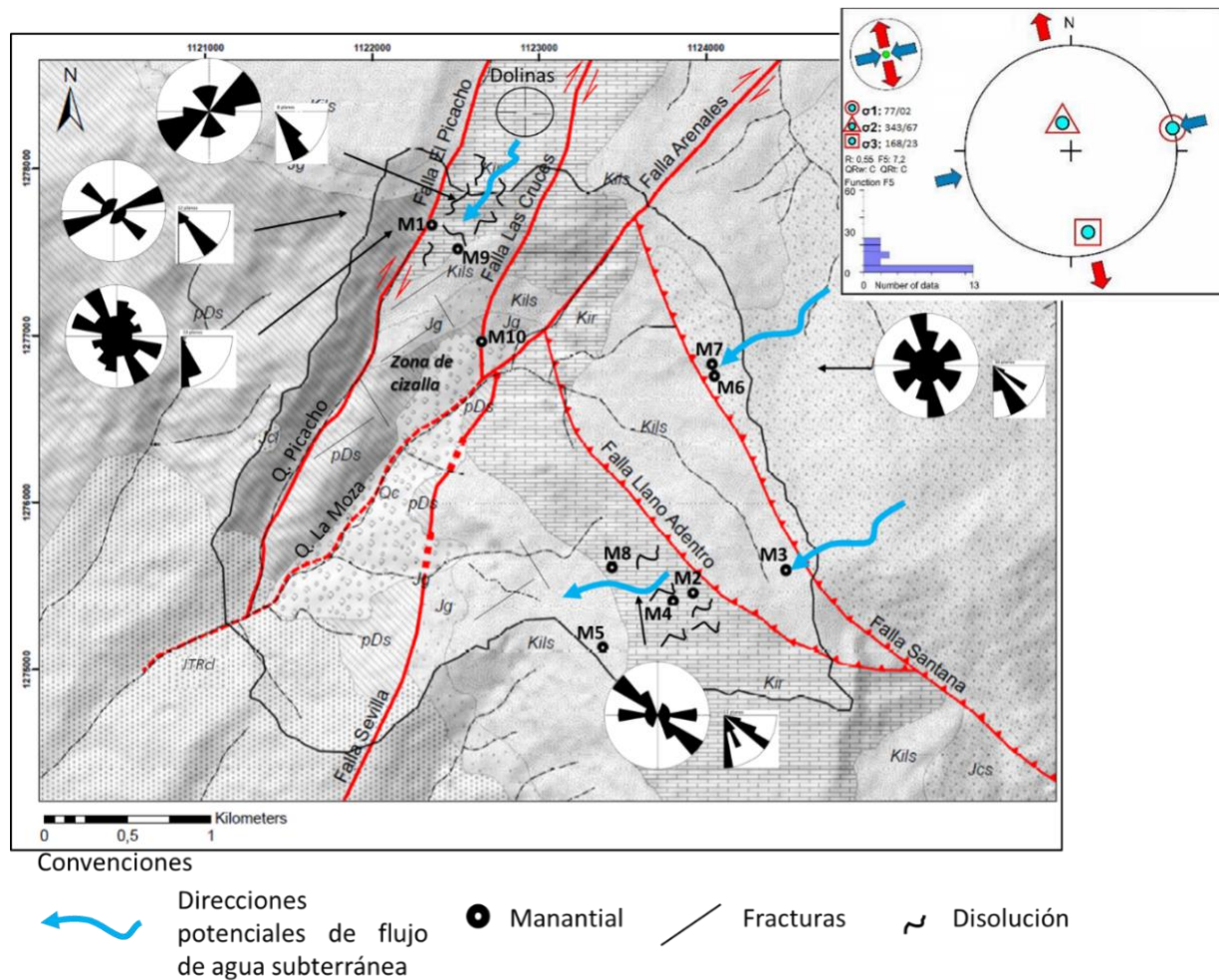
Del análisis estructural, se puede establecer que las fracturas paralelas al eje principal de compresión ( $\sigma_1$ , N77E) pueden corresponder a fracturas de tensión (Arlegui y Simón, 1993), que generan espacios abiertos propicios para el flujo de aguas subterráneas.

Estas fracturas de tensión son concordantes con el patrón de fracturamiento NE determinado. De acuerdo con lo anterior, en el área donde se localizan los manantiales M1, M9 y M10 se plantea un flujo subterráneo que cruza la divisoria de agua y presenta una clara relación con el patrón de fracturamiento NE (fracturas de tensión), asociado a su vez a las fallas Picacho y Las Cruces, que generan una zona de cizalla favorable para la ocurrencia de aguas subterráneas en el macizo rocoso (**Figura 22**). Por otro lado, este mismo patrón de fracturamiento (NE), representado por una menor población de planos de fracturas, favorece las direcciones potenciales de flujo que pueden explicar la ubicación de los manantiales M2, M3, M4, M5, M6, M7 y M8 y, particularmente, justifica la presencia de los manantiales M3, M6 y M7 localizados a poca distancia de la divisoria de agua de la microcuenca, planteándose un paso de flujo de agua que traspasa la divisoria de agua (**Figura 22**).

#### 4.2.Hidrología

La hidrología de la zona se abordó por medio del estudio de la precipitación, la estimación de la oferta hídrica y la información de caudales de los manantiales.

4.2.1. Precipitación de la zona de estudio. Se realizó el análisis de la pluviosidad del área, durante el periodo de estudio (años 2017 y 2018), a partir de los datos reportados por la estación El Picacho (**Figura 23**). Los datos de lluvia del año 2017 presentan un dato no confiable correspondiente al mes de diciembre de 0 mm, debido a que el recolector de agua lluvia mensual (ubicado al lado del pluviómetro) sí reporto que hubo lluvia en el mes (71 mm).

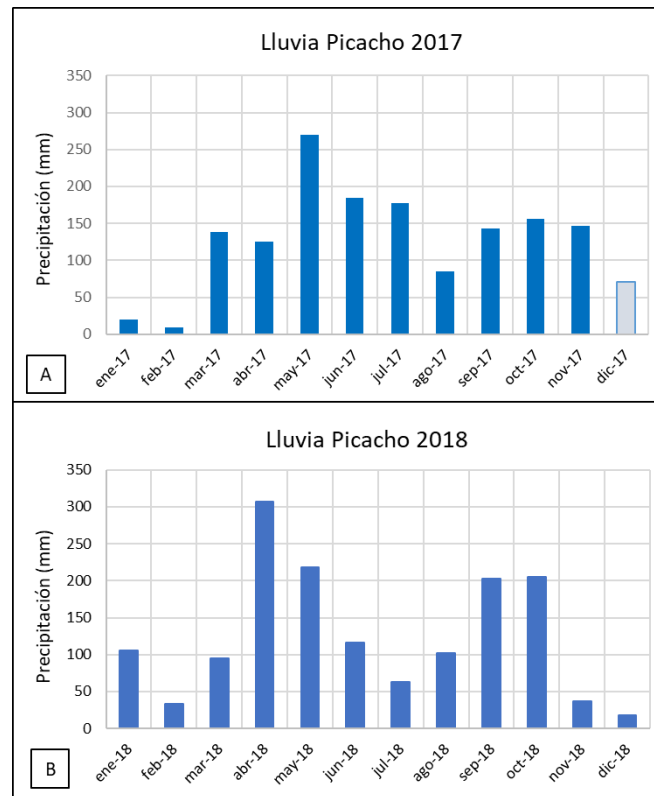


**Figura 22.** Mapa estructural de la zona de estudio, donde se muestran los patrones de fracturamiento (Diagramas Rosas), el tensor de esfuerzo establecido en Bejarano y Navas (2018) y las direcciones potenciales de flujo de agua subterránea.

En el Hietograma del año 2017, se puede observar un comportamiento levemente bimodal (**Figura 23A**). La primera época seca fue bien pronunciada en los meses de enero (20 mm) y febrero (9 mm). La primera época lluviosa fue más pronunciada que la segunda época lluviosa, y cubrió desde el mes de marzo (138 mm) hasta el mes de julio (178 mm), con un pico en el mes de mayo (270 mm). La segunda época seca (mitad de año) fue ligeramente pronunciada y solo se reportó una disminución en la lluvia en el mes de agosto (84 mm). La segunda época lluviosa fue

más tenue y presentó valores cercanos desde septiembre (143 mm) hasta noviembre (146 mm). En total la precipitación que se reporta en el año es de  $\approx 1524$  mm (tomando el valor de diciembre reportado por el recolector a agua lluvia mensual), valor muy cercano al promedio de la estación Picacho de 1544, por tanto, se asume que el año 2017 fue un año normal para la zona de estudio.

En el Hietograma del año 2018, se puede observar un comportamiento bimodal (**Figura 23B**). La primera época seca presenta más cantidad de precipitación que el año anterior, aunque el mes de febrero presentó menos lluvia (33 mm). La primera época lluviosa fue bien marcada en los meses de abril (307 mm) y mayo (218 mm) y hubo un descenso desde el mes de junio (116 mm), con un valor bajo en julio (63 mm), el cual no se puede saber hasta qué mes continuó por la ausencia de datos. En los meses de septiembre y octubre se registra un aumento en la precipitación (203 y 205 mm) que marca la segunda época lluviosa y los meses de noviembre (37 mm) y diciembre (18 mm) inician la recesión que hace parte de la primera época seca del siguiente año. Se reporta una cantidad de lluvia total de 1504 mm, igualmente un valor cercano al promedio de la estación Picacho de 1544, por tanto, se asume que 2018 también fue un año normal.



**Figura 23.** Lluvia de la Estación El Picacho correspondiente a los años 2017 y 2018. El dato de diciembre 2017 corresponde al registrado por el recolector de lluvia mensual Picacho.

4.2.2. Estimación de la oferta hídrica. En el presente trabajo de investigación se realizó una estimación de la oferta hídrica a largo plazo del área de estudio. A continuación, se describe cada una de las variables usadas:

### Distribución de la lluvia

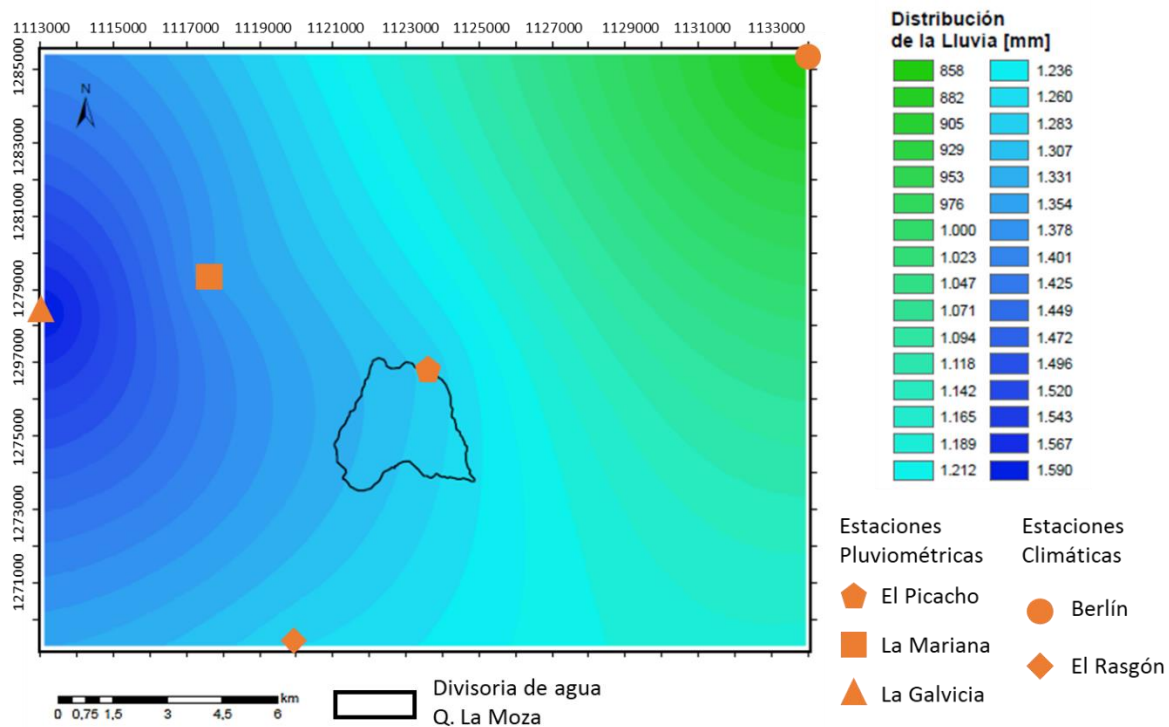
Para calcular una precipitación representativa del área de estudio se realizó una distribución espacial de la lluvia a partir de los datos de la Estación Picacho y de las estaciones más cercanas (estaciones Berlín, La Galvicia, El Rasgón, La Mariana), teniendo en cuenta un mismo periodo de tiempo, por lo cual se seleccionó las series de tiempo de 1989 a 2009 (20 años), con excepción de la estación La Mariana, pues solo se contó con datos hasta 2004 (**Tabla 6**). Se procesaron los datos

de precipitación media anual en el software ArcGis, usando las herramientas de análisis geoestadístico, donde se generó una distribución espacial a partir de un variograma ajustado por medio del modelo Kriging Simple de tipo circular. Se obtuvo una distribución espacial de la lluvia aproximada, por solo contar con datos de 5 estaciones (**Figura 24**). A partir de la distribución generada se calculó una precipitación promedio ponderada por el área de **1300 mm**, que varía del NE al W pasando de 858 mm en zonas de mayores alturas a 1590 mm en zonas de menores alturas. Lo anterior demuestra que en la medida que se avanza hacia las zonas altas y hacia el páramo de Berlín, la precipitación disminuye. Se observa que la estación Picacho presenta un valor promedio de 1380 mm que es muy cercano al valor promedio obtenido de 1300 mm.

| Estación   | Tipo          | Serie de<br>Tiempo | Coordenadas |         | Altura<br>(msnm) | Precipitación Media<br>Anual (mm) |
|------------|---------------|--------------------|-------------|---------|------------------|-----------------------------------|
|            |               |                    | Norte       | Este    |                  |                                   |
| EL PICACHO | Pluviométrica | 1989 - 2009        | 1277828     | 1123563 | 3435             | 1380                              |
| BERLIN     | Climática     | 1989 - 2009        | 1286396     | 1133945 | 3250             | 670                               |
| LA GALVIA  | Pluviométrica | 1989 - 2009        | 1279371     | 1113124 | 1779             | 1890                              |
| EL RASGÓN  | Climática     | 1989 - 2009        | 1270294     | 1119914 | 1950             | 1250                              |
| LA MARIANA | Pluviométrica | 1989 - 2004        | 1280310     | 1117627 | 2250             | 1250                              |

**Tabla 6.** Precipitación media anual de las estaciones pluviométricas y climáticas.





**Figura 24.** Distribución espacial de la lluvia en la zona de estudio.

## Evapotranspiración

Para estimar la evapotranspiración se analizaron los datos de las estaciones climáticas más próximas, correspondientes a Berlín (serie de tiempo 1969-2017) y El Rasgón (series de tiempo 1995-2000 y 2013-2016). A partir de los datos reportados en estas estaciones, se asume que el área de estudio presenta una temperatura promedio anual entre 8,8 y 15,2 °C, y una humedad relativa promedio anual entre 85,6 y 91,1 % (**Tabla 7 y 8**). Cabe resaltar que se puede plantear una mejor concordancia entre los datos de las estaciones El Picacho y El Rasgón, pues las dos reportan una pluviosidad más próxima (1250 y 1380 mm, respectivamente) en comparación con la estación Berlín (670 mm), y se encuentran a menor distancia horizontal (**Figura 24**).



|                        | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  | Promedio Anual<br>Temperatura (°C) |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------------|
| <b>Berlín (T °C)</b>   | 8,3  | 8,7  | 9,0  | 9,3  | 9,2  | 8,7  | 8,3  | 8,7  | 8,9  | 9,0  | 8,9  | 8,5  | 8,8                                |
| <b>El Rasgón (T°C)</b> | 14,7 | 15,0 | 15,3 | 15,8 | 15,7 | 15,5 | 15,1 | 15,2 | 15,2 | 15,3 | 15,0 | 14,9 | 15,2                               |

**Tabla 7.** Temperatura promedio mensual de las estaciones Berlín y El Rasgón.

|                         | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  | Promedio Anual<br>Humeda Relativa (%) |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------------|
| <b>Berlín (HR %)</b>    | 82,8 | 82,5 | 84,3 | 86,7 | 87,0 | 87,4 | 87,7 | 86,4 | 85,7 | 86,1 | 85,9 | 84,2 | 85,6                                  |
| <b>El Rasgón (HR %)</b> | 90,1 | 91,0 | 90,5 | 91,1 | 91,1 | 91,7 | 90,8 | 90,5 | 91,1 | 91,6 | 92,5 | 91,5 | 91,1                                  |

**Tabla 8.** Humedad relativa promedio mensual de las estaciones Berlín y El Rasgón.

De acuerdo con lo anterior, el cálculo de la evapotranspiración se realizó utilizando los datos de la estación El Rasgón y aplicando las ecuaciones de Thornthwaite y Cenicafé para la evapotranspiración potencial y las ecuaciones de Turc, Coutage y Budyko para la evapotranspiración real. Los resultados obtenidos se presentan en las **Tablas 9 y 10**.

| ECUACIÓN     | ETP (mm/año) |
|--------------|--------------|
| Thornthwaite | 699          |
| Cenicafé     | 844          |

**Tabla 9.** Valores de evapotranspiración potencial

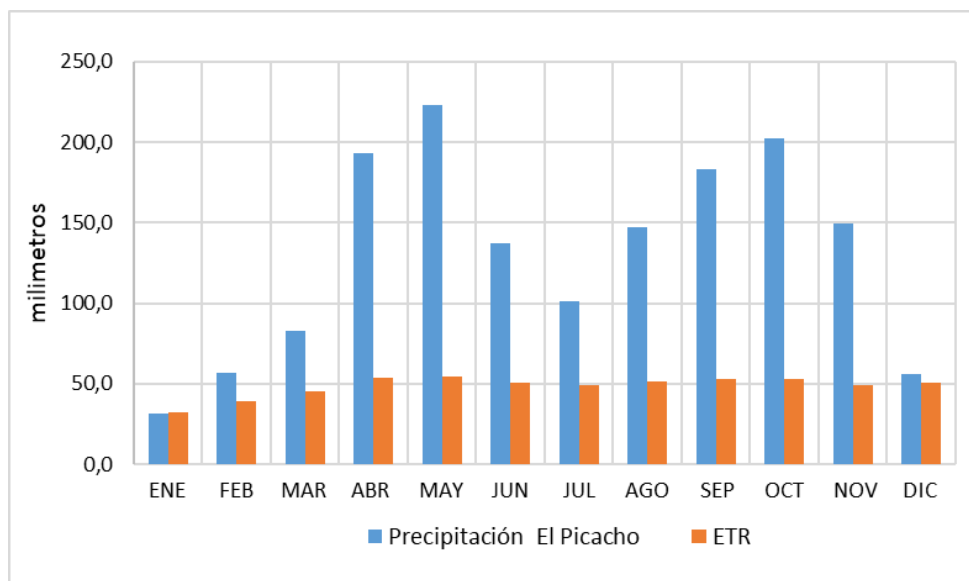
| ECUACIÓN                        | ETR (mm/año) |
|---------------------------------|--------------|
| Turc                            | 717          |
| Coutagne                        | 733          |
| Budyko<br>(ETP de Thornthwaite) | 600          |
| Budyko<br>(ETP de Cenicafé)     | 691          |

**Tabla 10.** Valores de evapotranspiración real

A partir de las cuatro ecuaciones de evapotranspiración real se asume como representativo el valor de **691 mm**, debido a que se obtiene a partir de la evapotranspiración potencial calculada por

la ecuación Cenicafe, la cual es más acorde con las condiciones climáticas del país, y además el valor arrojado se aproxima a los obtenidos por las ecuaciones de Turc (717 mm) y Coutagne (733).

Por otro lado, la ecuación de Thornthwaite permitió calcular valores de evapotranspiración potencial mensual y a partir de estos se obtuvieron valores de evapotranspiración real mensual por medio de la ecuación de Budyco, que sirvió para poder observar el comportamiento a lo largo del año y comparar los registros con los datos de precipitación de la estación El Picacho (por ser la estación más representativa del área, **Figura 25**).



**Figura 25.** Valores de precipitación promedio mensual de la estación El Picacho (1967-2017) y evapotranspiración real mensual calculada por Budyco (Thornwaite).

La **Figura 25** muestra una estimación de los meses que más aportan a la oferta hídrica (más de la mitad de la cantidad de precipitación), que corresponden a abril, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre. En los meses de enero, febrero y diciembre casi la totalidad de

lluvia que cae se evapotranspira, mientras que en el mes de marzo se evapotranspira más de la mitad y en el mes de agosto aproximadamente la mitad.

### **Oferta hídrica**

Para la estimación de la oferta hídrica, se tomaron en cuenta los valores de evapotranspiración real y precipitación promedio ponderada, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$OH = P - ETR$$

$$OH = 1300 \text{ mm} - 691 \text{ mm}$$

$$OH = 609 \text{ mm} \approx 600 \text{ mm}$$

De acuerdo con lo anterior, se estima una oferta hídrica mensual de **600 mm**, que se asume como representativa del área de estudio, donde parte de ella constituye la recarga potencial del sistema hidrogeológico, que alimenta los flujos subterráneos del área de estudio.

4.2.3. Análisis de caudales. El análisis de caudales se centró en estudiar el comportamiento de los caudales de los manantiales, dividiéndose en los caudales medidos en cada muestreo y los registrados en forma continua entre el 24 de marzo del 2018 y el 9 de enero del 2019 en el nacimiento de la quebrada Picacho que representa el manantial M1 del sistema cárstico, observado al norte del área de estudio.

### **Caudales de manantiales**

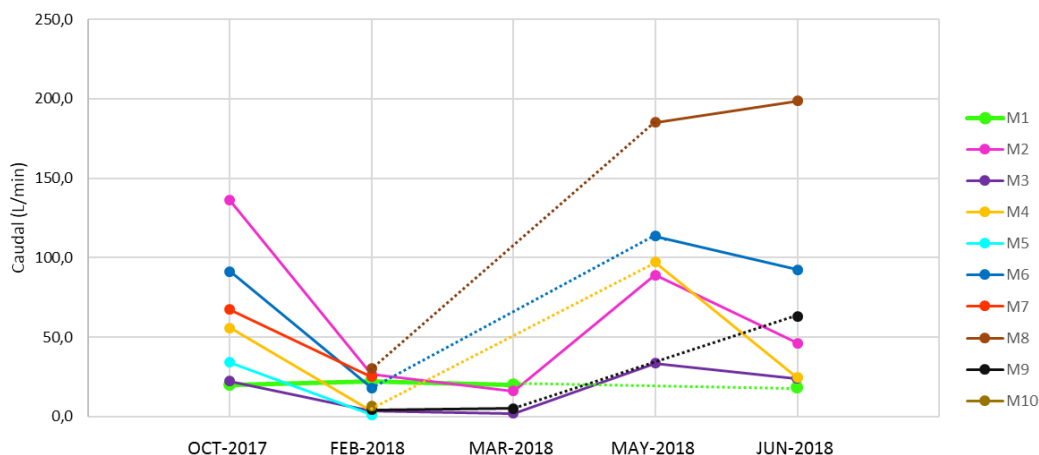
En la **Tabla 11** se observan los valores de caudales medidos en los muestreos de los manantiales.

| Manantial | Caudal (L/min) |        |        |        |        |
|-----------|----------------|--------|--------|--------|--------|
|           | oct-17         | feb-18 | mar-18 | may-18 | jun-18 |
| M1        | 19,8           | 22,2   | 20,1   |        | 17,9   |
| M2        | 136,2          | 26,4   | 16,2   | 89,0   | 46,2   |
| M3        | 22,2           | 3,3    | 1,8    | 33,6   | 24,0   |
| M4        | 55,8           | 3,6    |        | 97,1   | 24,6   |
| M5        | 34,2           | 1,2    |        |        |        |
| M6        | 91,2           | 18,0   |        | 113,6  | 92,4   |
| M7        | 67,2           | 25,2   |        |        |        |
| M8        |                | 30,0   |        | 185,2  | 198,6  |
| M9        |                | 4,2    | 5,1    |        | 62,9   |
| M10       |                | 6,6    |        |        |        |

**Tabla 11.** Caudales de los manantiales de la zona de estudio.

A partir de los datos de la **Tabla 11** se grafican los caudales con respecto al tiempo (**Figura 26**), donde se observa que el caudal de casi todos los manantiales presentan una disminución fuerte en los meses de febrero y marzo (época seca), un aumento en los meses de octubre y mayo (época lluviosa) y una disminución más leve en el mes de junio (época seca), comportamiento acorde a los registros de lluvia de los mismos meses (**Figura 23**), que evidencian la influencia de la lluvia local en los manantiales. A partir de los caudales de febrero, se calcula una descarga del sistema de 140,7 L/min, que se puede asumir como representativa de una época seca.

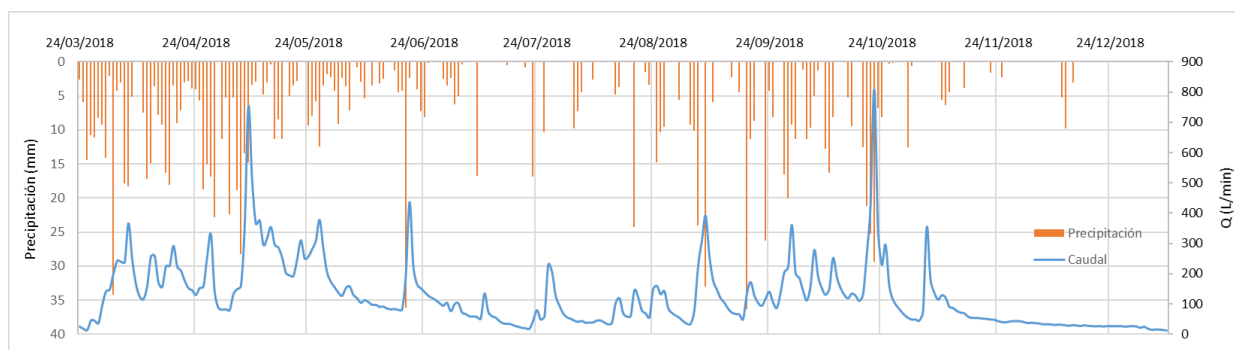
Además, en la **Figura 26** se observa que el manantial M1 no muestra una variación temporal, permaneciendo aproximadamente constante en los meses medidos, lo que permite plantear que en la zona donde aflora el sistema de flujo subterráneo es más estable y continuo que en donde afloran los demás manantiales. Por su parte, el manantial M8 muestra un aumento considerablemente mayor en su caudal con respecto al valor medido en el mes de febrero, permitiendo plantear una influencia importante de escorrentía superficial a la hora de la medida, la cual es discutida con los resultados de los isótopos estables del agua.



**Figura 26.** Variación temporal de los valores de caudales medidos en los manantiales de la zona de estudio.

### Caudales continuos del Manantial M1 (nacimiento de la quebrada Picacho)

Se presenta el hidrograma obtenido de los caudales del nacimiento de la quebrada Picacho, que representa el comportamiento del manantial M1 (**Figura 27**). Se presentan los datos de caudales diarios comparados con los datos de lluvia diaria reportados por la estación Picacho del mismo periodo del estudio. Cabe mencionar que tanto el pluviómetro como el diver se encuentran en la misma zona a poca distancia.



**Figura 27.** Caudales diarios versus lluvia diaria durante el periodo de marzo 2018 a enero 2019 (ausencia datos de agosto y septiembre).

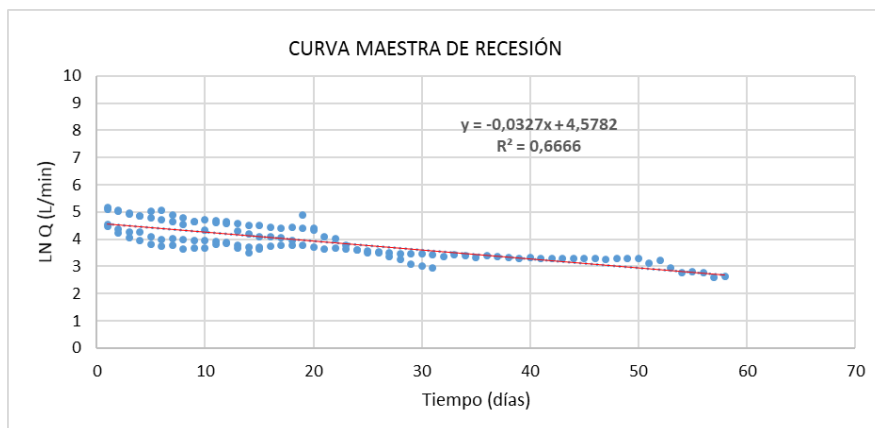
El hidrograma muestra un flujo continuo con picos que evidencian una respuesta rápida de los caudales ante los eventos de lluvia, que permite plantear una recarga local del sistema. Se observa que, una vez terminado el evento de lluvia la descarga de la escorrentía superficial es rápida y el hidrograma retorna rápidamente a su flujo base con periodos de recesión que muestran el descenso natural del almacenamiento del acuífero que se encuentra en contacto con la corriente superficial, que en este caso corresponde a un sistema cárstico representado por el manantial M1.

A partir del hidrograma se seleccionaron cuatro periodos de recesión de 20, 31, 15 y 58 días, que permitieron construir una aproximación a la curva maestra de recesión (CMR, **Figura 28**), ya que para obtener una curva más representativa se deben contar con una serie de tiempo de caudales de varios años. De esta CMR se estima para el sistema una constante de recesión de  $0,0327 \text{ (días}^{-1}\text{)}$ , la cual indica un tiempo de vida media de 30,5 días, que no es más sino el tiempo necesario para que el flujo base reseda a un punto donde  $Q(t)/Q(o)=0,5$  (Chow *et al.*, 1994).

Teniendo en cuenta que el área aferente del punto donde se midieron los niveles es de tan solo  $0,2 \text{ km}^2$ , encontrándose muy cerca de la divisoria de aguas, se determina que los 30 días, necesarios para que el flujo total sea la mitad del flujo base, corresponden a un tiempo largo en comparación con el área aferente, por tanto, los flujos subterráneos deben sobre pasar los límites de la microcuenca superficial y presentar una mayor área subterránea aferente que permita una circulación aproximada de 30 días.

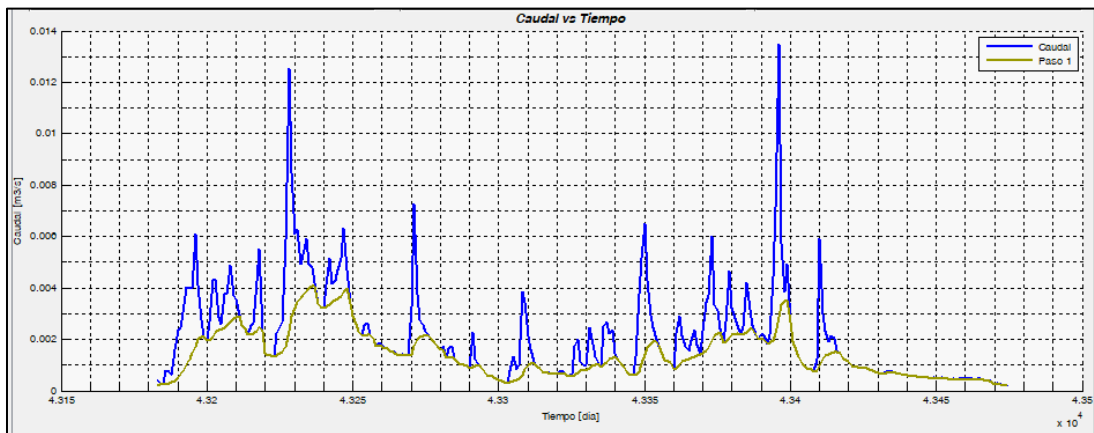
Así mismo, de acuerdo con lo planteado en Gómez y Gómez (2016), para la cuenca del Rio de Oro, una constante de recesión mayor a  $0,012$ , como es el caso de la calculada en este estudio ( $0,0327$ ), evidencia una respuesta rápida de la descarga del flujo subterráneo que puede corresponder a la movilización de flujo proveniente de recargas más locales, lo que indica flujos

subterráneos rápidos con tiempos de residencia cortos, lo cual es un comportamiento típico de los sistemas cársticos por la presencia de canales con aberturas considerables debido a los procesos de disolución.



**Figura 28.** Aproximación a la Curva maestra de Recesión de la quebrada Picacho.

Con los datos de caudales obtenidos se realizó una estimación de la fracción del flujo base del nacimiento de la quebrada Picacho, para el periodo monitoreado, utilizando el método de algoritmos numéricos. Para ello se utilizó el software desarrollado por Gómez y Gómez (2012), donde los algoritmos que mostraron un mejor ajuste al hidrograma correspondieron al uso de 1 parámetro, 2 parámetros y Nathan and McMahon Paso 1, siendo ese último el algoritmo que mejor se ajusta al hidrograma en las recesiones (**Figura 29**). El valor obtenido de flujo base es de aproximadamente 70%, lo cual significa que el flujo base corresponde al 70% de la escorrentía total.



**Figura 29.** Separación del flujo base a partir de los caudales de la quebrada Picacho.

Finalmente, a partir del volumen total de escorrentía y el volumen total de la lluvia, en los mismos periodos, se estimó un coeficiente de escorrentía de 0,2 que, al extrapolarla al valor de la precipitación de 1300 mm, se obtiene una estimación gruesa de escorrentía superficial anual de **260 mm**.

De acuerdo con lo anterior y tomando la estimación de la oferta hídrica anual de 600 mm, se estima una recarga potencial de **340 mm/año**, aproximada, disponible para su infiltración, circulación por la zona vadosa y por el sistema subterráneo.

#### 4.3. Isótopos Estables del Agua

Los isótopos estables son trazadores ambientales distribuidos ampliamente en el entorno cercano a la superficie de la Tierra, de modo que sus variaciones en abundancias (fraccionamiento isotópico) se utilizan para determinar vías y escalas de procesos ambientales (Cook y Böhlkr, 2000). Las relaciones isotópicas (abundancia) se definen como la abundancia del isótopo pesado sobre la abundancia del isótopo liviano (Mook, 2000), como se muestra en la siguiente expresión:

$$R = \frac{\text{abundancia del isótopo pesado}}{\text{abundancia del isótopo liviano}}$$



Sin embargo, el hecho de que las variaciones isotópicas que ocurren en la naturaleza son extremadamente pequeñas, no es práctico usar los valores absolutos de las relaciones, por tanto, se miden en términos de estándares aceptados internacionalmente y se expresa mediante valores de delta ( $\delta$ ), definido como desviaciones relativas del estándar adoptado.

$$\delta \text{‰} = \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{standar}}} - 1 \right) * 1000$$

El estándar internacionalmente aceptado para las relaciones isotópicas del hidrógeno y del oxígeno es Estándar del Agua Media Oceánica de Viena (Vienna Standard Mean Ocean Water, VSMOW) (Coplen, 1996).

Los isotopos estables más usados para determinar el origen y zonas de recarga del agua subterránea corresponden a  $^2\text{H}$  (deuterio) y  $^{18}\text{O}$ , pues estos dos elementos por formar parte de la molécula del agua pueden ser usado como trazadores conservativos (Mook, 2000) y presentan una variabilidad en el ciclo hidrológico. Craig (1961) determinó la Línea Meteórica Global (GMWL, por sus siglas en inglés) a partir de la composición isotópica del agua lluvia de diferentes partes de mundo, que muestra la relación lineal entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , determinando una pendiente de 8 y un exceso de deuterio ( $d$ ) 10‰ (representada por la ecuación  $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ ). El exceso de deuterio ( $d$ ) indica procesos de reciclaje del vapor de agua presente en la atmosfera y es función de la humedad media relativa de la atmosfera (Mook, 2000). Cuando la relación entre el  $\delta^{18}\text{O}$  Y  $\delta^2\text{H}$  presenta una pendiente de 4 indica procesos de evaporación de aguas superficiales, si se presenta una pendiente de 2 indica presencia de aguas edáficas y si la pendiente es cercana de 0 indica aguas de origen geotérmico (Mook, 2000).

Los cambios de fase del agua producen cambios en sus firmas isotópicas, donde la evaporación produce un enriquecimiento en la fase líquida de isótopos pesados y un enriquecimiento en la fase de vapor de isótopos livianos (Mook, 2000). Este fraccionamiento isotópico depende fuertemente de la temperatura, pues las moléculas del agua con diferente masa molecular poseen presiones de vapor diferentes, donde la fase más volátil se enriquece en isótopos livianos o se empobrece en isótopos pesados y en sentido contrario ocurre con la fase menos volátil durante un cambio de fase (evaporación, condensación, sublimación) (Mook, 2000). A partir de las firmas isotópicas de deuterio ( $^2\text{H}$ ) y Oxígeno-18 ( $^{18}\text{O}$ ), ligadas a los cambios de fase del agua por cambios en la temperatura y a efectos de altura, que condicionan la cantidad de agua que cae, (presentándose un empobrecimiento del isótopo pesado a mayor cantidad de agua), es posible determinar la marca del origen del agua, el modo de recarga y procesos de descarga, la dinámica de los flujos subterráneos, las interconexiones entre acuíferos, entre otros (e.g. Clark y Fritz, 1997; Mook, 2000; Aggarwal et al., 2007).

De acuerdo con lo anterior, en el presente apartado se presentan los resultados de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  Y  $\delta^2\text{H}$  del agua lluvia, agua de manantiales y agua de corrientes superficiales y sus respectivas interpretaciones.

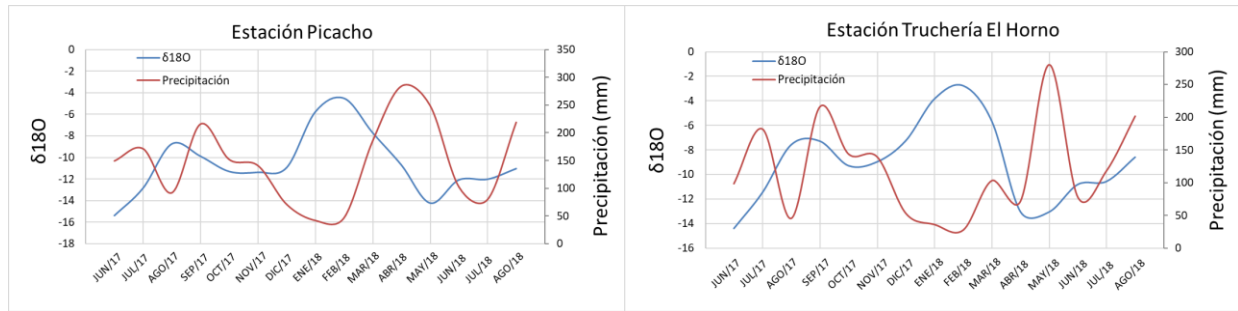
4.3.1. Composición isotópica de la precipitación. Los análisis isotópicos fueron realizados en muestras compuestas mensuales de agua lluvia, tomadas durante 15 meses (julio 2017 a septiembre 2018), cuyos resultados se muestran en las **Tablas 12 y 13**. Los resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  fueron comparados con los valores de precipitación reportados en cada una de las estaciones recolectoras de agua lluvia, con el fin de observar la variación del efecto de estacionalidad en la zona (**Figura 30**).

| No.   | Código de Estación | Tipo   | Fecha     | Mes Representativo | Altura (msnm) | Precipitación (mm) | $\delta^{18}\text{O}$<br>$\pm 0,07 \text{ ‰}$ | $\delta^2\text{H}$<br>$\pm 0,8 \text{ ‰}$ | d exc<br>‰ |
|-------|--------------------|--------|-----------|--------------------|---------------|--------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|
| 1     | PICACHO            | Lluvia | 3/07/2017 | Junio              | 3435          | 149                | -15,38                                        | -111,02                                   | 11,99      |
| 2     | PICACHO            | Lluvia | 5/08/2017 | Julio              |               | 171                | -12,82                                        | -87,30                                    | 15,28      |
| 3     | PICACHO            | Lluvia | 3/09/2017 | Agosto             |               | 92                 | -8,72                                         | -54,28                                    | 15,50      |
| 4     | PICACHO            | Lluvia | 4/10/2017 | Septiembre         |               | 216                | -9,86                                         | -63,98                                    | 14,94      |
| 5     | PICACHO            | Lluvia | 4/11/2017 | Octubre            |               | 152                | -11,28                                        | -77,20                                    | 13,04      |
| 6     | PICACHO            | Lluvia | 3/12/2017 | Noviembre          |               | 141                | -11,36                                        | -77,00                                    | 13,85      |
| 7     | PICACHO            | Lluvia | 5/01/2018 | Diciembre          |               | 71                 | -10,92                                        | -77,30                                    | 10,09      |
| 8     | PICACHO            | Lluvia | 4/02/2018 | Enero              |               | 42                 | -5,75                                         | -31,10                                    | 14,91      |
| 9     | PICACHO            | Lluvia | 3/03/2018 | Febrero            |               | 46                 | -4,49                                         | -17,50                                    | 18,42      |
| 10    | PICACHO            | Lluvia | 5/04/2018 | Marzo              |               | 186                | -7,69                                         | -48,00                                    | 13,56      |
| 11    | PICACHO            | Lluvia | 5/05/2018 | Abril              |               | 285                | -10,68                                        | -72,20                                    | 13,26      |
| 12    | PICACHO            | Lluvia | 3/06/2018 | Mayo               |               | 249                | -14,21                                        | -101,20                                   | 12,51      |
| 13    | PICACHO            | Lluvia | 6/07/2018 | Junio              |               | 103                | -12,06                                        | -84,2                                     | 12,3       |
| 14    | PICACHO            | Lluvia | 7/08/2018 | Julio              |               | 80                 | -12,00                                        | -85,2                                     | 10,8       |
| 15    | PICACHO            | Lluvia | 8/09/2018 | Agosto             |               | 219                | -11,01                                        | -75,2                                     | 12,9       |
| Total |                    |        |           |                    |               | 2201               | Prom.<br>Pond.                                | -11,16                                    | -75,89     |

**Tabla 12.** Resultados de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) del agua Lluvia en la Estación Picacho.

| No.   | Código de Estación | Tipo   | Fecha     | Mes<br>Representativo | Altura<br>(msnm) | Precipitación<br>(mm) | $\delta^{18}\text{O}$<br>$\pm 0,07 \text{ ‰}$ | $\delta^2\text{H}$<br>$\pm 0,8 \text{ ‰}$ | d exc<br>‰ |
|-------|--------------------|--------|-----------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|
| 16    | TRUCHERIA EL HORNO | Lluvia | 3/07/2017 | Junio                 | 2440             | 99                    | -14,40                                        | -105,42                                   | 9,81       |
| 17    | TRUCHERIA EL HORNO | Lluvia | 5/08/2017 | Julio                 |                  | 182                   | -11,45                                        | -79,89                                    | 11,75      |
| 18    | TRUCHERIA EL HORNO | Lluvia | 3/09/2017 | Agosto                |                  | 46                    | -7,57                                         | -47,57                                    | 12,98      |
| 19    | TRUCHERIA EL HORNO | Lluvia | 4/10/2017 | Septiembre            |                  | 216                   | -7,28                                         | -43,84                                    | 14,37      |
| 20    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 4/11/2017 | Octubre               |                  | 144                   | -9,28                                         | -61,40                                    | 12,84      |
| 21    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 3/12/2017 | Noviembre             |                  | 140                   | -8,96                                         | -60,70                                    | 10,99      |
| 22    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 5/01/2018 | Diciembre             |                  | 53                    | -7,23                                         | -48,80                                    | 9,01       |
| 23    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 4/02/2018 | Enero                 |                  | 36                    | -3,82                                         | -17,90                                    | 12,66      |
| 24    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 3/03/2018 | Febrero               |                  | 28                    | -2,75                                         | -4,70                                     | 17,29      |
| 25    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 5/04/2018 | Marzo                 |                  | 103                   | -5,66                                         | -33,90                                    | 11,35      |
| 26    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 5/05/2018 | Abril                 |                  | 72                    | -13,05                                        | -96,10                                    | 8,29       |
| 27    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 3/06/2018 | Mayo                  |                  | 280                   | -13,05                                        | -97,80                                    | 6,61       |
| 28    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 6/07/2018 | Junio                 |                  | 78                    | -10,81                                        | -77,4                                     | 9,0        |
| 29    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 7/08/2018 | Julio                 |                  | 118                   | -10,56                                        | -75,6                                     | 8,9        |
| 30    | TRUCHERÍA EL HORNO | Lluvia | 8/09/2018 | Agosto                |                  | 202                   | -8,58                                         | -58,1                                     | 10,5       |
| Total |                    |        |           |                       |                  | 1797                  | Prom.<br>Pond.                                | -9,80                                     | -67,77     |

**Tabla 13.** Resultados de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) del agua Lluvia en la Estación Truchería El Horno.



**Figura 30.** Variación temporal de la precipitación y  $\delta^{18}\text{O}$  en la Estación Picacho y Truchería El Horno.

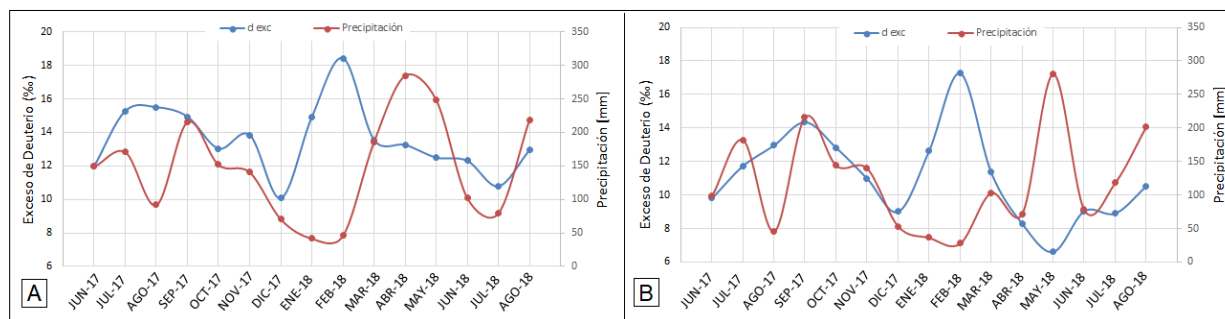
En la **Figura 30**, se observa que la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  es más enriquecida en los meses con menor cantidad de precipitación en comparación a los meses con mayor precipitación, evidenciando el efecto de estacionalidad que, para las zonas tropicales, está relacionado con la cantidad de la precipitación influenciada por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

La Estación Picacho reporta una composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de la precipitación entre -4,49 y -15,38 ‰ (vs VSMOW) y un promedio ponderado de -11,16‰ (vs VSMOW), mientras que la Estación Truchería El Horno presenta valores de  $\delta^{18}\text{O}$  que varían entre -2,75 y -14,40 ‰ (vs VSMOW) y un promedio ponderado de -9,8‰ (vs VSMOW), mostrando que el recolector de la estación de mayor altura y con mayor cantidad de precipitación (Estación Picacho) presenta valores más empobrecidos. Los promedios ponderados son calculados de acuerdo con la cantidad de precipitación de cada mes, siguiendo la ecuación:

$$\overline{\delta^{18}\text{O}}_{\text{Ponderado}} = \frac{\sum \delta^{18}\text{O}_{\text{mensual}} * \text{Precipitación}_{\text{mensual}}}{\text{Precipitación}_{\text{total}}}$$

Referente al exceso de deuterio del agua lluvia, se observan meses con exceso de deuterio entre 6,61 y 11,99‰ (vs VSMOW), y meses con un mayor exceso de deuterio, entre 12,7 y 18,4 ‰ (vs

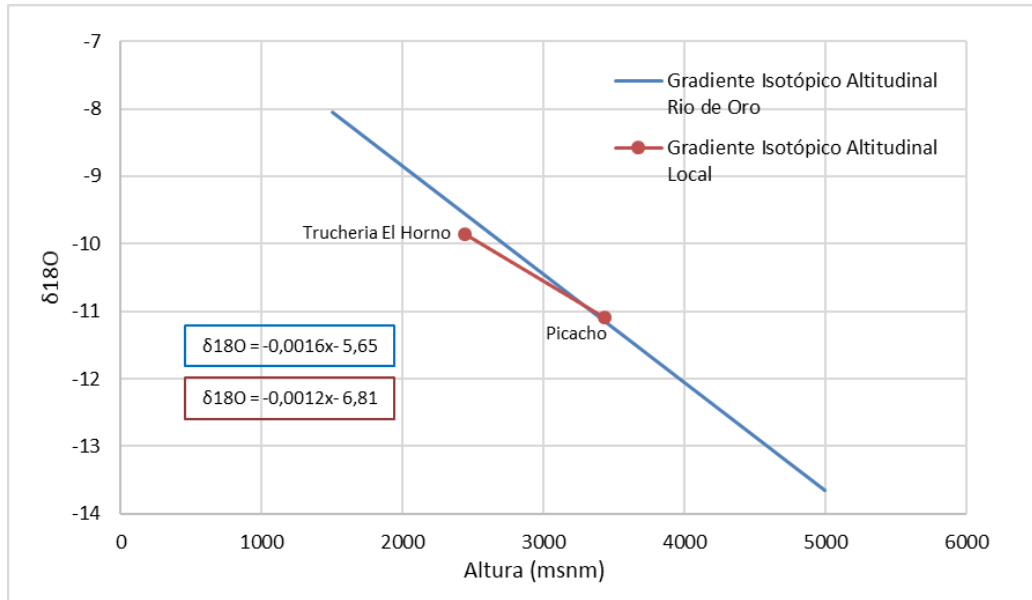
VSMOW). Comparando el exceso de deuterio con la cantidad de precipitación (**Figura 31**), se observa una correspondencia aproximada, donde a menor cantidad de lluvia mayor exceso de deuterio. Por otro lado, estudios en el mar mediterráneo y en la cuenca Amazónica han reportado que el origen de un exceso de deuterio mayor a 12 en las aguas lluvias proviene de procesos de reciclaje del vapor de agua (p.e. Salati *et al.*, 1979; Gat y Matsui, 199; Saighi, 2005; Jiménez y Custodio, 2008; Froehlich *et al.*, 2008; Aemisegger *et al.*, 2014). Sin embargo, a nivel del Macizo de Santander y de la Cordillera Oriental aún no se ha estudiado el origen de las masas de humedad que llegan hasta alturas mayores a 3500 msnm, necesario para entender los procesos de fraccionamiento isotópico que se presentan y que podrían explicar el origen del exceso de deuterio encontrado.



**Figura 31.** Exceso de deuterio versus cantidad de precipitación. A) Estación Picacho. B) Estación Truchería El Horno

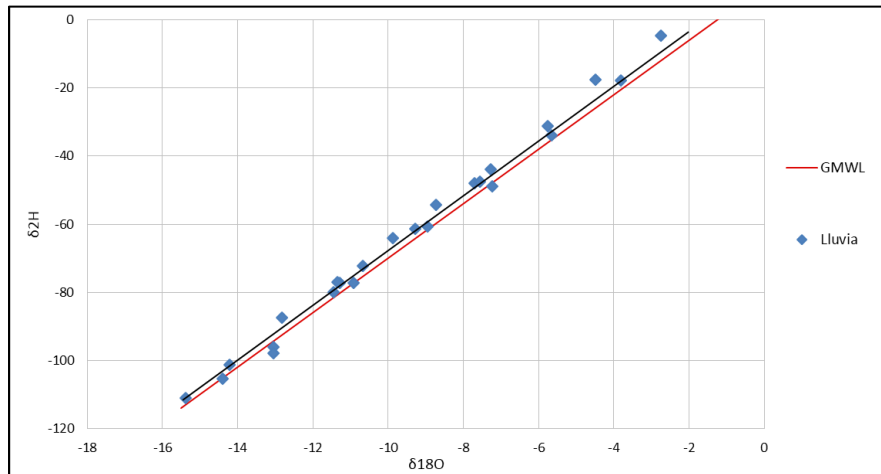
A partir de la composición isotópica de la lluvia se puede calcular un gradiente de fraccionamiento altitudinal el cual, a nivel del Macizo de Santander, en la cuenca del Rio de Oro, se ha estudiado entre los 1000 y 3500 msnm, reportando un empobrecimiento de  $-0,16\text{‰}$  cada 100 m (Gómez *et al.*, 2015). En el presente estudio, a partir de la composición isotópica ponderada

anual registrada por las estaciones Picacho y Truchería El Horno, se obtuvo un gradiente de -0,12‰ cada 100m de altura, presentando un menor fraccionamiento respecto al reportado para la cuenca del Rio de Oro (**Figura 32**). Se observa que el gradiente calculado se encuentra dentro del rango generalmente utilizado de -0,1 a -0,5‰, reportado por Fritz y Clark (1997).



**Figura 32.** Gradiente altitudinal de  $\delta^{18}O$  de la cuenta del Rio de Oro (Gómez *et al.*, 2015) y gradiente altitudinal  $\delta^{18}O$  local.

Finalmente, la relación entre las firmas isotópicas de  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  del agua lluvia permitieron calcular para el área de estudio la Línea Meteorica Local (LML) representada por la ecuación  $\delta^2H = 8,05 \delta^{18}O + 12,8$ , la cual es comparada con la Línea Meteorica Global (GMWL) (**Figura 33**).



**Figura 33.** Línea meteórica local del área de estudio (LML) y línea meteórica global (GMWL).

4.3.2. Composición isotópica de los manantiales y de corrientes superficiales. Los resultados de las composiciones isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de las muestras de agua de manantial y de corrientes superficiales se muestran en las **Tablas 14 y 15**. Estos datos se grafican sobre la línea meteórica local y se observa que las muestras de los manantiales caen sobre la línea y, por tanto, no sufrieron procesos de evaporación en su ciclo a la superficie y durante su infiltración (**Figura 34**). Así mismo, se considera que el agua de los manantiales es de origen meteórico por presentar firmas isotópicas que se ajustan a la Línea Meteórica Local y se encuentran en la misma zona del promedio ponderado anual de la lluvia y en el mismo intervalo de alturas. Por su parte, la mayoría de las muestras de aguas de corriente superficial muestran una composición isotópica que se concentra sobre la Línea Meteórica Local en la misma zona de los manantiales, asumiéndose un posible aporte de los flujos subterráneos.

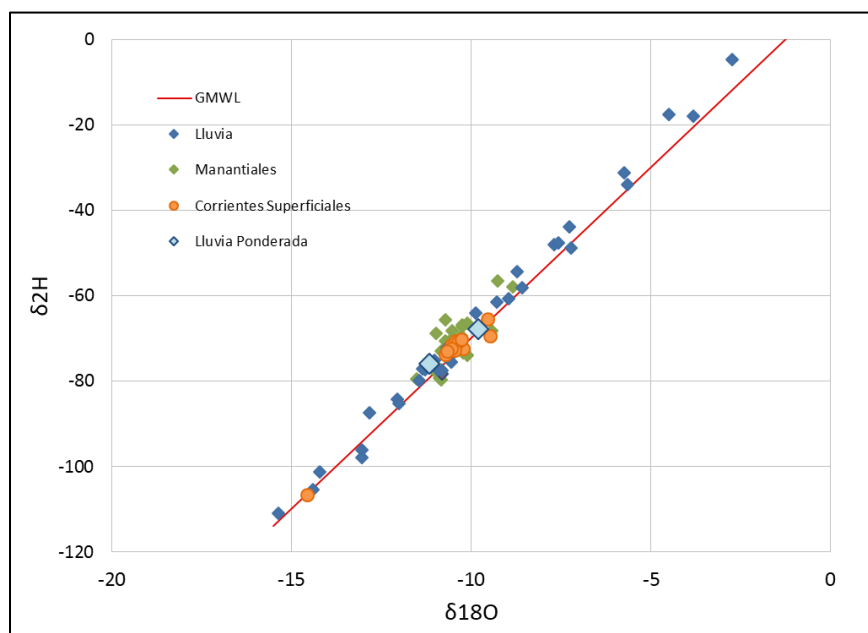
| No. | Código de Muestra | Tipo      | Fecha      | Altura<br>(msnm) | $\delta^{18}\text{O}$<br>$\pm 0,07\text{‰}$ | $\delta^2\text{H}$<br>$\pm 0,8\text{‰}$ | d exc<br>‰ |
|-----|-------------------|-----------|------------|------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|------------|
| 1   | M1                | manantial | 26/05/2017 | 3285             | -10.78                                      | -72.72                                  | 13.49      |
| 2   | M2                | manantial | 26/05/2017 | 3441             | -10.51                                      | -71.03                                  | 13.04      |
| 3   | M3                | manantial | 26/05/2017 | 3556             | -10.75                                      | -72.70                                  | 13.28      |
| 4   | M4                | manantial | 26/05/2017 | 3444             | -10.40                                      | -71.69                                  | 11.47      |
| 5   | M1                | manantial | 5/10/2017  | 3285             | -11.08                                      | -75.74                                  | 12.92      |
| 6   | M2                | manantial | 5/10/2017  | 3441             | -10.82                                      | -73.03                                  | 13.56      |
| 7   | M3                | manantial | 5/10/2017  | 3556             | -10.71                                      | -72.30                                  | 13.41      |
| 8   | M4                | manantial | 5/10/2017  | 3444             | -10.38                                      | -70.87                                  | 12.20      |
| 9   | M5                | manantial | 5/10/2017  | 3341             | -10.48                                      | -70.30                                  | 13.54      |
| 10  | M6                | manantial | 5/10/2017  | 3437             | -10.58                                      | -74.16                                  | 10.49      |
| 11  | M7                | manantial | 5/10/2017  | 3447             | -10.65                                      | -74.76                                  | 10.47      |
| 12  | M1                | manantial | 14/02/2018 | 3285             | -10.55                                      | -70.40                                  | 13.99      |
| 13  | M2                | manantial | 13/02/2018 | 3441             | -10.98                                      | -77.90                                  | 9.92       |
| 14  | M3                | manantial | 13/02/2018 | 3556             | -10.12                                      | -73.90                                  | 7.06       |
| 15  | M4                | manantial | 13/02/2018 | 3444             | -8.84                                       | -57.90                                  | 12.84      |
| 16  | M5                | manantial | 13/02/2018 | 3341             | -9.25                                       | -56.50                                  | 17.53      |
| 17  | M6                | manantial | 13/02/2018 | 3437             | -10.20                                      | -72.90                                  | 8.73       |
| 18  | M7                | manantial | 13/02/2018 | 3447             | -10.64                                      | -72.20                                  | 12.96      |
| 19  | M8                | manantial | 13/02/2018 | 3301             | -9.43                                       | -68.20                                  | 7.21       |
| 20  | M9                | manantial | 14/02/2018 | 3277             | -10.25                                      | -67.10                                  | 14.89      |
| 21  | M10               | manantial | 14/02/2018 | 3056             | -10.26                                      | -66.80                                  | 15.29      |
| 22  | M1                | manantial | 24/03/2018 | 3285             | -10.53                                      | -68.10                                  | 16.17      |
| 23  | M2                | manantial | 24/03/2018 | 3441             | -10.89                                      | -79.30                                  | 7.78       |
| 24  | M3                | manantial | 24/03/2018 | 3556             | -10.22                                      | -73.40                                  | 8.33       |
| 25  | M9                | manantial | 24/03/2018 | 3277             | -10.11                                      | -66.50                                  | 14.41      |
| 26  | M2                | manantial | 5/05/2018  | 3441             | -10.72                                      | -65.60                                  | 20.12      |
| 27  | M3                | manantial | 5/05/2018  | 3556             | -10.51                                      | -72.1                                   | 12.0       |
| 28  | M4                | manantial | 5/05/2018  | 3444             | -11.51                                      | -79.50                                  | 12.61      |
| 29  | M8                | manantial | 5/05/2018  | 3301             | -10.85                                      | -79.70                                  | 7.07       |
| 30  | M6                | manantial | 5/05/2018  | 3437             | -10.48                                      | -71.10                                  | 12.72      |
| 31  | M1                | manantial | 2/06/2018  | 3285             | -10.73                                      | -70.50                                  | 15.34      |
| 32  | M2                | manantial | 2/06/2018  | 3441             | -10.97                                      | -68.80                                  | 18.98      |
| 33  | M3                | manantial | 2/06/2018  | 3556             | -10.81                                      | -78.30                                  | 8.19       |
| 34  | M4                | manantial | 2/06/2018  | 3444             | -10.38                                      | -72.30                                  | 10.77      |
| 35  | M6                | manantial | 1/06/2018  | 3437             | -10.27                                      | -69.40                                  | 12.76      |
| 36  | M8                | manantial | 2/06/2018  | 3301             | -10.83                                      | -77.30                                  | 9.32       |
| 37  | M9                | manantial | 2/06/2018  | 3277             | -10.56                                      | -70.10                                  | 14.40      |

**Tabla 14.** Resultados de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) de manantiales.



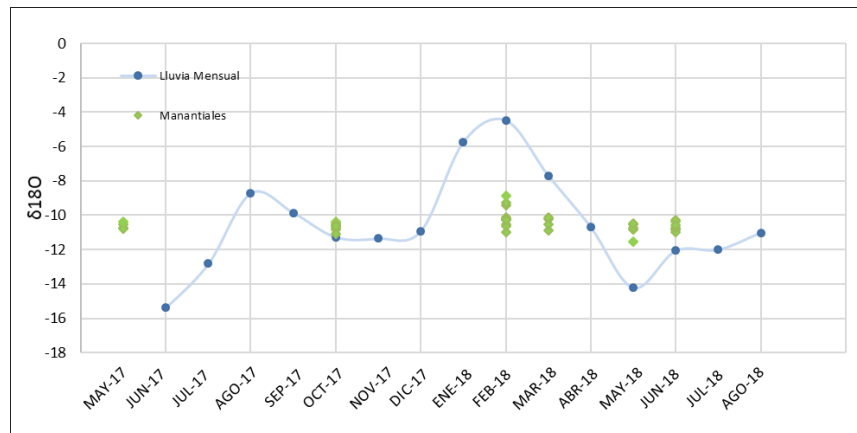
| No. | Código de Muestra                                       | Tipo             | Fecha      | Altura<br>(msnm) | $\delta^{18}\text{O}$<br>$\pm 0,07 \text{ ‰}$ | $\delta^2\text{H}$<br>$\pm 0,8 \text{ ‰}$ | d exc<br>‰ | Q<br>(L/s) |
|-----|---------------------------------------------------------|------------------|------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|------------|
| 1   | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 5/01/2018  | 2440             | -9,55                                         | -65,50                                    | 10,88      | -          |
| 2   | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 4/02/2018  | 2440             | -14,56                                        | -106,5                                    | 10,0       | -          |
| 3   | Q. La Moza Parte Media Alta                             | agua superficial | 14/02/2018 | 2969             | -10,57                                        | -71,50                                    | 13,03      | -          |
| 4   | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 5/04/2018  | 2440             | -10,45                                        | -72,40                                    | 11,18      | -          |
| 5   | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 5/05/2018  | 2440             | -10,22                                        | -72,40                                    | 9,33       | -          |
| 6   | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 3/06/2018  | 2440             | -9,47                                         | -69,30                                    | 6,50       | -          |
| 7   | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 6/07/2018  | 2440             | -10,43                                        | -70,6                                     | 12,9       | -          |
| 8   | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 7/08/2018  | 2440             | -10,36                                        | -70,7                                     | 12,2       | -          |
| 9   | Q. La Moza metros abajo del Nacimiento                  | agua superficial | 11/08/2018 | 3442             | -10,71                                        | -73,7                                     | 11,9       | 0,32       |
| 10  | Q. La Moza Parte Media Alta                             | agua superficial | 11/08/2018 | 2969             | -10,46                                        | -72,7                                     | 11,0       | 29,4       |
| 11  | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 11/08/2018 | 2440             | -10,27                                        | -70,2                                     | 11,9       | 190        |
| 12  | Q. Picacho                                              | agua superficial | 13/08/2018 | 3212             | -10,55                                        | -72,41                                    | 12,0       | 1,87       |
| 13  | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 8/09/2018  | 2440             | -10,68                                        | -72,9                                     | 12,6       | -          |
| 14  | Truchería El Horno, metros abajo del Cierre Qb. La Moza | agua superficial | 9/01/2019  | 2440             | -                                             | -                                         | -          | 136        |

**Tabla 15.** Resultados de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) de agua superficial.



**Figura 34.** Relación de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de las muestras de agua manantial y agua superficial respecto a la Línea Meteorica Local (agua lluvia, rombos azules) y la lluvia promedio ponderada (rombos celestes).

Se realizó una comparación general entre la variación temporal de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de la lluvia mensual de la Estación Picacho y de las aguas de manantial (**Figura 35**). En la comparación se puede observar que la variación temporal de la firma isotópica de los manantiales es menor respecto a la firma del agua lluvia mensual.



**Figura 35.** Comparación de las variaciones temporales isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  de agua lluvia mensual (Estación Picacho) y manantiales.

4.3.3. Análisis del comportamiento temporal de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de los manantiales. Los manantiales presentes en la zona de estudio fueron agrupados en 3 subsistemas debido a su separación geográfica, a las fallas geológicas y las diferentes litologías donde afloran (**Figura 36**), lo cual permitió un mejor análisis y entendimiento de los flujos subterráneos.

- **Subsistema 1 (SS1)**

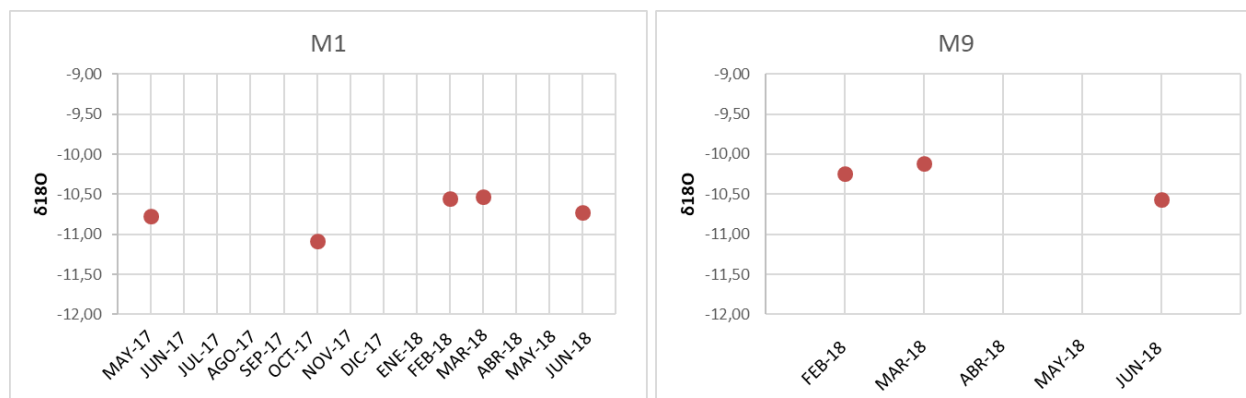
El subsistema 1 corresponde a los puntos manantiales M1, M9 y M10, ubicados entre la Falla El Picacho y la Falla Las Cruces, al norte de la zona de estudio (**Figura 36**). El manantial M1 aflora en un cambio fuerte de pendiente, en rocas carbonatadas de la Formación Rosablanca, las cuales presentan grietas por disolución, irregularidad de los planos de fracturas con aberturas de más de 2 mm y formación de dolinas, las cuales se pueden atribuir a su zona de recarga, que sobrepasa la divisoria de agua (**Figura 37**), configurándose en esta zona un sistema cárstico. Los datos de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de las muestras del manantial M1 arrojan valores de -11,08 a -10,53‰ (vs VSMOW) (**Tabla 16**), mostrando poca variabilidad temporal (**Figura 38**).



Por su parte, el manantial M9 aflora igualmente en un cambio fuerte de pendiente, en rocas de la Formación Los Santos, que corresponden a cuarzoarenitas cementadas y fracturadas. Los datos de su composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  arrojan valores de -10,56 a -10,11‰ (vs VSMOW) (**Tabla 16**), mostrando igualmente poca variabilidad temporal (**Figura 38**). Por último, el manantial M10 aflora a media ladera en un coluvión compuesto por bloques de areniscas y calizas, el cual fue muestreado en época seca y arrojó un valor de  $\delta^{18}\text{O}$  de -10.26‰ (vs VSMOW) (**Tabla 16**).

| SUBSISTEMA 1 |                                           |                                           |                                     |
|--------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| Fecha        | M1                                        | M9                                        | M10                                 |
|              | (Fm. Rosablanca)<br>$\delta^{18}\text{O}$ | (Fm. Los Santos)<br>$\delta^{18}\text{O}$ | (Coluvión)<br>$\delta^{18}\text{O}$ |
| 26/05/2017   | -10,78                                    | -                                         | -                                   |
| 5/10/2017    | -11,08                                    | -                                         | -                                   |
| 14/02/2018   | -10,55                                    | -10,25                                    | -10,26                              |
| 24/03/2018   | -10,53                                    | -10,11                                    | -                                   |
| 2/06/2018    | -10,73                                    | -10,56                                    | -                                   |

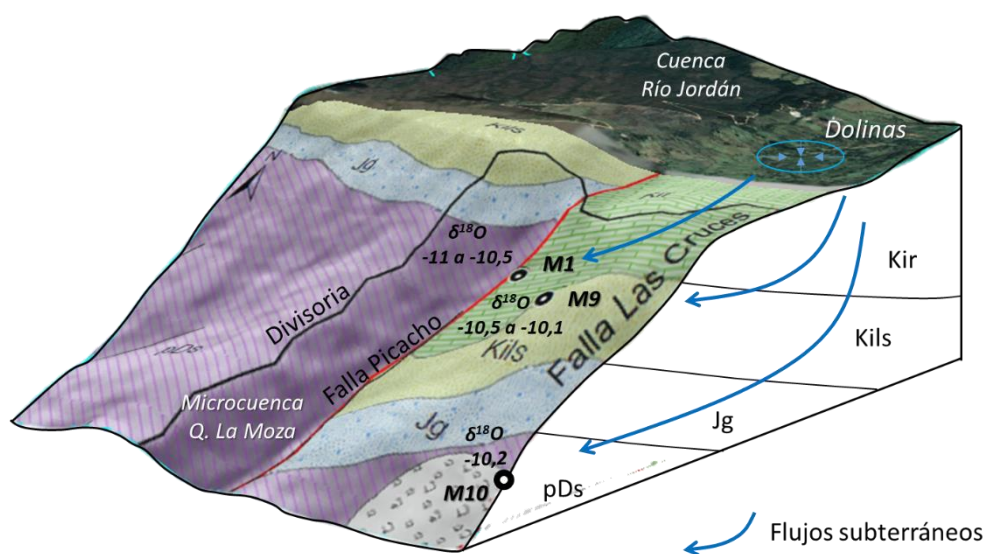
**Tabla 16.** Composición Isotópica  $\delta^{18}\text{O}$  de los manantiales del Subsistema 1



**Figura 38.** Variación temporal de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de los manantiales M1 y M9.

A partir de las composiciones isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  reportadas en los manantiales presentes en el Subsistema 1, se sugiere presencia de flujos subterráneos constantes a lo largo del tiempo (escala mensual), con un origen común debido a la baja variabilidad temporal y espacial (**Figura 39**).

Debido a la cercanía de los manantiales a la divisoria de aguas de la microcuenca Q. La Moza, al caudal constante reportado por los manantiales (que al compararlo con el área aferente superficial pequeña es de valor considerable) y a la topografía abrupta donde afloran los manantiales (que favorece la esorrentía superficial sobre procesos de infiltración), se propone que los flujos subterráneos presentan una zona de recarga con un área aferente subterránea mayor que la superficial, sobrepasando la divisoria de agua y cubriendo parte de la cuenca hidrográfica adyacente (cuenca del Río Jordán).



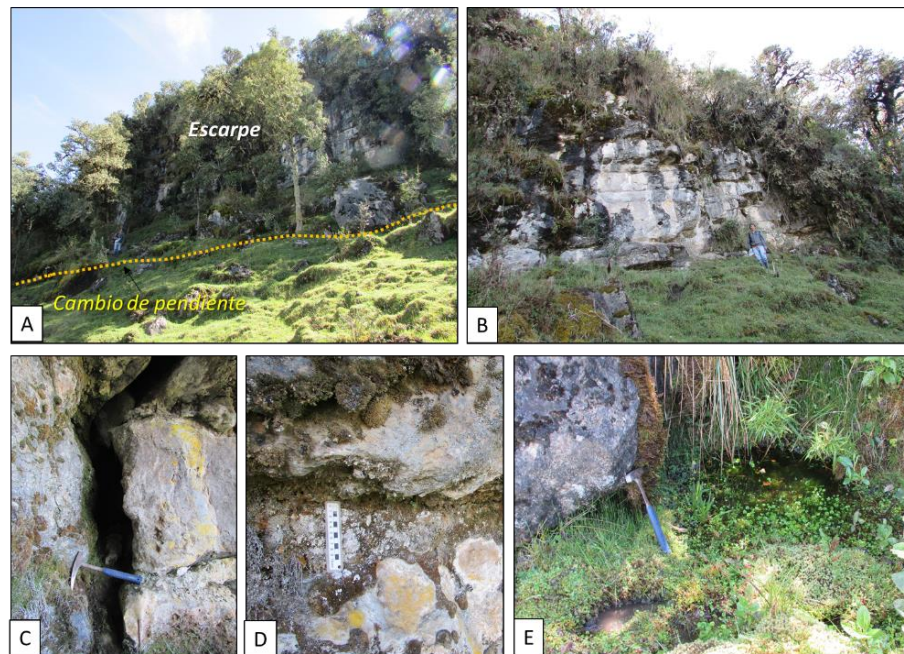
**Figura 39.** Bloque diagrama del Subsistema 1 donde se muestran los posibles flujos subterráneos y la composición isotópica de los manantiales M1, M9 y M10.

- **Subsistema 2 (SS2)**

El subsistema 2 corresponde a los puntos manantiales M2, M3, M4, M5 y M8, ubicados al sureste de la zona de estudio (**Figura 36**). El manantial M2 aflora en la base de un escarpe (cambio de pendiente) de rocas carbonatadas de la Formación Rosablanca, en donde se presentan grietas de



más de 20 cm de abertura, irregularidad en las superficies de la roca por procesos de disolución y dolinas, configurando, al igual que el manantial M1, un sistema cárstico (**Figura 40**).

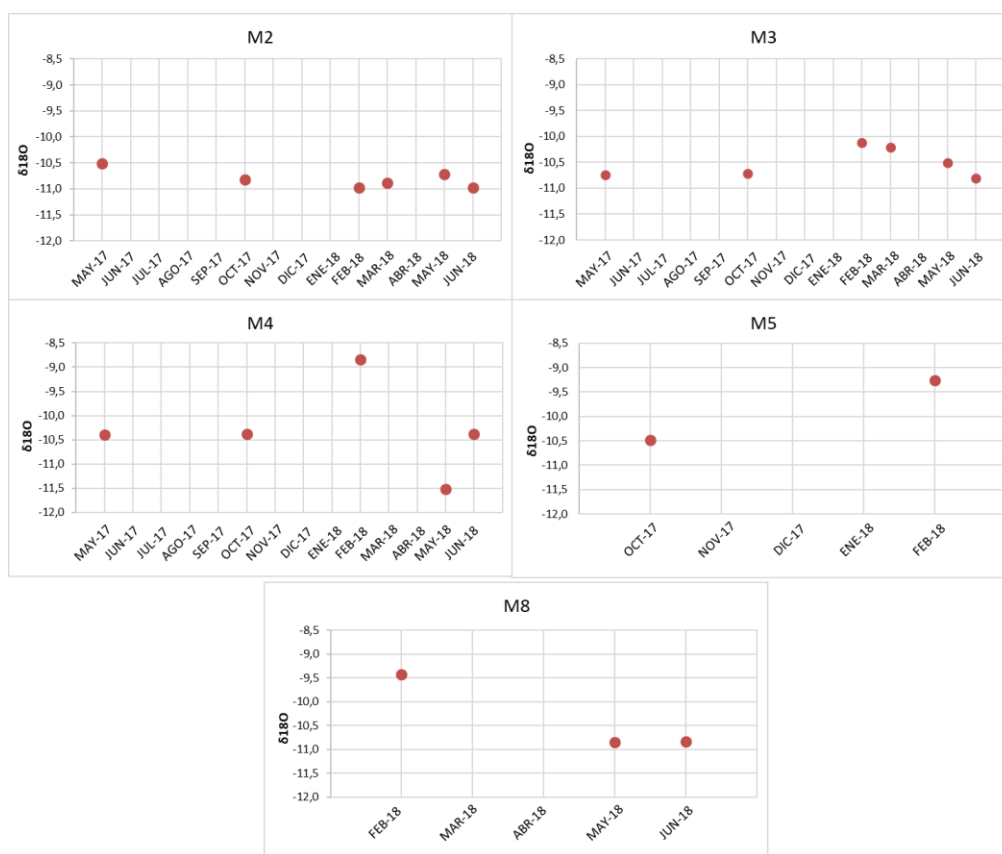


**Figura 40.** A) Escarpe de la Formación Rosablanca. B) Afloramiento de la Formación Rosablanca. C) Grieta con abertura. D) Superficies irregulares. E) Manantial M2.

El cambio en la pendiente se produce por la presencia de un nivel arcilloso de la unidad, que a su vez se comporta como un sello que permite el afloramiento del flujo subterráneo. Las muestras de agua en el manantial M2 arrojan una composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  con valores de -10,98 a -10,51‰ (vs VSMOW) (**Tabla 17**), mostrando poca variabilidad temporal (**Figura 41**).

| SUBSISTEMA 2 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |
|--------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Fecha        | M2<br>(Fm. Rosablanca)<br>$\delta^{18}\text{O}$ | M3<br>(Fm. Los Santos)<br>$\delta^{18}\text{O}$ | M4<br>(Fm. Rosablanca)<br>$\delta^{18}\text{O}$ | M5<br>(Fm. Los Santos)<br>$\delta^{18}\text{O}$ | M8<br>(Fm. Rosablanca)<br>$\delta^{18}\text{O}$ |
| 26/05/2017   | -10,51                                          | -10,75                                          | -10,40                                          | -                                               | -                                               |
| 5/10/2017    | -10,82                                          | -10,71                                          | -10,38                                          | -10,48                                          | -                                               |
| 13/02/2018   | -10,98                                          | -10,12                                          | -8,84                                           | -9,25                                           | -9,43                                           |
| 24/03/2018   | -10,89                                          | -10,22                                          | -                                               | -                                               | -                                               |
| 5/05/2018    | -10,72                                          | -10,51                                          | -11,51                                          | -                                               | -10,85                                          |
| 2/06/2018    | -10,97                                          | -10,81                                          | -10,38                                          | -                                               | -10,83                                          |

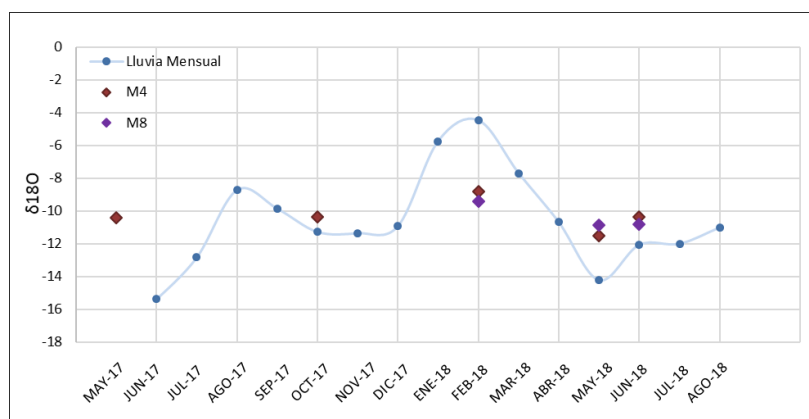
**Tabla 17.** Composición Isotópica  $\delta^{18}\text{O}$  de los manantiales del Subsistema 2.



**Figura 41.** Variación temporal de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de los manantiales M2, M3, M4, M5 y M8.

El manantial M8 aflora a media ladera, igualmente en rocas carbonatadas de la Formación Rosablanca, pocos metros más abajo del manantial M2, donde parte de su agua proviene de este manantial (M2). Las muestras de agua del manantial M8 muestran una firma isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  que

varía temporalmente de -10,85 a -9,43‰ (vs VSMOW) (**Tabla 17 y Figura 41**), evidenciando una posible mezcla con aguas de escorrentía subsuperficial. Por otro lado, el manantial M4 aflora en un nivel de areniscas de grano fino inmaduras de la Formación Rosablanca, presentando en su firma isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  una amplia variación temporal, con valores de -11,51 a -8,84‰ (vs VSMOW) (**Tabla 17 y Figura 41**) que posiblemente evidencia, de igual forma, una mezcla con agua de escorrentía subsuperficial. Sin embargo, estas variaciones pueden corresponder también a un posible signo de transferencia rápida del agua lluvia, que modifica las firmas isotópicas de estos dos manantiales (M4 y M8) en época seca donde la lluvia es más enriquecida. Para tratar de verificar lo anterior, se realizó una comparación con los contenidos isotópicos de la lluvia mensual de la estación Picacho (**Figura 42**), donde se observa que solo hay una leve concordancia con el valor reportado en el mes de octubre de 2017 en el manantial M4, descartándose en los otros meses una relación directa con la lluvia correspondiente, sin embargo, se debe seguir monitoreando los manantiales y el agua lluvia para descartar completamente esta hipótesis.



**Figura 42.** Comparación de los contenidos isotópicos de la lluvia mensual de la Estación Picacho y los manantiales M4 y M8.



El manantial M3 aflora en cuarzoarenitas de la Formación Los Santos, en un leve cambio de pendiente cerca de la divisoria de aguas de la microcuenca. Su firma isotópica muestra poca variación temporal, arrojando valores de -10,81 a -10,12‰ (vs VSMOW) (**Tabla 17 y Figura 41**), que evidencia su carácter subterráneo, y permite plantear, de igual forma que en el subsistema 1, una zona de recarga que sobrepasa la divisoria de aguas. Así mismo, el manantial M5 aflora en un suelo residual arcilloso de la Formación Los Santos, que brota a la mitad de una pendiente suave y presenta una firma isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  que varía de -10,48 a -9,25 ‰ (vs VSMOW) evidenciando, de igual manera que en los casos anteriores, una posible mezcla con aguas de escorrentía subsuperficial o agua lluvia (**Tabla 17 y Figura 41**).

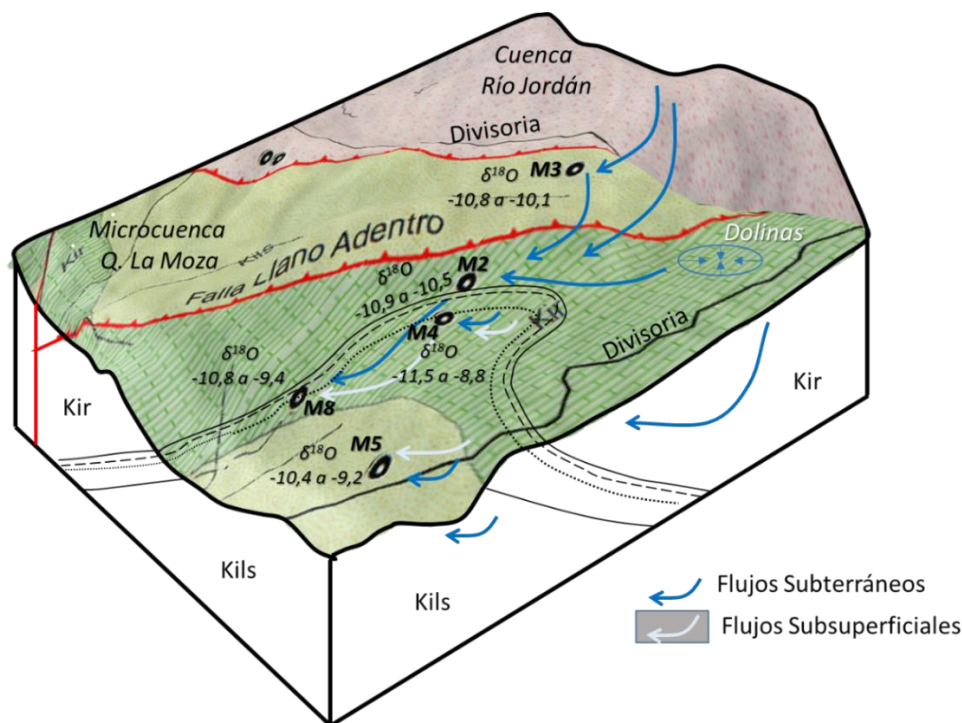
Finalmente, del subsistema 2 se puede plantear un origen común entre las aguas de los manantiales M2 y M3, por su concordancia en las firmas isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$ , que posiblemente provienen de la cuenca adyacente (**Figura 43**). Por otro lado, se plantea una mezcla de aguas subsuperficiales y subterráneas para los manantiales M4, M5 y M8, que presentan una variación temporal en sus firmas isotópicas, lo cual indica que los flujos de agua presentes en el subsistema 2 son más recientes que los presentes en los subsistemas 1 y 3, que solo presentan flujos subterráneos (**Figura 43**).

- **Subsistema 3 (SS3)**

El subsistema 3 corresponde a los puntos manantiales M6 y M7, ubicados en el bloque colgante de la Falla Santana, al este de la zona de estudio (**Figura 36**). Los manantiales afloran a media ladera en granodioritas de grano grueso meteorizadas de la unidad Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. Los datos de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de las muestras del manantial M6 arrojan

valores de -10,58 a -10,20‰ (vs VSMOW) y del manantial M7 de -10,65 a -10,64‰ (vs VSMOW) (**Tabla 18**) mostrando poca variabilidad temporal, que evidencia un flujo subterráneo (**Figura 44**).

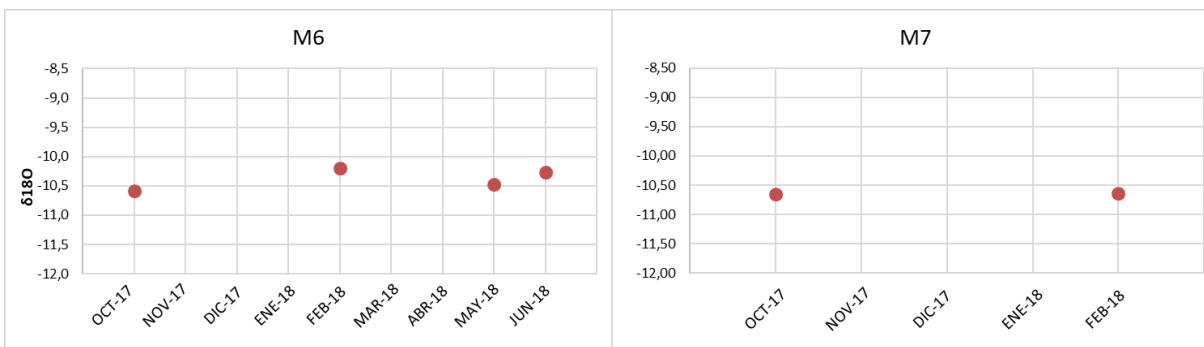
La cercanía de los puntos manantiales M6 y M7 a la divisoria de aguas, el caudal permanente reportado y la topografía abrupta donde afloran, permite plantear, al igual que en el subsistema 1 y el manantial M3, que posiblemente parte de la recarga de los flujos subterráneos proviene de la cuenca del Río Jordán. La descarga del sistema en M6 y M7 es causada por la influencia de la Falla Santana, que pone en contacto rocas ígneas meteorizadas permeables con cuarzoarenitas de menor permeabilidad (**Figura 45**). Cabe mencionar que la falla no es impermeable en todo su plano, debido a que metros abajo de los manantiales M6 y M7 afloran los manantiales M2, M3, M4, M5 y M8, que evidencian el paso del flujo por la falla y una conexión en profundidad entre los subsistemas SS2 y SS3.



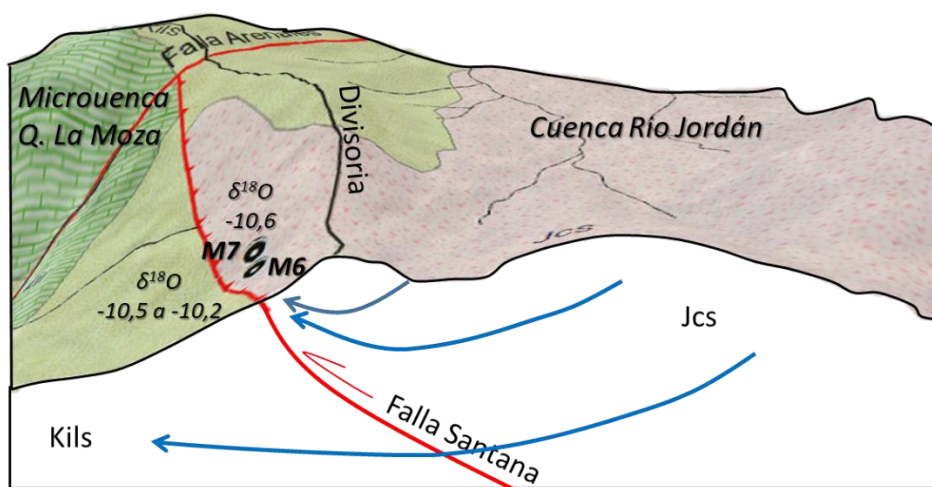
**Figura 43.** Bloque diagrama del Subsistema 2 donde se muestran los posibles flujos subterráneos y la composición isotópica de los manantiales M2, M3, M4, M5 y M8.

| SUBSISTEMA 3 |                                    |                                    |
|--------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Fecha        | M6                                 | M7                                 |
|              | (Cuarzomonzonita de Santa Bárbara) | (Cuarzomonzonita de Santa Bárbara) |
|              | $\delta^{18}\text{O}$              | $\delta^{18}\text{O}$              |
| 5/10/2017    | -10,58                             | -10,65                             |
| 13/02/2018   | -10,20                             | -10,64                             |
| 5/05/2018    | -10,48                             | -                                  |
| 1/06/2018    | -10,27                             | -                                  |

**Tabla 18.** Composición Isotópica  $\delta^{18}\text{O}$  de los manantiales del Subsistema 3.



**Figura 44.** Variación temporal de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de los manantiales M6 y M7.

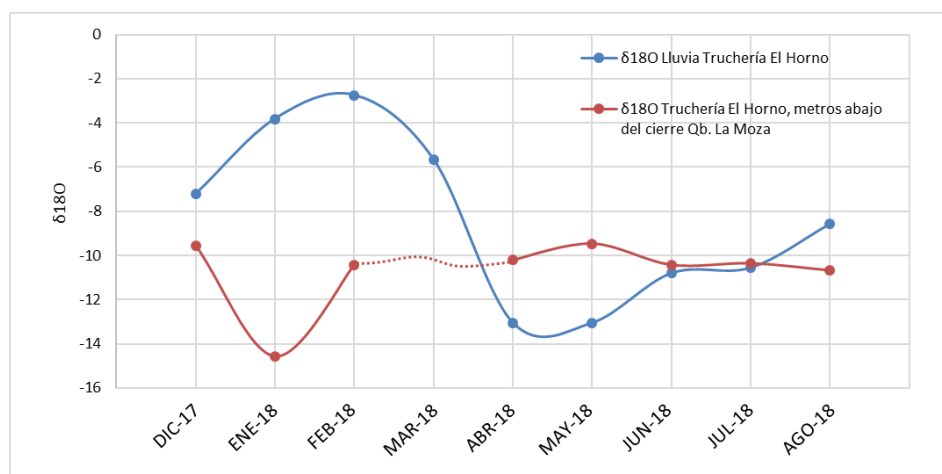


**Figura 45.** Bloque diagrama del Subsistema 3 donde se muestran los posibles flujos subterráneos y la composición isotópica de los manantiales M6 y M7.

4.3.4. Análisis del comportamiento temporal de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de las corrientes superficiales. Se realizó una comparación entre la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de las muestras compuestas mensuales de lluvia de la Estación Truchería El Horno y las muestras puntuales de la corriente superficial, metros más abajo del cierre de la microcuenca Quebrada La Moza, a nivel de la Truchería El Horno. Debido a que los muestreos se realizaron iniciando cada mes, los datos son representativos del mes anterior (**Tabla 19 y Figura 46**).

| Fecha del Muestreo | Mes representativo | Precipitación (mm) | $\delta^{18}\text{O}$ Luvia | $\delta^{18}\text{O}$ Qb. La Moza |
|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 5/01/2018          | Diciembre          | 53                 | -7,23                       | -9,55                             |
| 4/02/2018          | Enero              | 36                 | -3,82                       | -14,56                            |
| 3/03/2018          | Febrero            | 28                 | -2,75                       | -10,45                            |
| 5/04/2018          | Marzo              | 103                | -5,66                       | -                                 |
| 5/05/2018          | Abril              | 72                 | -13,05                      | -10,22                            |
| 3/06/2018          | Mayo               | 280                | -13,05                      | -9,47                             |
| 6/07/2018          | Junio              | 78                 | -10,81                      | -10,43                            |
| 7/08/2018          | Julio              | 118                | -10,56                      | -10,36                            |
| 8/09/2018          | Agosto             | 202                | -8,58                       | -10,68                            |

**Tabla 19.** Comparación de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de la lluvia y agua de corriente superficial, metros abajo del cierre de la Quebrada La Moza.



**Figura 46.** Comportamiento temporal de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de la lluvia de la Estación Truchería El Horno y metros abajo del cierre de la corriente superficial Quebrada La Moza, a nivel de la Truchería El Horno.

En la **Figura 46** se observa que, la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de la quebrada muestra un comportamiento aproximadamente constante, exceptuando el valor reportado para el mes de enero (muestra tomada en febrero 2018) que presenta un fuerte empobrecimiento de  $\delta^{18}\text{O}$  de -14,56‰ (vs VSMOW), atribuido a un evento de lluvia esporádica en la época seca que permite obtener un valor tan empobrecido. Lo anterior no es posible atribuirlo a flujo base, ya que los valores isotópicos de los manantiales se encuentran principalmente en un rango de  $\delta^{18}\text{O}$  de -11,5 a 10,1 ‰ (vs VSMOW). Por otro lado, en los meses donde se observa un comportamiento aproximadamente constante se puede plantear que existe en la corriente una mezcla entre agua subterránea y agua de escorrentía superficial que mantienen el flujo.

Se analizó la composición isotópica de la muestra tomada en la parte media alta de la Quebrada La Moza, el 14 de febrero de 2018 (época seca). En las **Figuras 7 y 36** se puede observar que aguas arriba de este muestreo se ubican los manantiales M3, M6 y M7, que reflejan la composición isotópica del agua subterránea y, por lo tanto, es posible comparar estas firmas isotópicas y observar su comportamiento en el mes del muestreo (**Tabla 20**). En ese sentido, se observa una buena correspondencia entre las firmas isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  de los manantiales (-10,64 a -10,12‰ -vs VSMOW-), y la reportada por la corriente superficial (-10,57‰ -vs VSMOW-), que permite proponer un aporte importante de los flujos subterráneos a la corriente.

| Código de Muestra            | Tipo             | Fecha      | $\delta^{18}\text{O}$ |
|------------------------------|------------------|------------|-----------------------|
| Qb. La Moza Parte Media Alta | Agua Superficial | 14/02/2018 | -10,57                |
| M3                           | Manantial        | 13/02/2018 | -10,12                |
| M6                           | Manantial        | 13/02/2018 | -10,20                |
| M7                           | Manantial        | 13/02/2018 | -10,64                |

**Tabla 20.** Composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de la parte media alta de la Quebrada la Moza y los manantiales M3, M6 y M7.

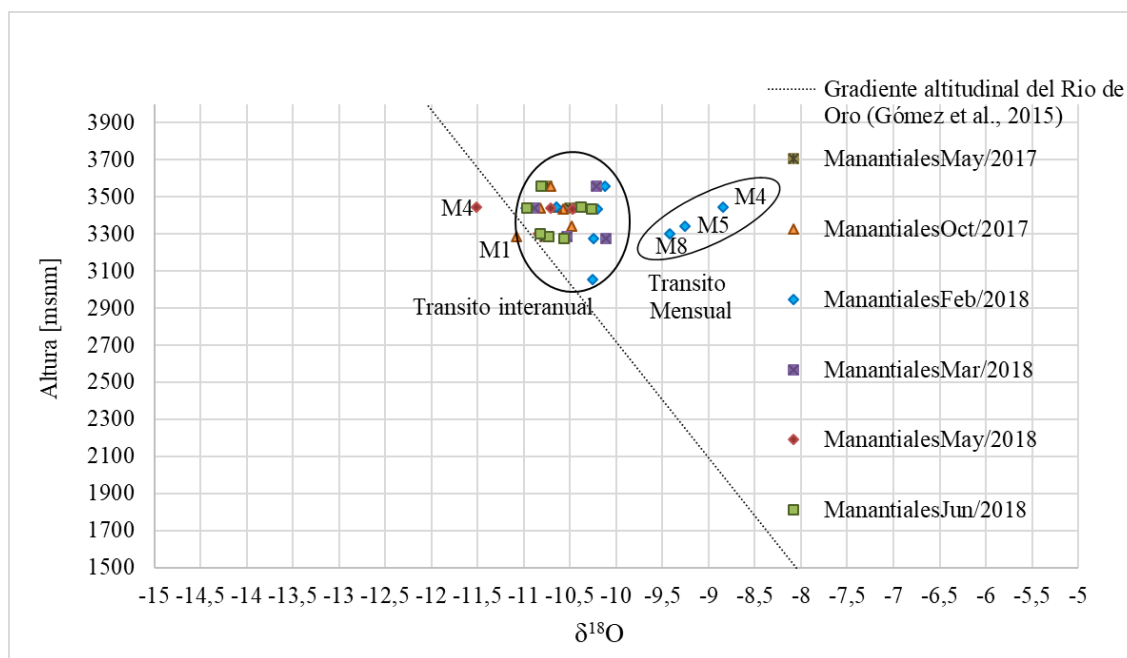
Finalmente, a partir de los resultados de la composición isotópica de las corrientes superficiales, para las muestras tomadas el 11 y 13 de agosto del 2018, se observa que la composición isotópica presenta un leve enriquecimiento de mayor a menor altura (aguas abajo) y de menor a mayor caudal, variando de -10,71 a -10,27 (**Tabla 21**). Sin embargo, la variación que se presenta es baja y, por lo tanto, puede ser despreciada y considerarse que espacialmente en el mes de agosto de 2018 el contenido isotópico de las aguas de las corrientes superficiales es constante en la microcuenca de la quebrada La Moza. Teniendo en cuenta lo anterior, y que 30 días antes del muestreo hubo poca cantidad de lluvia precipitada ( $\approx 30$  mm), se puede plantear la hipótesis de que el flujo de las corrientes es alimentado mayoritariamente por los flujos subterráneos, que mantienen su firma isotópica aproximadamente constante espacialmente.

| Código de Muestra                                          | Tipo             | Fecha      | Altura<br>(msnm) | Q(L/s) | $\delta^{18}\text{O}$<br>$\pm 0,07 \text{ ‰}$ |
|------------------------------------------------------------|------------------|------------|------------------|--------|-----------------------------------------------|
| Q. La Moza metros abajo del Nacimiento                     | Agua Superficial | 11/08/2018 | 3442             | 0,3    | -10,71                                        |
| Q. Picacho                                                 | Agua Superficial | 13/08/2018 | 3212             | 1,9    | -10,61                                        |
| Q. La Moza Parte Media Alta                                | Agua Superficial | 11/08/2018 | 2975             | 29     | -10,46                                        |
| Trucheria El Horno, metros abajo del<br>Cierre Qb. La Moza | Agua Superficial | 11/08/2018 | 2456             | 190    | -10,27                                        |

**Tabla 21.** Composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  de la microcuenca hidrográfica Quebrada la Moza del mes de agosto 2018.

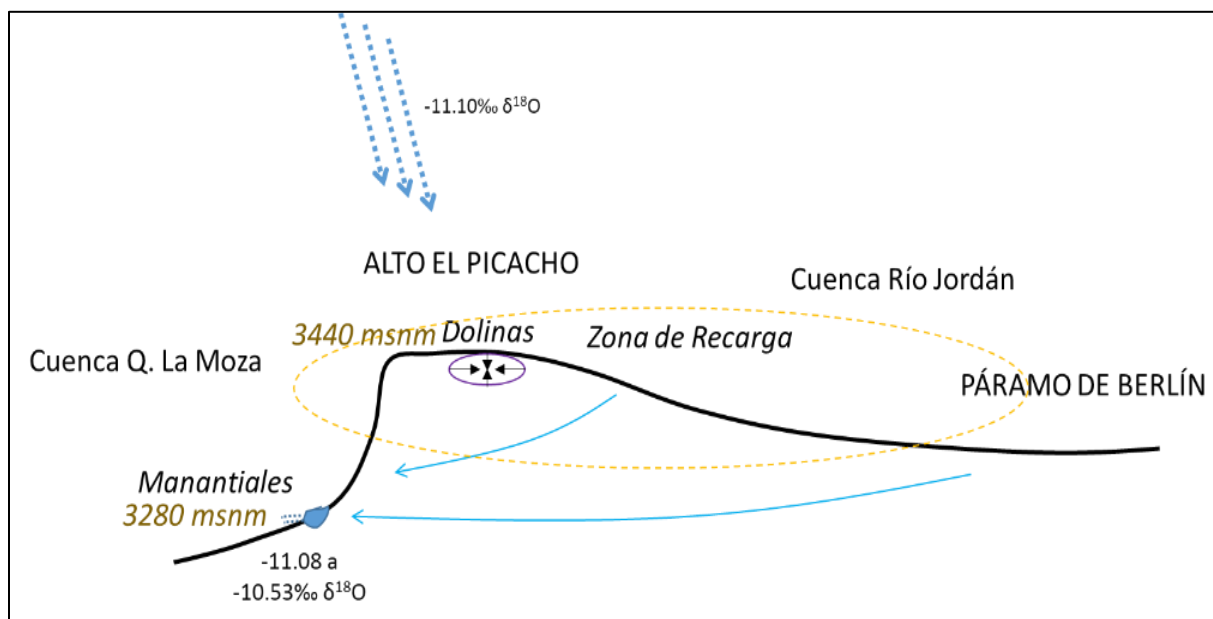
4.3.5. Análisis de la zona de recarga de los flujos subterráneos. Se realizó el análisis de la zona de recarga de los flujos subterráneos a partir de los datos de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  del agua de los manantiales y sus alturas con relación al gradiente isotópico de -0.16‰ cada 100 m, determinado en el trabajo de Gómez *et al.* (2015) (**Figura 47**). Se toma el gradiente de Gómez *et al.* (2015), por representar un área mayor del macizo rocoso.

En la **Figura 47** la mayoría de los manantiales muestreados se ubican por encima de la recta del gradiente isotópico altitudinal, por tanto, se puede concluir que existe una recarga local y debido a la baja variación en la composición isotópica se proponer que corresponden a flujos con un tránsito a escala interanual. Por otro lado, se observan tres puntos manantiales del muestreo de febrero del 2018 separados del grupo, con valores enriquecidos en su contenido de  $\delta^{18}\text{O}$  (M4, M5 y M8), que se puede atribuir a mezclas con escorrentía tardía (flujos subsuperficiales), donde los eventos de lluvia que la generaron son enriquecidos por presentarse en época seca. Se propone para este grupo de manantiales, un tránsito a escala mensual, debido a las variaciones en sus composiciones isotópicas. Por su parte, los puntos manantiales M1 y M4 se ubican debajo de la recta, presentando un empobrecimiento que puede ser atribuido a una influencia de agua lluvia a la hora del muestreo, que por corresponder a una época lluviosa presenta un empobrecimiento en el contenido isotópico modificando la señal de los manantiales.



**Figura 47.** Estimación de la zona de recarga de los flujos subterráneos.

Finalmente, debido a que la mayoría de los manantiales afloran en alturas cercanas a la divisoria de aguas de la microcuenca hidrográfica (entre 3280 a 3560 msnm), donde en el sector El Picacho se puede estimar una diferencia de altura de 160 m aproximadamente entre los manantiales y la divisoria, que a partir de su composición isotópica se corrobora su carácter subterráneo y una infiltración local, que los manantiales mantienen un caudal permanente y presentan un área aferente superficial pequeña con topografía abrupta (que favorece la esorrentía superficial), se plantea que los flujos subterráneos poseen un área aferente subterránea mayor que sobrepasa la divisoria de agua y presentan un área de recarga que cubre parte de la cuenca adyacente (cuenca Río Jordán) donde se localiza el Páramo de Berlín (**Figura 48**). Sin embargo, se requiere realizar estudios isotópicos en la cuenca del Río Jordán para poder precisar esta zona de recarga.



**Figura 48.** Esquema de la zona de recarga de los flujos subterráneos.



4.3.6. Análisis de eventos de lluvia en el sistema cárstico del Subsistema 1. Como se mencionó en la metodología, se realizó la instalación de un dispositivo Diver en la quebrada Picacho (afluente de la quebrada La Moza), unos metros más abajo de la salida de agua del manantial M1 (**Figura 7**), con el fin de monitorear los caudales en este punto del sistema. Por otro lado, en el mes de mayo del 2018, considerado como época lluviosa, se realizó durante eventos de lluvia un muestreo intensivo de la corriente para el análisis de conductividad eléctrica y composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  (**Tabla 22**).

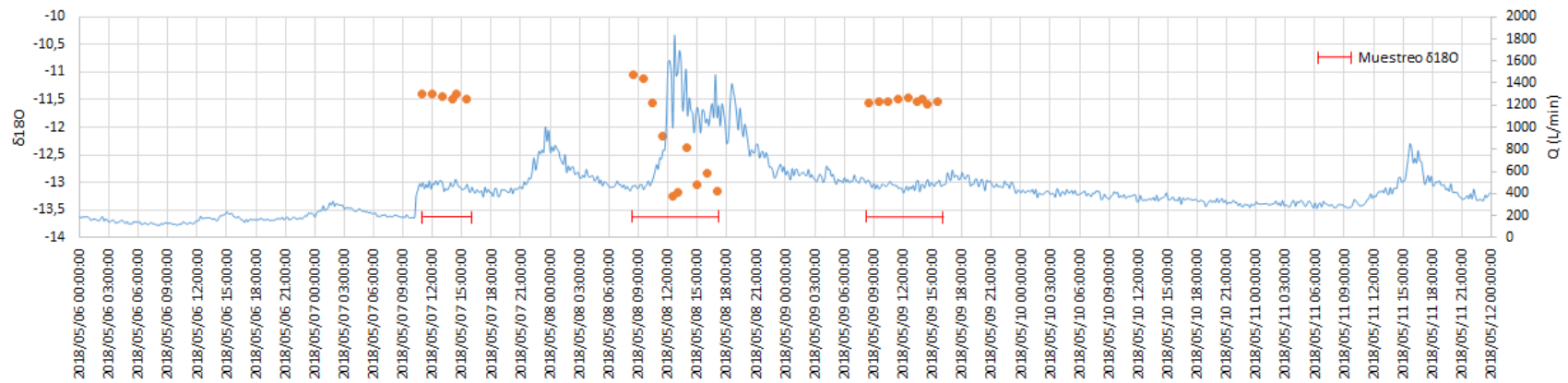
A partir de los datos de caudales de los días 6, 7, 8, 9 y 10 de mayo del 2018, se realiza el respectivo hidrograma, donde se resalta el periodo de los muestreos (**Figura 49**). El hidrograma muestra que solo se puede considerar como un evento de crecida el muestreo realizado el día 8 de mayo, pues el 7 y 9 de mayo no se observa un cambio importante en el caudal. De acuerdo a lo anterior, solo se analizó el comportamiento de la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  y de la conductividad eléctrica en la crecida del 8 de mayo, la cual tuvo una duración de 8 horas y 30 minutos. Cabe mencionar que, por tratarse de una época lluviosa, el sistema no se encuentra en su flujo base al momento de realizar los muestreos intensivos, por tanto, todos los contenidos determinados corresponden a una mezcla de agua de escorrentía y agua superficial. Sin embargo, al presentarse un evento como el del 8 de mayo, que aumenta considerablemente el caudal de la corriente, se puede observar un cambio importante en los valores del contenido isotópico y la conductividad eléctrica.

En la **Figura 50**, se muestra que al aumentar el caudal se obtiene una disminución de la mineralización del agua y un empobrecimiento de  $\delta^{18}\text{O}$ , presentando una concordancia entre la caída de los valores de conductividad eléctrica y la composición isotópica. Una vez es observada

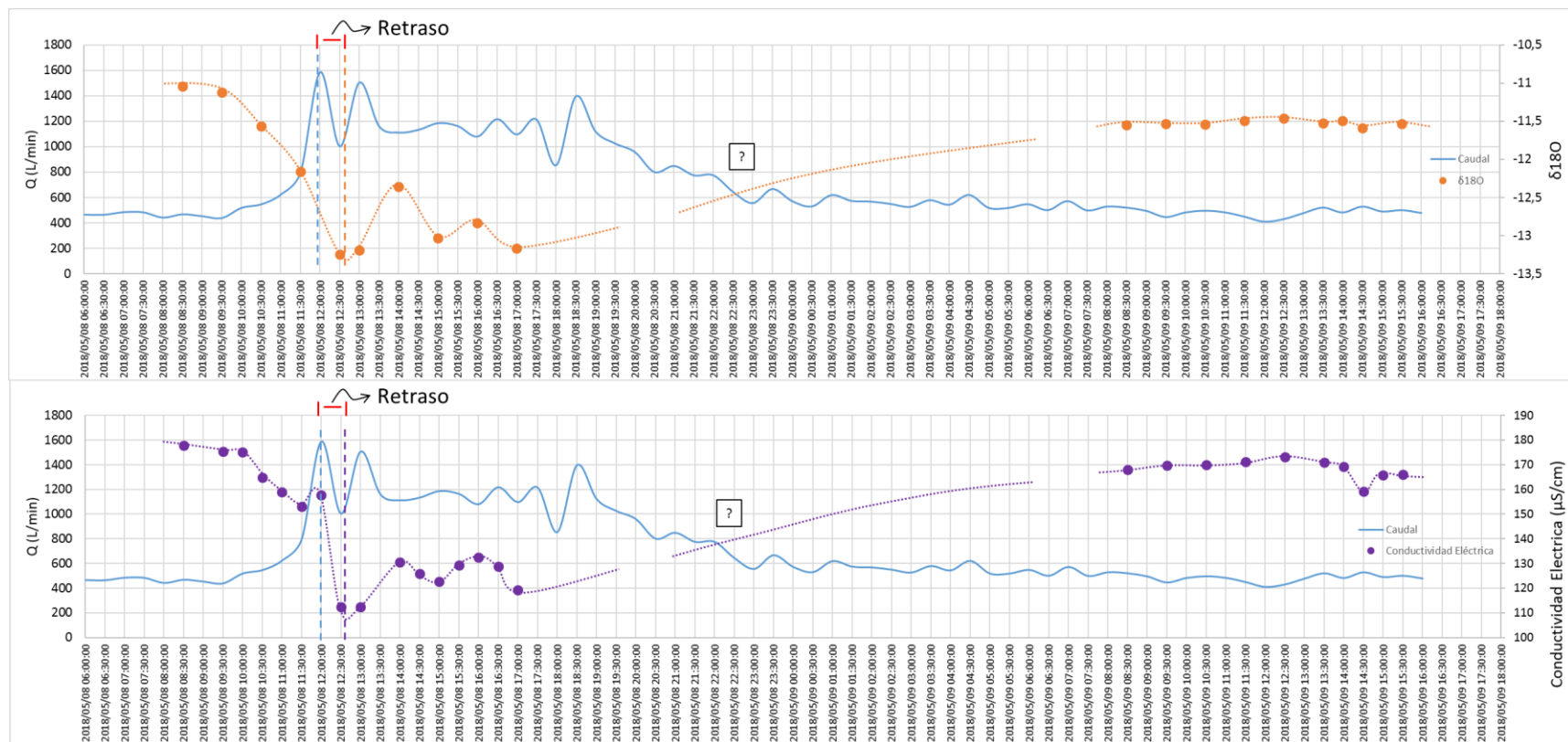
la respuesta del evento de lluvia en el caudal de la corriente, se presenta un retraso de aproximadamente 30 minutos entre el pico del hidrograma y el valor mínimo del contenido de  $\delta^{18}\text{O}$  y de la conductividad eléctrica, donde se puede evidenciar una mayor mezcla de la escorrentía superficial con el agua proveniente del manantial (**Figura 50**). Por otro lado, se observa que después del evento de crecida se inicia la recesión del sistema que dura hasta el siguiente día (11 horas aproximadamente), donde el muestreo del 9 de mayo muestra una recuperación de los valores del contenido isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  y la conductividad eléctrica registrados antes del evento (7 de mayo).

| Fecha    | Hora  | Nivel (cm) | Caudal (L/min) | Conductividad Eléctrica (μS/cm) | δ18O ± 0,07 ‰ | δ2H ± 0,8 ‰ | d exc | Observaciones               |
|----------|-------|------------|----------------|---------------------------------|---------------|-------------|-------|-----------------------------|
| 7-may-18 | 11:00 | 37,3       | 502            | 174                             | -11,39        | -78,30      | 12,84 | Sin lluvia                  |
| 7-may-18 | 11:30 | 36,9       | 456            | 174,6                           | -             | -           | -     | Inicio de llovizna          |
| 7-may-18 | 12:00 | 37,2       | 494            | 175,5                           | -11,40        | -79,37      | 11,83 | Inicio de llovizna          |
| 7-may-18 | 12:30 | 37,1       | 480            | 150,3                           | -             | -           | -     | Lluvia más fuerte           |
| 7-may-18 | 13:00 | 37,3       | 497            | 174,0                           | -11,44        | -78,50      | 13,03 | Disminución de lluvia       |
| 7-may-18 | 13:30 | 36,7       | 435            | 173,5                           | -             | -           | -     | Sin lluvia                  |
| 7-may-18 | 14:00 | 37,0       | 465            | 172,7                           | -11,48        | -79,50      | 12,36 | Sin lluvia                  |
| 7-may-18 | 14:30 | 37,2       | 494            | 173,9                           | -11,39        | -79,59      | 11,53 | Sin lluvia                  |
| 7-may-18 | 15:00 | 36,8       | 437            | -                               | -             | -           | -     |                             |
| 7-may-18 | 15:30 | 37,2       | 487            | 171,6                           | -11,50        | -79,74      | 12,27 | Sin lluvia                  |
| 8-may-18 | 8:30  | 37,0       | 467            | 177,7                           | -11,04        | -76,99      | 11,33 | Llovizna inciente           |
| 8-may-18 | 9:00  | 36,9       | 453            | -                               | -             | -           | -     |                             |
| 8-may-18 | 9:30  | 36,8       | 438            | 175,4                           | -11,12        | -76,92      | 12,07 | Llovizna inciente           |
| 8-may-18 | 10:00 | 37,4       | 518            | 175,0                           | -             | -           | -     | Lluvia moderada             |
| 8-may-18 | 10:30 | 37,6       | 545            | 164,9                           | -11,56        | -80,59      | 11,93 | Lluvia de moderada a fuerte |
| 8-may-18 | 11:00 | 38,1       | 623            | 158,8                           | -             | -           | -     | Lluvia moderada             |
| 8-may-18 | 11:30 | 39,1       | 796            | 153,1                           | -12,16        | -84,34      | 12,93 | Lluvia moderada             |
| 8-may-18 | 12:00 | 41,7       | 1586           | 157,7                           | -             | -           | -     | Llovizna                    |
| 8-may-18 | 12:30 | 39,9       | 1002           | 112,4                           | -13,25        | -94,10      | 11,87 | Llovizna                    |
| 8-may-18 | 13:00 | 41,5       | 1505           | 112,5                           | -13,19        | -94,29      | 11,26 | Poca llovizna               |
| 8-may-18 | 13:30 | 40,5       | 1160           | -                               | -             | -           | -     |                             |
| 8-may-18 | 14:00 | 40,3       | 1110           | 130,6                           | -12,36        | -86,69      | 12,19 | Llovizna                    |
| 8-may-18 | 14:30 | 40,4       | 1132           | 125,8                           | -             | -           | -     | Lluvia moderada             |
| 8-may-18 | 15:00 | 40,6       | 1185           | 122,6                           | -13,04        | -92,03      | 12,26 | Lluvia moderada             |
| 8-may-18 | 15:30 | 40,5       | 1162           | 129,2                           | -             | -           | -     | Llovizna                    |
| 8-may-18 | 16:00 | 40,2       | 1079           | 132,5                           | -12,83        | -90,90      | 11,77 | Llovizna                    |
| 8-may-18 | 16:30 | 40,7       | 1216           | 128,8                           | -             | -           | -     | Llovizna                    |
| 8-may-18 | 17:00 | 40,3       | 1096           | 119,3                           | -13,17        | -93,23      | 12,13 | Leve llovizna               |
| 9-may-18 | 8:30  | 37,4       | 520            | 167,9                           | -11,55        | -81,09      | 11,30 | Sin lluvia                  |
| 9-may-18 | 9:00  | 37,2       | 495            | -                               | -             | -           | -     |                             |
| 9-may-18 | 9:30  | 36,8       | 446            | 169,7                           | -11,54        | -79,53      | 12,78 | Sin lluvia                  |
| 9-may-18 | 10:00 | 37,1       | 482            | -                               | -             | -           | -     |                             |
| 9-may-18 | 10:30 | 37,2       | 496            | 169,9                           | -11,54        | -79,70      | 12,65 | Sin lluvia                  |
| 9-may-18 | 11:00 | 37,1       | 483            | -                               | -             | -           | -     |                             |
| 9-may-18 | 11:30 | 36,9       | 449            | 171,1                           | -11,49        | -80,29      | 11,65 | Sin lluvia                  |
| 9-may-18 | 12:00 | 36,5       | 409            | -                               | -             | -           | -     |                             |
| 9-may-18 | 12:30 | 36,7       | 430            | 173,2                           | -11,46        | -79,08      | 12,62 | Sin lluvia                  |
| 9-may-18 | 13:00 | 37,1       | 477            | -                               | -             | -           | -     |                             |
| 9-may-18 | 13:30 | 37,4       | 520            | 171,0                           | -11,53        | -79,59      | 12,66 | Inicio de lluvia            |
| 9-may-18 | 14:00 | 37,1       | 482            | 169,3                           | -11,50        | -79,88      | 12,10 | Lluvia moderada             |
| 9-may-18 | 14:30 | 37,5       | 528            | 159,3                           | -11,59        | -80,06      | 12,67 | Lluvia moderada             |
| 9-may-18 | 15:00 | 37,2       | 489            | 165,8                           | -             | -           | -     | Llovizna moderada           |
| 9-may-18 | 15:30 | 37,3       | 500            | 166,0                           | -11,54        | -79,96      | 12,35 | Llovizna moderada           |

**Tabla 22.** Resultados del muestreo intensivo realizado en la Quebrada Picacho.



**Figura 49.** Hidrograma de la Quebrada Picacho (cada 10 minutos) de los días 6, 7, 8, 9, 10 y 11 de mayo del 2018.



**Figura 50.** Hidrograma de la Quebrada Picacho (cada 30 minutos) versus composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  y conductividad eléctrica.

De acuerdo con lo anterior se puede concluir que la influencia de la esorrentía superficial en eventos de crecidas, durante una época lluviosa, solo se mantiene pocas horas retornando los valores a los contenidos isotópicos iniciales representativas del flujo base o de una mezcla con el flujo base.

#### 4.4. Análisis Hidroquímicos

El análisis hidroquímico se encuentra enfocado en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (conductividad eléctrica, temperatura y pH) medidos en el agua lluvia, agua de manantial y de corrientes superficiales, y en la composición de iones mayoritarios de los manantiales, determinados en época lluviosa (octubre 2018) y época seca (febrero 2018) y de una muestra de corriente superficial.

4.4.1. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos. Los parámetros fisicoquímicos fueron tomados directamente en campo en la mayoría de los muestreos realizados. A continuación, se muestra el análisis de resultados de los valores registrados en el agua lluvia, agua de manantial y de corrientes superficiales.

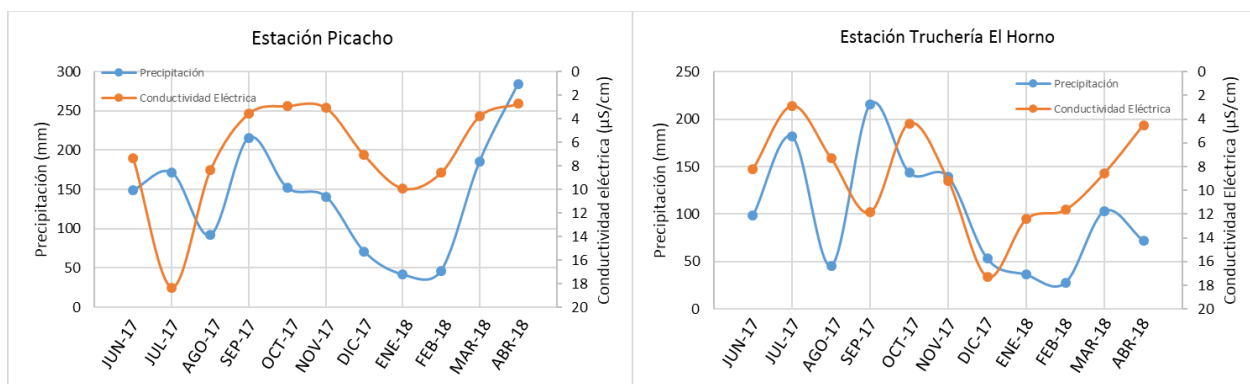
##### **Parámetros fisicoquímicos del agua lluvia**

Los parámetros fisicoquímicos registrados en el agua de los recolectores de cada estación se muestran en la **Tabla 23**, estos datos reflejan una aproximación para el agua lluvia, debido a que los valores de conductividad eléctrica y pH están afectados por la disolución de partículas finas depositadas en el recolector. Los datos se muestran con el fin de tener una idea general del valor de los parámetros fisicoquímicos del agua lluvia.

| Código de Estación | Fecha     | Precipitación<br>(mm) | Parámetros Fisicoquímicos          |                     |     |
|--------------------|-----------|-----------------------|------------------------------------|---------------------|-----|
|                    |           |                       | Conductividad<br>Eléctrica (uS/cm) | Temperatura<br>(°C) | pH  |
| PICACHO            | 3/07/2017 | 149                   | 7,4                                | -                   | 6,4 |
| PICACHO            | 5/08/2017 | 171                   | 18,3                               | 9,8                 | 8,1 |
| PICACHO            | 3/09/2017 | 92                    | 8,4                                | 9,7                 | 7,5 |
| PICACHO            | 4/10/2017 | 216                   | 3,6                                | 11,1                | 5,5 |
| PICACHO            | 4/11/2017 | 152                   | 2,9                                | 10,1                | 8,8 |
| PICACHO            | 3/12/2017 | 141                   | 3,0                                | 11,3                | 8,1 |
| PICACHO            | 5/01/2018 | 71                    | 7,1                                | 11,0                | 5,9 |
| PICACHO            | 4/02/2018 | 42                    | 9,9                                | 12,5                | 8,5 |
| PICACHO            | 3/03/2018 | 46                    | 8,6                                | 11,9                | 8,0 |
| PICACHO            | 5/04/2018 | 186                   | 3,8                                | 13,0                | 7,4 |
| PICACHO            | 5/05/2018 | 285                   | 2,7                                | 13,0                | 7,6 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 3/07/2017 | 99                    | 8,2                                | 14,7                | 7,3 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 5/08/2017 | 182                   | 2,9                                | 16,7                | 7,7 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 3/09/2017 | 46                    | 7,3                                | 16,9                | 7,5 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 4/10/2017 | 216                   | 11,9                               | 16,1                | 7,7 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 4/11/2017 | 144                   | 4,4                                | 15,9                | 7,1 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 3/12/2017 | 140                   | 9,2                                | 19,2                | -   |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 5/01/2018 | 53                    | 17,3                               | 20,5                | 7,9 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 4/02/2018 | 36                    | 12,4                               | 19,5                | 8,1 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 3/03/2018 | 28                    | 11,7                               | 19,0                | 7,6 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 5/04/2018 | 103                   | 8,6                                | 13,0                | 6,9 |
| TRUCHERÍA EL HORNO | 5/05/2018 | 72                    | 4,5                                | 16,7                | 8,2 |

**Tabla 23.** Parámetros Fisicoquímicos del agua mensual de los recolectores.

La estación Picacho muestra valores de conductividad eléctrica entre 2,7 y 18,3 con un promedio de 6,9  $\mu\text{S/cm}$ , mientras que la estación Truchería El horno, presenta un rango de 2,9 a 17,3  $\mu\text{S/cm}$  con un promedio de 7,6  $\mu\text{S/cm}$ , observándose una baja variación entre la parte alta y baja de la microcuenca. Por otro lado, se observa una concordancia inversa entre la cantidad de precipitación y los valores de conductividad eléctrica (**Figura 51**). Los datos de temperatura muestran una diferencia entre los valores registrados en la estación Picacho y la estación Truchería El Horno, con promedios de 11,3 y 17, 1°C, respectivamente, mostrando una evidente disminución de la temperatura a mayor altura. Los valores de pH del agua lluvia no muestran gran variación ni temporal ni entre las estaciones, registrando valores entre 5,5 a 8,8 (ácidas a básicas), con un promedio de 7,5 (aguas neutras).



**Figura 51.** Variación temporal de la precipitación y la conductividad eléctrica en la Estación Picacho y Truchería El Horno.

### Parámetros fisicoquímicos de manantiales

Los parámetros fisicoquímicos medidos en campo, en el agua de los manantiales, registran temperaturas que varían de 8,2 a 16°C, con un promedio de 10,8°C. Los valores de pH muestran en promedio aguas diluidas neutras (7,7) con cambios a ligeramente acidas (6,5) y ligeramente básicas (8,5) (**Tabla 24**). Respecto a la conductividad eléctrica medida en los flujos subterráneos, se observa que se encuentra fuertemente influenciada por el tipo de roca donde afloran los manantiales, presentando bajos valores que varían de 18 μS/cm (coluvión) a 343 μS/cm (calizas) (**Tabla 25**).

| Manantial | Fecha      | Parámetros Fisicoquímicos                    |                                       |      |
|-----------|------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|------|
|           |            | Conductividad<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Temperatura<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | pH   |
| M1        | 4/10/2017  | 271                                          | 10,8                                  | 8,49 |
| M2        | 5/10/2017  | 260                                          | 12,9                                  | 8,13 |
| M3        | 5/10/2017  | 24,8                                         | 10,7                                  | 8,45 |
| M4        | 5/10/2017  | 98,5                                         | 10,6                                  | 7,89 |
| M5        | 5/10/2017  | 21,4                                         | 10,6                                  | 7,64 |
| M6        | 5/10/2017  | 35,6                                         | 9                                     | 7,97 |
| M7        | 5/10/2017  | 28,3                                         | 10,8                                  | 8,04 |
| M1        | 14/02/2018 | 227,7                                        | 11,1                                  | 7,64 |
| M2        | 13/02/2018 | 320,6                                        | 10                                    | 7,25 |
| M3        | 13/02/2018 | 41,6                                         | 8,2                                   | 7,9  |
| M4        | 13/02/2018 | 138,2                                        | 9,4                                   | 7,77 |
| M5        | 13/02/2018 | 29,6                                         | 9,1                                   | 8,2  |
| M6        | 13/02/2018 | 41,21                                        | 10,6                                  | 7,6  |
| M7        | 13/02/2018 | 30,6                                         | 10,8                                  | 7,91 |
| M8        | 13/02/2018 | 191,8                                        | 8,9                                   | 8    |
| M9        | 14/02/2018 | 49,8                                         | 11,9                                  | 7,5  |
| M10       | 14/02/2018 | 18,2                                         | 14,55                                 | 7,54 |
| M1        | 24/03/2018 | 240,3                                        | 10,5                                  | 7,28 |
| M2        | 24/03/2018 | 343                                          | 10,8                                  | 7,73 |
| M3        | 24/03/2018 | 46,7                                         | 9,7                                   | 6,47 |
| M9        | 24/03/2018 | 76,9                                         | 12,03                                 | 7,3  |
| M2        | 5/05/2018  | 263,7                                        | 11,13                                 | 7,28 |
| M3        | 5/05/2018  | 19,68                                        | 9,83                                  | 7,6  |
| M4        | 5/05/2018  | 92,57                                        | 10,48                                 | 7,02 |
| M6        | 5/05/2018  | 33,3                                         | 10,73                                 | -    |
| M8        | 5/05/2018  | 162,7                                        | 10,77                                 | 8,11 |
| M1        | 2/06/2018  | 225,3                                        | 10,3                                  | -    |
| M2        | 2/06/2018  | 321                                          | 9,8                                   | -    |
| M3        | 2/06/2018  | 19,63                                        | 9,8                                   | -    |
| M4        | 2/06/2018  | 95,3                                         | 12,5                                  | -    |
| M6        | 2/06/2018  | 24,1                                         | 16                                    | -    |
| M8        | 2/06/2018  | 214                                          | 10,4                                  | -    |
| M9        | 2/06/2018  | 39,97                                        | 10,8                                  | -    |

**Tabla 24.** Parámetros Fisicoquímicos de Manantiales.

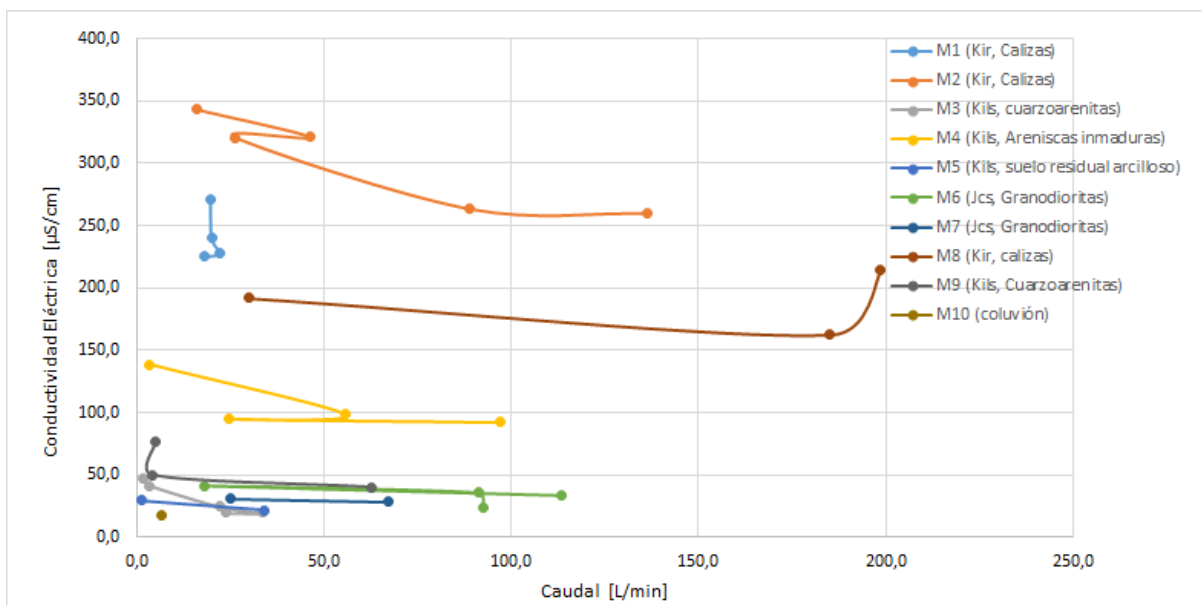


| Fecha                                     | may-17     | oct-17     |           | feb-18     |           | mar-18     |           | may-18     |           | jun-18     |           |
|-------------------------------------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Estación                                  | CE (μS/cm) | CE (μS/cm) | Q (L/min) | CE (μS/cm) | Q (L/min) | CE (μS/cm) | Q (L/min) | CE (μS/cm) | Q (L/min) | CE (μS/cm) | Q (L/min) |
| M1<br>(Kir, calizas)                      | 307        | 271        | 19,8      | 227,7      | 22,2      | 240,3      | 20,05     | -          | -         | 225,3      | 17,95     |
| M2<br>(Kir, calizas)                      | 240        | 260        | 136,2     | 320,6      | 26,4      | 343        | 16,15     | 263,7      | 89,02     | 321        | 46,2      |
| M3<br>(Kils, cuarzoarenitas)              | 22         | 24,8       | 22,2      | 41,6       | 3,30      | 46,7       | 1,82      | 19,68      | 33,64     | 19,63      | 24        |
| M4<br>(Kir, areniscas<br>inmaduras)       | 120        | 98,5       | 55,8      | 138,2      | 3,6       | -          | -         | 92,57      | 97,09     | 95,3       | 24,6      |
| M5<br>(Kils, suelo residual<br>arcilloso) | -          | 21,4       | 34,2      | 29,6       | 1,2       | -          | -         | -          | -         | -          | -         |
| M6<br>(Jcs, granodioritas)                | -          | 35,6       | 91,2      | 41,21      | 18        | -          | -         | 33,3       | 113,56    | 24,1       | 92,4      |
| M7<br>(Jcs, granodioritas)                | -          | 28,3       | 67,2      | 30,6       | 25,2      | -          | -         | -          | -         | -          | -         |
| M8<br>(Kir, calizas)                      | -          | -          | -         | 191,8      | 30        | -          | -         | 162,7      | 185,19    | 214        | 198,6     |
| M9<br>(Kils, cuarzoarenitas)              | -          | -          | -         | 49,8       | 4,2       | 76,9       | 5,15      | -          | -         | 39,97      | 62,85     |
| M10<br>(coluvion)                         | -          | -          | -         | 18,2       | 6,6       | -          | -         | -          | -         | -          | -         |

**Tabla 25.** Datos de Conductividad Eléctrica (CE) y Caudales (Q) de los manantiales.

Los manantiales que afloran en las rocas carbonatadas de la Formación Rosablanca muestran una mayor conductividad debido a la presencia de los carbonatos que mineralizan con mayor facilidad el agua, mientras que los manantiales que afloran en las cuarzoarenitas de la Formación Los Santos, las granodioritas de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y el coluvión, presentan una baja mineralización por su naturaleza silicatada, que no permite una fácil mineralización del agua. Esta baja mineralización también puede ser explicada por tiempos de residencia bajos y, en algunos casos, por la mezcla del agua subterránea con agua de escorrentía subsuperficial que disminuye la concentración de los solutos.

La **Figura 52** muestra los datos de conductividad eléctrica contra caudales, donde se observa que a menores valores de caudal se presentan mayores valores de conductividad eléctrica, por corresponder a flujo base. Este comportamiento es reflejado, principalmente, en el manantial M2 donde existe una variación de sus caudales en los meses medidos, contrario a lo observado en el manantial M1, que mantiene sus valores de caudal aproximadamente constantes. La grafica también permite diferenciar los altos valores de conductividad eléctrica de los manantiales que afloran en rocas calizas de la Formación Rosablanca (M1, M2 y M8), los valores medios del manantial que aflora en areniscas inmaduras de esta misma formación (M4) y los valores bajos y muy bajos de los manantiales presentes en los otros tipos de rocas (M3, M5, M6, M7, M9 y M10). Se observa un comportamiento diferente en el manantial M8, que aumenta su conductividad eléctrica con el valor más alto de caudal, posiblemente debido a que se moviliza una mayor cantidad de sólidos disueltos por el aumento de caudal, o se debe a un error a la hora de medir la conductividad eléctrica o el caudal.



**Figura 52.** Conductividad eléctrica versus caudal.

### Parámetros fisicoquímicos de aguas de corrientes superficiales

En las aguas de corrientes superficiales se midieron los parámetros fisicoquímicos en algunos muestreos, donde se observan valores de temperatura entre 11,3 y 17°C, con un promedio de 13°C y valores de pH de 7 a 8,1 de aguas diluidas neutras a ligeramente básicas (**Tabla 26**). La conductividad eléctrica en el nacimiento de la quebrada Picacho presenta una alta conductividad (200  $\mu\text{S/cm}$ ), debido a que se encuentra fuertemente relacionado a los manantiales presentes en las rocas calizas de la Formación Rosablanca (manantial M1). Por su parte en la quebrada La Moza, metros abajo de su nacimiento, se registra una baja conductividad eléctrica de 59  $\mu\text{S/cm}$ , observándose un aumento en la mineralización del agua en la parte media alta, con valores de 149 y 126  $\mu\text{S/cm}$ , posiblemente debido al aporte de agua de los flujos subterráneos presentes en el área. Está mineralización disminuye nuevamente, metros abajo del cierre de la microcuenca, con valores

entre 73 y 133  $\mu\text{S/cm}$ , por presentarse en este punto una mayor mezcla con agua de escorrentía superficial, recogida en toda el área.

| Código de Muestra                      | Fecha      | Parámetros Fisicoquímicos             |                                       |     |
|----------------------------------------|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----|
|                                        |            | Conductividad<br>( $\mu\text{S/cm}$ ) | Temperatura<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | pH  |
| Q. Picacho                             | 13/08/2018 | 200                                   | -                                     | -   |
| Q. La Moza metros abajo del Nacimiento | 11/08/2018 | 59                                    | -                                     | -   |
| Q. La Moza Parte Media Alta            | 14/02/2018 | 149                                   | 11,3                                  | 7,9 |
| Q. La Moza Parte Media Alta            | 11/08/2018 | 126                                   | -                                     | -   |
| Q. La Moza metros abajo del Cierre     | 5/01/2018  | 111                                   | 13                                    | 7,7 |
| Q. La Moza metros abajo del Cierre     | 4/02/2018  | 107                                   | 14,9                                  | 8,1 |
| Q. La Moza metros abajo del Cierre     | 5/04/2018  | 133                                   | 17                                    | 7,0 |
| Q. La Moza metros abajo del Cierre     | 5/05/2018  | 73                                    | 13,0                                  |     |
| Q. La Moza metros abajo del Cierre     | 6/07/2018  | 108                                   | -                                     | -   |
| Q. La Moza metros abajo del Cierre     | 7/08/2018  | 111                                   | -                                     | -   |
| Q. La Moza metros abajo del Cierre     | 11/08/2018 | 110                                   | -                                     | -   |

**Tabla 26.** Parámetros Fisicoquímicos de aguas de corrientes superficiales.

4.4.2. Análisis de iones mayoritarios. En la zona de estudio se realizó el análisis de iones mayoritarios de las aguas subterráneas, muestreadas en época lluviosa (octubre de 2017) y en época seca (febrero de 2018), así como en una muestra de agua de corriente superficial, tomada en la parte media de la microcuenca en época seca (febrero de 2018). Los resultados de los análisis se muestran en la **Tabla 27**, junto con el balance iónico de cada muestra, los cuales arrojaron valores menores al 4%, aceptándose la calidad de los datos. Los parámetros fisicoquímicos de estos muestreos, muestran aguas de manantial diluidas neutras a ligeramente básicas (pH de 7,25 a 8,49), con rangos de temperaturas de 8 a  $14^{\circ}\text{C}$  y un promedio de  $10^{\circ}\text{C}$ .

Se elaboraron diagramas Stiff (**Figura 53**), a partir de los resultados de los iones mayoritarios, donde se observa que la mayoría de las aguas presentan la misma facies hidroquímica, modificándose solo el perfil controlado por los valores de conductividad eléctrica, exceptuando el manantial M10, cuyo perfil es controlado por la baja concentración de iones y presencia

relativamente alta de cloruros. Se observa que la composición química del agua no presenta gran variación entre la época lluviosa y la época seca. Así mismo, en el diagrama de Schöller (**Figura 54**), se puede observar un comportamiento normal de la mayoría de los iones, excepto de los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) que presentan variabilidad, principalmente en la época seca. En general, se establece para la zona a partir del diagrama de Piper (**Figura 55**), aguas con facies predominantemente bicarbonatadas cálcicas, con poca evolución geoquímica y un corto tiempo de residencia de los flujos subterráneos, donde el valor de la conductividad eléctrica es controlado por los bicarbonatos (**Figura 56**). El manantial M10 presenta una facies clorurada cálcica en límite con la facies bicarbonatada cálcica (**Figura 55**).

| Muestra                                   | M1     |        | M2     |        | M3    |       | M4    |        | M5    |       | M6    |       | M7    |       | M8     | M9    | M10   | Q. La Moza Parte<br>Media Alta |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------------------------------|
| Época                                     | Lluv   | Seca   | Lluv   | Seca   | Lluv  | Seca  | Lluv  | Seca   | Lluv  | Seca  | Lluv  | Seca  | Lluv  | Seca  | Seca   | Seca  | Seca  | Seca                           |
| <i>pH</i>                                 | 8,49   | 7,64   | 8,13   | 7,25   | 8,45  | 7,9   | 7,89  | 7,77   | 7,64  | 8,2   | 7,97  | 7,6   | 8,04  | 7,9   | 8      | 7,5   | 7,5   | 7,92                           |
| <i>T (°C)</i>                             | 10,8   | 11,1   | 12,9   | 10     | 10,7  | 8,2   | 10,6  | 9,4    | 10,6  | 9,1   | 9     | 10,6  | 10,8  | 10,8  | 8,9    | 11,9  | 14,55 | 11,3                           |
| <i>CE (μS/cm)</i>                         | 271    | 277,7  | 260    | 320,6  | 24,8  | 41,6  | 98,5  | 138,2  | 21,4  | 29,6  | 35,6  | 41,21 | 28,3  | 30,6  | 191,8  | 49,8  | 18,2  | 148,8                          |
| <i>Q ( L/min )</i>                        | 19,8   | 22,2   | 136,2  | 26,4   | 22,2  | 3,30  | 55,8  | 3,6    | 34,2  | 1,2   | 91,2  | 18    | 67,2  | 25,2  | 30     | 4,2   | 6,6   | -                              |
| <i>Cl<sup>-</sup> (mg/L)</i>              | 6,08   | 4,9    | 5,87   | 6,82   | 6,46  | 4,22  | 7,15  | 3,51   | 7,28  | 4,92  | 5,65  | 3,52  | 6,33  | 4,2   | 4,22   | 4,19  | 6,95  | 8,13                           |
| <i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</i>  | 0,78   | 1,22   | 0,58   | 2,81   | 0,14  | 0,31  | 0,35  | 0,38   | 0,39  | 0,11  | 1,99  | 0,24  | 0,84  | 0,16  | 0,7    | 0,53  | 0,29  | 0,76                           |
| <i>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</i> | 195,38 | 187,65 | 183,46 | 235,77 | 38,12 | 48,11 | 116,8 | 129,91 | 40,48 | 31,27 | 59,57 | 38,49 | 30,97 | 26,46 | 135,93 | 45,71 | 14,44 | 125,1                          |
| <i>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (mg/L)</i> | 14,24  | 7,1    | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 2,36   | 0     | 0     | 4,73                           |
| <i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L)</i> | 23,07  | 21,88  | 32,41  | 78,32  | 2,74  | 2,69  | 3,17  | 2,73   | 4,15  | 4,57  | 1,26  | 1,13  | 2,05  | 0,82  | 30,85  | 2,65  | 2,27  | 12,95                          |
| <i>Na<sup>+</sup> (mg/L)</i>              | 3,49   | 4,49   | 1,63   | 1,5    | 1,83  | 2,48  | 2,69  | 3,21   | 2,56  | 2,13  | 3,61  | 3,67  | 1,93  | 1,39  | 3,28   | 1,52  | 2,26  | 3,73                           |
| <i>K<sup>+</sup> (mg/L)</i>               | 2,51   | 2,48   | 1,45   | 0,77   | 0,87  | 0,65  | 1,34  | 2,53   | 0,82  | 0,82  | 1,21  | 1,38  | 1,29  | 0,56  | 1,63   | 0,53  | 0,54  | 1,81                           |
| <i>Mg<sup>2+</sup> (mg/L)</i>             | 11,01  | 5,6    | 7,18   | 13,89  | 2,86  | 2,06  | 6,04  | 6,53   | 3,05  | 1,63  | 4,78  | 1,96  | 2,34  | 1,47  | 9,67   | 1,95  | 0,75  | 5,78                           |
| <i>Ca<sup>2+</sup> (mg/L)</i>             | 64,24  | 63,98  | 60,47  | 93,1   | 9,89  | 13,28 | 31,79 | 30,91  | 10,35 | 9,85  | 13,24 | 7,94  | 8,27  | 7,58  | 41,89  | 14,05 | 6,13  | 41,32                          |
| <i>Fe<sup>2+</sup> (mg/L)</i>             | 2,77   | 0,53   | 0,83   | 0,09   | 1,12  | 0,32  | 1,65  | 0,58   | 1,39  | 0,21  | 0,81  | 0,13  | 0,35  | 0,08  | 0,44   | 0,08  | 0,11  | 0,35                           |
| <i>Mn<sup>2+</sup> (mg/L)</i>             | 0,53   | -      | 0,37   | -      | 0,28  | -     | 0,16  | -      | 0,36  | -     | 0,22  | -     | 0,17  | -     | -      | -     | -     | -                              |
| <i>Balance Iónico (%)</i>                 | 1,2    | 0,05   | 1,3    | 1,2    | 0,8   | 0,04  | 2,5   | 0,3    | 0,06  | 0,1   | 3,1   | 0,05  | 0,1   | 0,4   | 0,1    | 0,7   | 0,1   | 1                              |

**Tabla 27.** Resultados de los Análisis Fisicoquímicos de las muestras de manantial y de agua superficial.

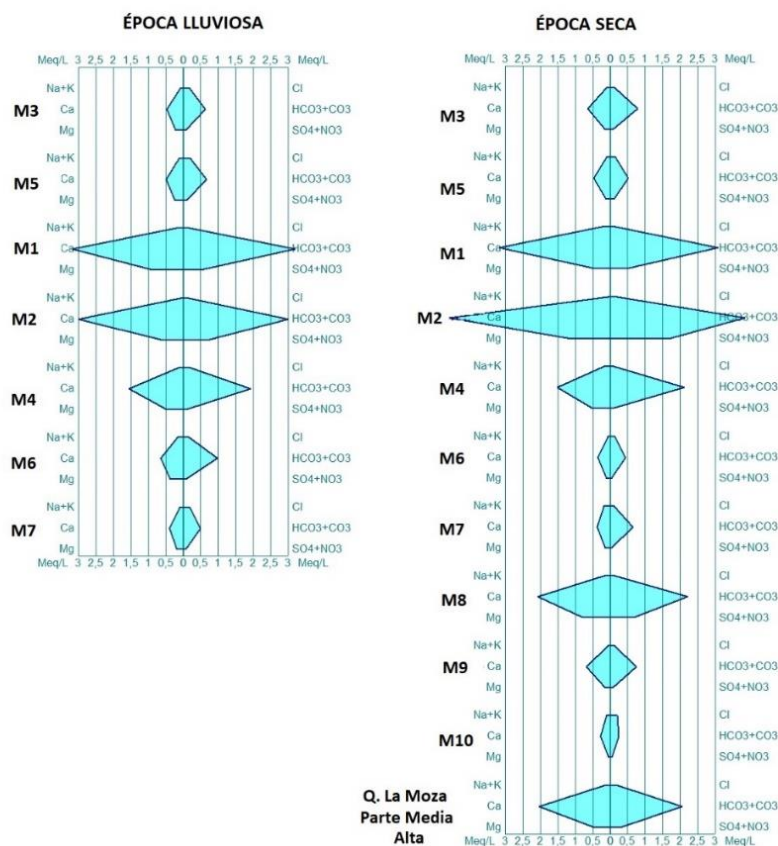


Figura 53. Diagrama Stiff de las aguas manantiales y agua superficial, tomadas en época lluviosa y seca.

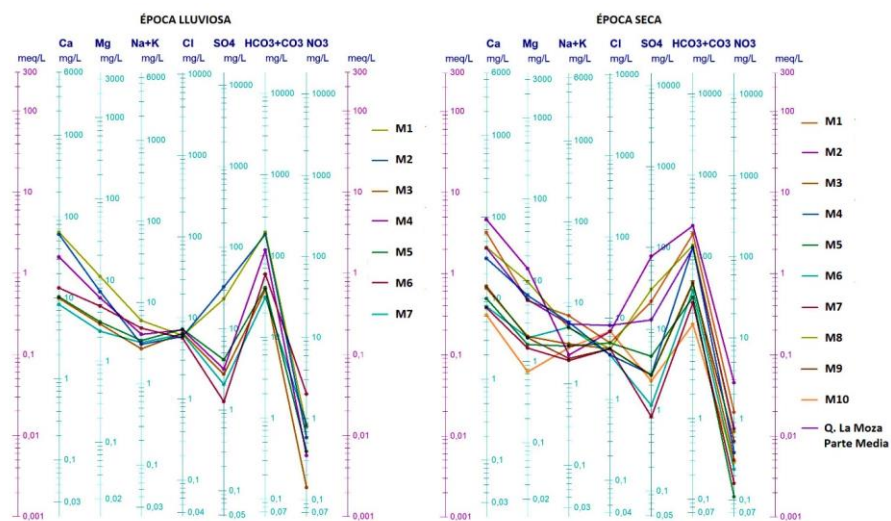
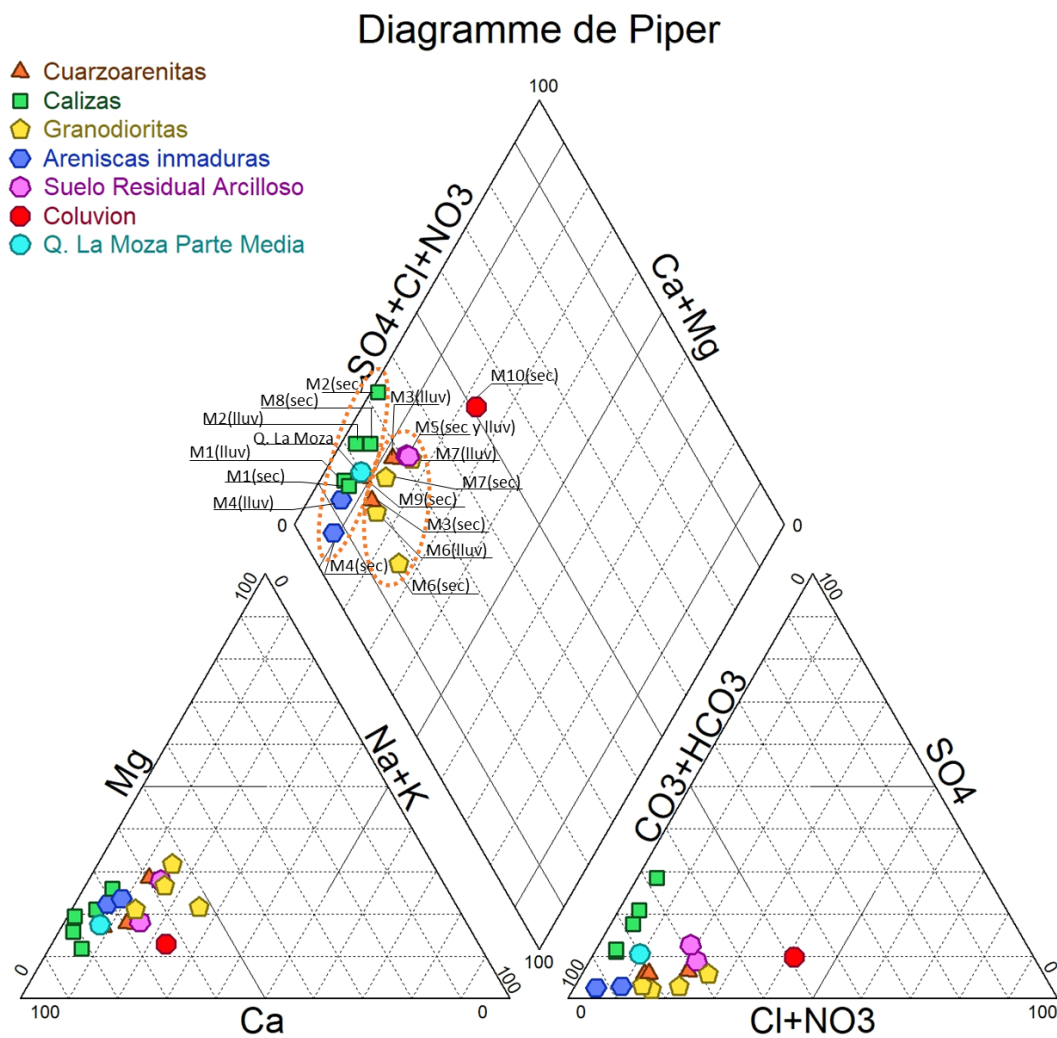
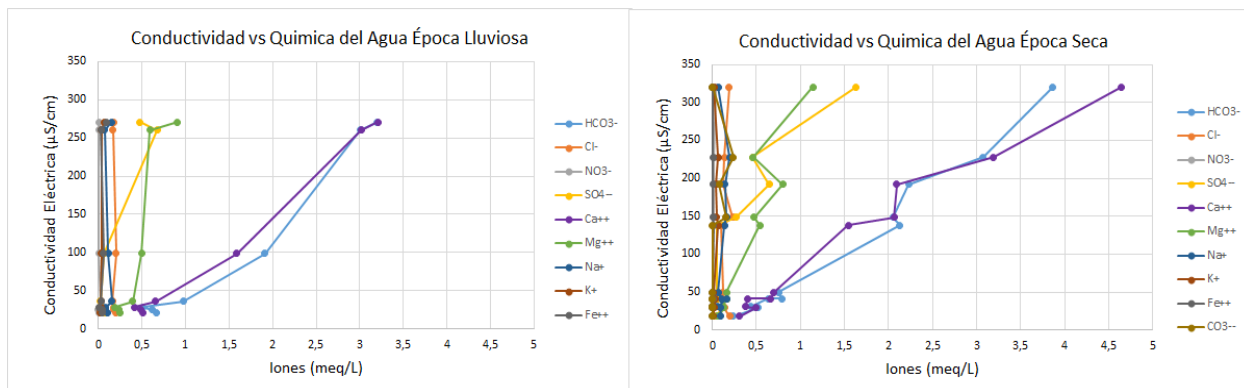


Figura 54. Diagramas Schöller de las muestras manantiales y agua superficial, tomadas en época lluviosa y seca.



**Figura 55.** Diagrama Piper general de las muestras de manantiales y agua superficial.



**Figura 56.** Concentración de los iones mayoritarios versus conductividad eléctrica.



Del diagrama de Piper (**Figura 55**) se puede observar que existen dos grupos de aguas dentro de la facies hidroquímica, diferenciados por sus valores de conductividad eléctrica que, a su vez, es controlada por el tipo de roca donde aflora el manantial. Se presenta una separación entre los manantiales con valores de conductividad eléctrica media a alta (98,05 a 320,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), que afloran en rocas calizas y areniscas inmaduras de la Formación Rosablanca (M1, M2, M4 y M8), y en el agua de la Quebrada La Moza, y los valores de conductividad eléctrica bajos (18,2 a 49,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de los manantiales que afloran en rocas cuarzoarenitas y suelo residual arcilloso de la Formación Los Santos y granodioritas de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (M3, M4, M5, M6, M7 y M9).

Cabe mencionar que la composición de iones mayoritarios en el agua del manantial M10, que aflora en un coluvión, presenta un valor alto en el anión cloruro (**Figura 55**), en comparación con la concentración de los otros iones de la muestra, el cual es compensado por la baja concentración de los bicarbonatos y la baja conductividad eléctrica del manantial, descartando la presencia de una fuente contaminante. La baja concentración de los iones en el Manantial M10 podría considerar su agua como agua lluvia de transito muy rápido o flujo subsuperficial, sin embargo, 30 días antes del muestreo del manantial M10 solo se presentó 27 mm de precipitación (según el reporte de lluvias diario de la Estación Picacho), cantidades muy bajas que simplemente se pueden incorporar a la capa vegetal y/o evapo-transpirarse sin producir un flujo de agua, que para el caso del manantial presento 6,6 L/min. Así mismo el carácter subterráneo del agua del manantial M10 es verificado a partir de su composición isotópica.

Comparando los resultados de la hidroquímica del presente trabajo con los obtenidos en los trabajos anteriores (INGEOMINAS, 2009; Rueda, 2003 y Gómez *et al.*, 2015), donde se

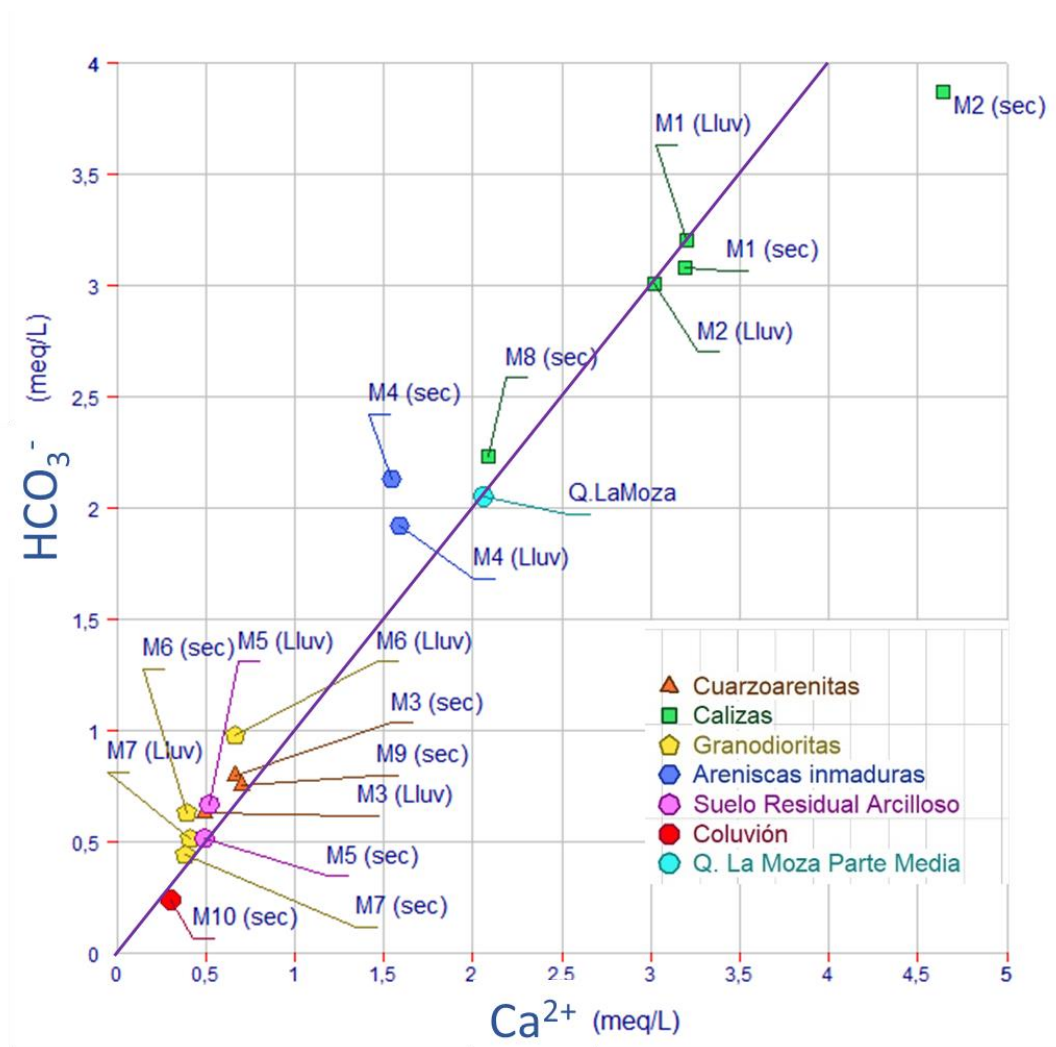
determinan facies mixtas con presencia de facies bicarbonatadas sódicas, se pueden plantear flujos que recorren mayores distancias, aguas abajo de la cuenca, donde su evolución y enriquecimiento en iones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  puede atribuirse a procesos de intercambio catiónico por el contacto del agua con rocas ígneas con presencia de minerales como la plagioclasa sódica tipo albita o anfíboles sódicos, entre otros.

4.4.3. Procesos geoquímicos identificados. La composición química resultante se puede atribuir mayoritariamente a la interacción del agua lluvia con los minerales y gases presentes en la zona no saturada del área de recarga. La relación entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  (**Figura 57**), muestra que la composición química de las aguas proviene de la interacción del agua con el  $\text{CO}_2$ , el cual es producto de la respiración de las plantas y la oxidación de la materia orgánica y cuya presencia facilita la meteorización (proceso de disolución e hidrólisis) de los minerales de carbonato y silicatos (Appelo y Postman, 2005). Además, los manantiales que afloran en rocas carbonatadas, los cuales presentan mayores concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , adquieren su composición debido a la disolución de los minerales de carbonatos.

En el diagrama Schöller (**Figura 54**), se observa un contenido mayor de sulfatos en las muestras de los manantiales que afloran en rocas carbonatadas (M1, M2 y M8), en época seca, y en la muestra de agua de corriente superficial. Debido a que no se observan niveles de yeso en las unidades no se puede atribuir este exceso a procesos de disolución de este mineral, por lo tanto se puede atribuir a una posible afectación por el uso de fertilizantes en la zona donde se desarrollan actividades agrícolas.

Los bajos valores de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  indican que no existe una disolución de halita o fuentes de salmueras cercanas. La presencia de hierro en las muestras indica que hubo procesos de reducción

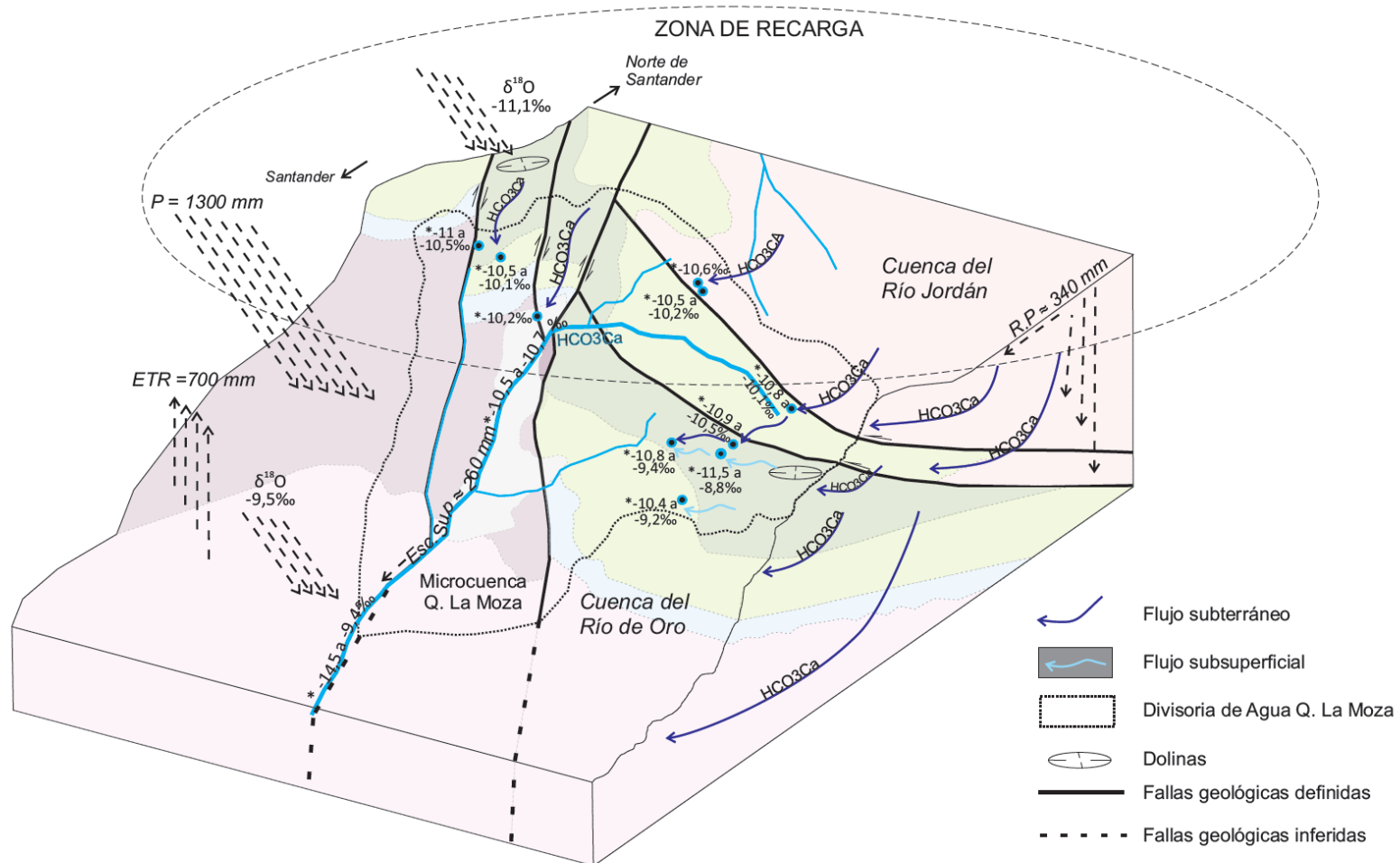
de óxidos de hierro en las aguas subterráneas (Appelo y Postman, 2005), donde se presenta mayor cantidad de iones en la época lluviosa que en la época seca, donde se puede pensar que el suelo poco profundo está saturado una grande parte durante la estación lluviosa y como consecuencia, una anoxia parcial del suelo favorece la reducción del hierro (**Tabla 27**).



**Figura 57.** Relación de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  de las muestras de manantial y agua superficial.

#### 4.5. Modelo Hidrodinámico Conceptual

De acuerdo con los resultados anteriores, se representa mediante un bloque diagrama esquemático la relación entre los flujos subterráneos presentes en el macizo rocoso, la cantidad de agua disponible en la zona, la variación en la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  del agua lluvia, agua subterránea y agua de corriente superficial, la composición química de los flujos subterráneos y la corriente superficial y la zona de recarga de los manantiales, obteniéndose así el modelo hidrodinámico conceptual de la zona de estudio (**Figura 58**).



**Figura 58.** Modelo hidrodinámico conceptual de la microcuenca quebrada La Moza. Donde, P= Precipitación, ETR= Evapotranspiración Real, R.P= Recarga Potencial, Esc. Sup= Escorrentía Superficial, \* =  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\text{HCO}_3\text{Ca}$  = Aguas Bicarbonatadas Cálcidas..

## 5. Conclusiones

El modelo hidrodinámico conceptual de la zona de estudio (cuenca de la Quebrada La Moza, donde se origina el Río de Oro) establece una circulación de flujos subterráneos por porosidad secundaria, a través de patrones de fracturamiento con fracturas abiertas en dirección preferencial de N77°E que afecta todas las rocas del área de estudio y es complementada con las rocas carbonatadas de la Formación Rosablanca que presenta carstificación y en las rocas granodioritas de la Curzomonzonita de Santa Bárbara que presentan porosidad por el fenómeno de meteorización. Estos flujos subterráneos son evidenciados por la presencia de manantiales que presentan caudal a lo largo del año, que en su mayoría aumentan o disminuyen de acuerdo con el régimen de precipitación.

Los manantiales identificados fueron agrupados en 3 subsistemas (SS1, SS2 y SS3), de acuerdo con su localización geográfica, geología y condiciones particulares en la ocurrencia y tipo de flujos. En el subsistema 1 afloran los manantiales M1, M9 y M10, en rocas calizas, cuarzoarenitas y depósito coluvial, respectivamente, donde la descarga del flujo subterráneo se produce principalmente por cambios fuertes en la pendiente. El manantial M1 representa el sistema cárstico presente al norte de la zona de estudio, cuya zona de recarga se relaciona con la presencia de dolinas al otro lado de la divisoria de agua. En el subsistema 2 afloran los manantiales M2 y M8 (en calizas), M4 (en arenisca inmaduras) y M3 y M5 (en cuarzoarenitas), donde la descarga del flujo subterráneo se relaciona mayoritariamente con cambios topográficos que en algunos casos coinciden con cambios a litologías finas que constituyen un sello para los flujos. El manantial M2 representa el sistema cárstico sur de la zona de estudio, el cual recibe aportes provenientes desde

la zona donde afloran los manantiales M3, M6 y M7, evidenciando una conexión con rocas siliciclásticas y cristalinas. Los manantiales M4, M5 y M8 presentan mezclas con flujos subsuperficiales, permitiendo plantear que son aguas más recientes que en las otras áreas. En el subsistema 3 afloran los manantiales M6 y M7 en granodioritas, donde los flujos subterráneos encuentran una barrera en la Falla inversa Santana produciéndose su descarga. Esta falla geológica en profundidad permite el paso de flujos subterráneos que alimentan los manantiales del subsistema 2, presentándose una conexión entre estos dos subsistemas.

Para los flujos subterráneos se propone una zona de recarga local que sobrepasa la divisoria de aguas abarcando en superficie parte de la cuenca del Río Jordán, que alimenta una red de drenaje que fluye hacia Norte de Santander. Lo anterior es soportado por los datos isotópicos, la cercanía de los manantiales a la divisoria de agua y la topografía abrupta de la cuenca que favorece más la esorrentía superficial, dejando una mayor posibilidad de recarga en las cuencas adyacentes, que presentan topografías más suaves. Se plantea que en la zona de estudio los flujos subterráneos configuran pequeños acuíferos libres colgados, principalmente en los sistemas cársticos, los cuales deben ser corroborados por medio de otras herramientas como la geofísica, que permita el reconocimiento del almacenamiento, su geometría y continuidad.

Los flujos subterráneos propuestos son alimentados por una recarga potencial anual estimada de 340 mm, con un total de oferta hídrica de 600 mm. El flujo base de la Quebrada la Moza es aportado por los sistemas subterráneos, tanto de los sistemas cársticos como los presentes en las rocas cuarzoarenitas y granodioritas, donde en la parte alta de la microcuenca se estimó un valor de 70% del flujo total por medio de algoritmos numéricos.

El monitoreo en un evento de crecida sobre la conductividad eléctrica y el contenido isotópico, en el nacimiento de la quebrada Picacho relacionado directamente a la descarga del sistema cárstico del norte presente en el subsistema 1, permite concluir que durante la lluvia se infiltra agua al cárst que se mezcla con el agua subterránea. Esta mezcla presenta una transferencia rápida facilitada por la existencia de conductos en las rocas carbonatadas que, una vez terminado el evento, se evacua la escorrentía y solo queda presente el flujo procedente de agua subterránea.

La composición isotópica del agua lluvia muestra una variación del  $\delta^{18}\text{O}$  de -11,16 a -9,8‰ (vs VSMOW), con un empobrecimiento de -0,12‰ cada 100 msnm. La composición isotópica de los manantiales determina un origen meteórico y un carácter subterráneo que muestra poca variabilidad temporal y espacial, con valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de -11,5 a -10,1‰ (vs VSMOW), con un tránsito a escala interanual, exceptuando algunos manantiales del subsistema 2 que presentan mezclas con escorrentía subsuperficial (tránsito a escala mensual), evidenciando flujos más recientes en esta parte del área. Por su parte, las composiciones isotópicas de las aguas de corrientes superficiales presentan poca variación espacial de  $\delta^{18}\text{O}$  con valores entre -10,6 y -10,1‰ (vs VSMOW), y una variación temporal de  $\delta^{18}\text{O}$ , metros abajo del cierre de la microcuenca, de -10,71 a -9,47‰ (vs VSMOW), con un notable empobrecimiento en la época seca (febrero 2018) de -14,56‰ (vs VSMOW), que para este caso se atribuye a una influencia directa de agua lluvia. Estos valores permiten plantear que una buena parte del flujo de las corrientes superficiales es alimentado por los flujos subterráneos.

Se concluye que el agua de los flujos subterráneos presenta mayoritariamente una facies hidroquímica bicarbonatada-cálcica, con poca evolución geoquímica y un corto tiempo de residencia de los flujos subterráneos, donde el valor de la conductividad eléctrica es controlado



por el contenido de bicarbonatos, que a su vez es controlado por el tipo de roca donde afloran los manantiales, presentándose en las rocas carbonatadas de la Formación Rosablanca los mayores valores de conductividad respecto a las cuarzoarenitas de la Formación Los Santos y Granodioritas de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. Por otro lado, se determina que el carácter químico de las aguas es predominantemente producto de la interacción del agua lluvia con los minerales y gases ( $\text{CO}_2$ ), presentes en la zona no saturada del área de recarga (manantiales que afloran en la Formación Los Santos y Cuarzomonzonita de Santa Bárbara) y de la disolución de los minerales carbonatados (manantiales que afloran en la Formación Rosablanca).

### Referencias Bibliográficas

- Aemisegger, F., Pfahl, S., Sodemann, H., Lehner, I., Seneviratne, S. I., y Wernli, H. (2014). Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 14(8), 4029 – 4054.
- Alcaldía de Piedecuesta (2017). Disponible en: <http://40.70.216.159:3080/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>. [Recuperado el 31 de octubre de 2017].
- Anderson, E. (1951). The dynamics of faulting and dike formation with applications to Britain. Editorial: Oliver and Boyd, Edinburgo, Escocia.
- Appelo, C. y Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2<sup>ND</sup> Edition. Amsterdam, the Netherlands : A.A. Balkema Publishers.
- Arenas, J.P. y Ruiz, J.D (2005). Estudio de la variación del régimen de lluvias en la cuenca superior del río Lebrija. Tesis de Ingeniería Civil. UIS.
- Arias, C. F., Gallego, A. M. y Sana, C. E. (2015). Separación Del Flujo Base Utilizando Isotopos Estables Del Agua En La Cuenca Alta Del Río De Oro, En La Estación El Conquistador Alto (Trabajo de Investigación de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Arlegui, L. y Simón, J. (1993). El sistema de diaclasas N-S en el sector central de la cuenca del Ebro. Relación con el campo de esfuerzos Neógeno. *Revista de la Sociedad Geológica de España*. 1(2): 115-122.

- Bejarano, D. y Navas, A. (2018). Análisis estructural de los patrones de fracturamiento y su relación con el flujo de aguas subterráneas en inmediaciones del municipio de Tona, Macizo de Santander. Tesis de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander
- Camacho, H. y Guzmán, D. (2005). Implementación de una red de muestreadores de isotopos estables en la precipitación para obtener la recta meteórica local. Trabajo de grado Universidad Industrial de Santander.
- Castillo, E. Y. y Hernandez, D. R. (2013). Integración De Nueva Información En Un SIG De Puntos De Aguas Subterránea Y Datos De Calidad, En La Zona Alta De Las Cuencas Rio De Oro, Rio Tona Y Frio (Trabajo de Investigación de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- CDMB (2009). Delimitación y Declaratoria de un Área Natural Protegida en la parte alta de las subcuencas de los Ríos de Oro y Manco, Municipios de Piedecuesta y Tona, Departamento de Santander, Colombia.
- Cediel, F., Shaw, R. y Cáceres, C. (2003). Tectónica Assembly of the Northern Andean Block. The Circum-Gulf of México and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics. AAPG Memoir, 79, 815-848.
- Clark, I. D. y Fritz, P. (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. Submitted. New York, Boca Ratón: Lewis Publishers.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill.

- Colegial-Gutiérrez, J. D., Forero-Quintero, M. C., Fuentes-Rueda, M. A., y Gómez-Isidro, S. (2017). Characterization of weathering profiles of the crystal rocks of eastern Bucaramanga and definition of hydrogeological properties. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 41, 15-29.
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133, 1702-1703
- Dreiss, S. J. (1989). Regional Scale Transport in a Karst Aquifer 1. Component Separation of Spring Flow Hydrographs. *Water Resources Research*, Vol. 25 (1), 117-125.
- Froehlich, K., Kralik, M., Papesch, W., Rank, D., Scheifinger, H., & Stichler, W. (2008). Deuterium excess in precipitation of Alpine regions—moisture recycling. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 44(1), 61-70.
- Gat, J. R. y Matsui, E. (1991). Atmospheric water balance in the Amazon basin: an isotopic evapotranspiration model, *JGR*, 96(D7), 13179 - 13188.
- Gómez, D. y Gómez, L. (2012). Separación de Flujo Base en la Cuenca del Río de Oro en la Estación Conquistador Alto Mediante la Programación de Algoritmos de No Linealidad (Trabajo de Investigación de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Gómez, S. (2014). Aguas Subterráneas en Zonas de Montaña y Trazadores Ambientales. Bucaramanga, Colombia: Ediciones Universidad Industrial de Santander.
- Gomez, S., Taupin, J. D., Rueda, J. A (2015). Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga (Colombia). *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA*, 4, 44-61.

- Gómez, S. y Gómez, V. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia). *Dyna*, 83(196), 213-222.
- Guerrero, J. (2002). A proposal on the Classification of System Tracs: Application of Allostratigraphy and Sequence Stratigraphy of the Cretaceous Colombian Basin. Part 1: Berrasian to Hauterivian. *Geología Colombiana*. Vol. 20, 325 p.
- Holdridge, L. R. (1967). Life Zone Ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. (Traducción del inglés por Humberto Jiménez Saa: «Ecología Basada en Zonas de Vida», 1a. ed. San José, Costa Rica:IICA, 1982.
- INGEOMINAS- Instituto Colombiano de Geología y Minas (2006). Mapa Geológico del Macizo de Santander Cuenca Superior del Rio Lebrija, escala 1:75.000. Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS- Instituto Colombiano de Geología y Minas y UIS-Universidad Industrial de Santander (2007). Memoria Explicativa de la Investigación Geológica e Hidrogeológica en el Macizo de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- INGEOMINAS- Instituto Colombiano de Geología y Minas (2009). Informe Hidrogeológico del Macizo de Santander. Bogotá, Colombia.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Aspectos Ambientales (2005). Atlas Climático de Colombia.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (2007). Atlas de Páramos de Colombia.

- Jiménez, J. y Custodio, E. (2008). El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área circum-mediterránea y en la costa mediterránea española. *Boletín geológico y minero*, 119(1), 21-32.
- Machuca, D, M. (2012). Separación de Flujo Base en la Cuenca Alta del Río de Oro Utilizando Algoritmos Numéricos (Trabajo de Investigación de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Mantilla, L.C., García, C. A. y Valencia, V. A. (2016). Propuesta De Escisión De La Denominada ‘Formación Silgará’ (Macizo De Santander, Colombia), A Partir De Edades U-Pb En Circones Detríticos. *Boletín de Geología*, 38 (1), 33-50.
- NTC-ISO 5667-3 (2003). Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC-ISO 5667-11 (2003). Calidad del agua. Muestreo. Parte 11: Guía para el muestreo de aguas subterráneas. Bogotá, Colombia. ICONTEC.
- Poveda, G., Alvarez, D. M., & Rueda, O. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth’s most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2233-2249.
- Rosello, E. (2001). Sistemas tectónicos transcurrentes: una síntesis de sus condiciones mecánicas y aplicaciones geoeconómicas. *Asociación Geológica Argentina*, 5, 10-43.
- Royero, J., y Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado de Santander, Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS.

- Rueda, J. A. (2013). Modelo Hidrogeológico Conceptual y Revisión de la Vulnerabilidad, Amenaza y Peligro a la Contaminación del Agua Subterránea en la CSRL. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.
- Saighi, O. (2005). Isotopic composition of precipitation from Algiers and Assekrem. Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate, IAEA-TECDOC-1453, Isotope Hydrology Section. Vienna, Austria, 5-17.
- Salati, E., Dall'Olio, A., Matsui, E. y Gat J.R. (1979). Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study, Water Res. Res, 15(5), 1250-1258.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 63(11), 1117-1142.
- Velandia, F. (2010). Análisis de fracturas para exploración de aguas subterráneas en el centro de Santander. Capitulo de libro “ Hidrogeología para la gestión del recurso hídrico”. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. 159-168.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B. y Restrepo A. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, Publicaciones Especiales.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., Jaramillo, L., & Vargas, R. (1977). Geología del Cuadrángulo Pamplona H-13, escala 1:100.000. Instituto Colombiano de Geología Y Minas, Bogotá (Colombia).