

**MONITOREO DE MANANTIALES PARA ESTUDIOS
HIDROGEOLÓGICOS EN ZONAS DE MONTAÑA. APLICACIÓN
EN LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL PERRO,
MANIZALES COLOMBIA.**

LUISA FERNANDA TRIVIÑO SERRATO

LAURA MARCELA CHINCHILLA MARTÍNEZ

TRABAJO DE GRADO

2021



Monitoreo de manantiales para estudios hidrogeológicos en zonas de montaña. Aplicación en la microcuenca de la Quebrada El Perro, Manizales-Colombia.

Luisa Fernanda Triviño Serrato

Laura Marcela Chinchilla Martínez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Geólogo

Director

Ph. D. Miriam Ríos Sánchez

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Programa de Geología

Manizales, 2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Aprobada _____



Ph. D., Miriam Ríos Sánchez

Director Trabajo de Grado

Manizales, abril 19 de 2021.

Dedicatoria

A mi padre Juan Carlos Triviño Gómez

Quien siempre ha sido la fuerza motora en cada paso que decido emprender, por y para quien son todos mis logros. Siempre vivirás en mí y en todo lo que el universo y mis capacidades me permitan alcanzar, tú me diste vida, yo te la devuelvo a través de mi camino. ¡Te amo y te extraño mucho papito! Sé que la culminación de este sueño te hubiese hecho el hombre más feliz del mundo.

Luisa Fernanda Triviño Serrato.

A mi madre Liliana Martínez

Una mujer fuerte y con carácter que me enseñó que en la vida con esfuerzo y dedicación todo se puede lograr. Por ser mi gran ejemplo a seguir. Por siempre creer en mí y enseñarme los valores que me forjan hoy en día como persona. Por acompañarme en este proceso, siempre alentándome con sus consejos en los momentos que ya no quería continuar. Gracias mamá, por tu apoyo y amor incondicional.

A mis abuelas Tulia Martínez y Flor Martínez

Por ser un gran apoyo en mi vida y estar siempre presentes, por sus consejos y por el cariño que siempre me han brindado.

A mi novio Alejandro Ruiz Díaz

Por enseñarme siempre a creer en mis capacidades e impulsarme a lograr mis sueños, por siempre recordarme quién soy y qué quiero en la vida, por apoyarme en todo

momento pese a las adversidades. A ti gracias por el amor incondicional que me has brindado.

A mi hijo Lorenzo

Por enseñarme que el verdadero amor existe, por ser mi gran motivación para culminar este proceso e impulsarme a seguir con el sueño de seguir escalando en esta hermosa profesión. A ti gracias por lo que me has enseñado los últimos meses, espero algún día leas esto y te sientas orgulloso de mí.

Laura Marcela Chinchilla Martínez.

Agradecimientos

Al universo, a mis abuelos y a mis padres por darme la vida.

A Alexandra Triviño y Robert Triviño por construir las alas que me permitieron emprender este viaje, sin ellos no hubiese sido posible volar.

A cada uno de los profesores que durante mi carrera me enseñaron más que geología, agradezco por lo que me enseñaron a ser, a hacer, a no ser y no hacer, agradezco en especial a los profesores Elvira Ruiz, José Luis Naranjo y Miguel Ángel Cuadros por sus enseñanzas tanto académicas como de vida.

A David Narváez por los lentes con los que me enseñó a ver la geología y la ciencia en general, por sus consejos y reflexiones, por afianzar en mí la acción de cuestionar la forma en que me enseñaron a ver el mundo y nunca quedarme con lo que me dicen sin antes yo misma comprobarlo.

A mi segunda familia Raigosa-Riobó por salvarme la vida cuando todo fue oscuridad, por acogerme como una hija, una hermana y una amiga. La gratitud y amor por ustedes es eterna. ¡Los amo!

A mis dos mejores amigos Santiago Raigosa y Valentina Gómez por sostenerme y/o levantarme ante cualquier dificultad, les agradezco por nunca irse, sin ustedes este camino se hubiese quedado a medias.

A Kosuke Hashi por el amor puro y apoyo incondicional, gracias por creer en mí cuando yo misma dejaba de hacerlo, por recordarme que soy una guerrera y que con esfuerzo y constancia siempre puedo lograrlo. ¡Sin ti la culminación de este sueño no hubiese sido posible!

A mi directora de tesis Miriam Ríos Sánchez por su esfuerzo y paciencia, gracias por motivarnos y retarnos a ser mejores. Por compartir su conocimiento y hacer que me enamorara aún más de la Hidrogeología, le agradezco por su amistad y confianza. ¡Gracias porque a través de las anécdotas sobre tus experiencias de vida me hiciste sentir que no estoy sola!

A mi compañera de tesis Laura Chinchilla por nunca soltar mi mano durante los 3 duros meses de monitoreo, por ser una guerrera y vencer juntas tantos miedos en la montaña, por nunca rendirse en los momentos difíciles, le agradezco por su paciencia y por ayudar a que siempre este fuera el mejor equipo. ¡Gracias por permitirme aprender y crecer a tu lado!

A cada uno de los compañeros de formación durante estos años de carrera, de quienes aprendí y espero también haber dejado alguna enseñanza, gracias a quienes compartieron conmigo esta linda experiencia. En especial, gracias a Jorge restrepo y Gabriel Granja por sus amistades, el acompañamiento en las campañas de campo y el aporte desde sus conocimientos Geo-Estructurales.

A quienes con amabilidad y disposición ayudaron desde su conocimiento en las diferentes áreas de este proyecto. A los profesores de la Universidad de Caldas: Luz Mary Toro, Santiago Cano, Gustavo Hincapié, Carlos Guzmán y Hugo Murcia. Y a la Hidrogeóloga Esther Villamizar y a su empresa Estudios Hidrogeológicos S.A.S por la contribución del equipo que permitió la elaboración de este trabajo.

Luisa Fernanda Triviño Serrato.

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional y acompañamiento en cada etapa de mi vida.

Por nunca dejarme desfallecer en este sueño que es de todos.

A Miriam Ríos Sánchez, por aceptar en primer lugar ser nuestra directora de tesis, por su empeño y dedicación en este proyecto, por guiarnos y fomentar nuestro pensamiento analítico y crítico. Por enseñarnos y enriquecernos de conocimientos en este campo de la geología que tanto nos apasiona.

A mi compañera de tesis Fernanda Triviño, gracias por acompañarme y guiarme en este proyecto, por enseñarme que con disciplina y compromiso podemos lograr lo que queremos, por permitirme formar un gran equipo de trabajo y apoyarnos en todo momento. A ti gracias por la amistad que forjamos durante este proceso.

A la Universidad de Caldas y a los profesores Cristian David Narváez, Luz Mary Toro, Santiago Cano, José Luis Naranjo, Gustavo Hincapié, Carlos Guzmán y Hugo Murcia, por compartirnos sus conocimientos y experiencias, por ayudarnos en este proceso siempre con amabilidad y disposición.

A nuestros compañeros Jorge Restrepo y Gabriel Granja por aportarnos sus conocimientos y su disposición para ayudarnos en la labor de campo desempeñada en este proyecto.

A mis amigos Carol Montelagre, Manuela Mejía, Catalina Franco, Daniel Arango, Nicolás Giraldo, Alejandro Niño y Derian Sánchez, por apoyarme y estar presentes en los mejores momentos en mi paso por la universidad y por enseñarme el valor que tiene la amistad.

A la Hidrogeóloga Esther Villamizar y a su empresa Estudios Hidrogeológicos S.A.S
por aportarnos herramientas esenciales para la elaboración de este proyecto.

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a la realización de este
proyecto, a mi vida personal y profesional.

Laura Marcela Chinchilla Martínez.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	8
2.1 Objetivo General.....	8
2.2 Objetivos Específicos	8
3. Localización y Características Generales del Área de Estudio	10
4. Metodología.....	12
4.1 Recolección y Análisis de Información Básica	16
4.2 Hidrología Superficial	16
4.2.1 Análisis del Hidrograma de la Quebrada El Perro.....	16
4.2.2 Creación de Hietogramas	19
4.3 Geología Local.....	19
4.4 Evaluación Hidrogeológica	22
4.4.1 Importancia Hidrogeológica de los Manantiales.....	22
4.4.2 Inventario de Puntos de Agua	23
4.4.3 Evaluación del Potencial Hidrogeológico de las Unidades Geológicas....	26
4.5 Monitoreo de Manantiales y Características Hidráulicas de las Unidades Acuíferas	27
4.5.1 Importancia Hidrogeológica de los Parámetros Hidroquímicos Medidos en el Monitoreo	28
4.5.1.1 <i>Temperatura</i>	28
4.5.1.2 <i>Total de Sólidos Disueltos (TDS) y Conductividad Eléctrica (CE)</i>	30
4.5.1.2.1 <i>Comportamiento de la CE Durante el Flujo de Agua Subterránea</i>	30
4.5.1.2.2 <i>Precipitación y Mineralización del Agua Subterránea</i>	31
4.5.2 Hidrogramas de Manantiales.....	32
4.5.3 Relación de los Hidrogramas con la Precipitación.....	35
4.5.4 Caracterización de Hidrogramas Individuales y su Respuesta a la Precipitación	35
4.6 Análisis Multitemporal de Temperatura y Conductividad Eléctrica (CE) y su Relación con el Hidrograma	36
4.7 Análisis de Curvas de Recesión y Determinación de Propiedades Hidráulicas	36
4.8 Síntesis de la Información	41
4.8.1 Síntesis de Productividad y Propiedades Hidráulicas	42
4.8.2 Síntesis de Propiedades Hidroquímicas Básicas.....	42

5. Revisión de Literatura para la Zona de Estudio	44
5.1 Información Regional	44
5.2 Información Local.....	44
5.2.1 Estudios Hidrográficos e Hidrogeológicos de la Microcuenca de la Quebrada El Perro	44
5.2.2 Estudios Geológicos y Estructurales del Área de Estudio y la Falla El Perro	45
6. Geología	48
6.1 Marco Geológico Regional	48
6.1.1 Complejo Quebradagrande (Ksc).....	49
6.1.1.1 Miembro Volcánico.	49
6.1.1.2 Miembro Sedimentario.	50
6.1.2 Formación Manizales (Tsmz).....	51
6.1.3 Formación Casabianca (Tscb).....	52
6.1.4 Depósitos de Caída Piroclástica (Qcp)	53
6.2 Tectónica Regional.....	54
6.3 Geología Local.....	56
6.3.1 Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande (Ksc).....	56
6.3.2 Formación Manizales (Tsmz).....	59
6.3.3 Depósitos de Caída Piroclástica (Qcp)	61
6.3.3.1 Depósitos de Caída Piroclástica – Parte Superior (Qcp-s).	61
6.3.3.2 Depósitos de Caída Piroclástica – Parte Inferior (Qcp-i).	62
6.3.4 Depósitos Aluviales (Qal).....	63
6.4 Geología Estructural.....	65
6.4.1 Falla El Perro.....	66
6.4.2 Falla 2	67
6.4.3 Lineamientos.....	69
7. Hidrología Superficial	70
7.1 Hidrología y Climatología	70
7.1.1 Temperatura	70
7.1.2 Precipitación	71
7.1.3 Evapotranspiración.....	72
7.1.4 Escorrentía Superficial	72
7.2 Características del Hidrograma General y Separación de Flujos.....	74
8. Potencial Hidrogeológico	79
8.1 Unidades Acuíferas	79

8.1.1 Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande (Ksc).....	79
<i>8.1.1.1 Descarga de Agua Subterránea.</i>	<i>82</i>
<i>8.1.1.2 Parámetros Hidroquímicos del Agua Subterránea.</i>	<i>83</i>
8.1.2. Formación Manizales (Tsmz).....	84
<i>8.1.2.1 Descarga de Agua Subterránea.</i>	<i>86</i>
<i>8.1.2.2 Parámetros Hidroquímicos del Agua Subterránea.</i>	<i>88</i>
8.1.3. Parte Superior de los Depósitos de Caída Piroclástica (Qcp-s)	88
<i>8.1.3.1 Descarga de Agua Subterránea.</i>	<i>89</i>
<i>8.1.3.2 Parámetros Hidroquímicos del Agua Subterránea.</i>	<i>92</i>
8.1.4. Depósitos Vulcanosedimentarios (Qvs)	93
<i>8.1.4.3 Descarga de Agua Subterránea.</i>	<i>93</i>
<i>8.1.4.2 Parámetros Hidroquímicos del Agua Subterránea.</i>	<i>95</i>
8.1.5 Depósitos Aluviales (Qal).....	96
8.2 Acuitardo	96
8.2.1 Parte Inferior de los Depósitos de Caída Piroclástica (Qdc-i)	96
8.3 Sistemas de Flujos	97
9. Monitoreo de Manantiales, Relaciones con el Agua Superficial y Propiedades Hidráulicas de los Acuíferos	101
9.1 Acuífero Formación Manizales (AFM).....	104
9.1.1 Descripción General del Hidrograma y Respuesta a la Precipitación ..	104
9.1.2 Análisis Multitemporal de la Conductividad Eléctrica (CE) y la Temperatura (T).....	107
9.1.3 Análisis de la Curva de Recesión y Propiedades Hidráulicas	109
9.1.4 Cálculo del Volumen Almacenado en el Acuífero al Comienzo de la Recesión.....	112
9.2 Acuífero Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande (AQG)..	113
9.2.1 Descripción General del Hidrograma y Respuesta a la Precipitación ..	113
9.2.2 Análisis Multitemporal de la Conductividad Eléctrica (CE) y Temperatura (T).....	118
9.2.3 Comparación de Resultados de Caudal y Propiedades Hidroquímicas entre los Manantiales	123
9.2.4 Análisis de la Curva de Recesión y Propiedades Hidráulicas	123
9.2.4.1 Resumen de los Valores de C Obtenidos para el Acuífero Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande.	128
9.2.5 Cálculo del Volumen Almacenado en el Acuífero al Comienzo de la Recesión.....	129
9.3 Acuífero Depósitos de Caída Piroclástica, Parte Superior	130

9.3.1 Descripción General del Hidrograma y Respuesta a la Precipitación ..	131
<i>9.3.1.1 Resumen de la Respuesta del Acuífero Depósitos de Caída Piroclástica (parte superior) a los Eventos de Precipitación.....</i>	<i>141</i>
9.3.2 Análisis Multitemporal de la Conductividad Eléctrica (CE) y Temperatura (T).....	143
9.3.3 Análisis de la Curva de Recesión y Propiedades Hidráulicas	150
<i>9.3.3.1 Resumen de los Valores de C Obtenidos para el Acuífero Depósitos de Caída Piroclástica (parte superior).</i>	<i>159</i>
9.3.4 Cálculo del Volumen Almacenado en el Acuífero al Comienzo de la Recesión.....	160
<i>9.3.4.1 Resumen de los Volúmenes Almacenados al Inicio de la Curva de Recesión Obtenidos para el Acuífero Depósitos de Caída Piroclástica (parte superior).</i>	<i>163</i>
10. Síntesis de Resultados.....	165
10.1.1 Caudales	165
10.1.2 Hidrogramas	166
10.1.3 Capacidad de Regulación (C).....	169
10.1.4 Duración de Curvas de Recesión	170
10.1.5 Volúmenes Almacenados al Inicio de la Curva de Recesión	171
10.1.6 Productividad Relativa de las Unidades Acuíferas de la Zona	172
10.2 Parámetros Hidroquímicos	173
10.2.1 Respuesta Multitemporal de Parámetros hidroquímicos.....	174
<i>10.2.1.1 Temperatura.....</i>	<i>174</i>
<i>10.2.1.2 Conductividad Eléctrica (CE).</i>	<i>177</i>
11. Conclusiones.....	179
12. Limitaciones y Recomendaciones.....	186
13. Referencias	188

Lista de Figuras

Figura 3.1 <i>Mapa localización de la microcuenca de la Quebrada El Perro</i>	11
Figura 4.1 <i>Metodología desarrollada para las fases información básica e Hidrología superficial</i>	13
Figura 4.2 <i>Metodología desarrollada para las fases Geología local y Evaluación hidrogeológica</i>	14
Figura 4.3 <i>Metodología desarrollada para la fase Monitoreo</i>	15
Figura 4.4 <i>Componentes del hietograma e hidrograma</i>	17
Figura 4.5 <i>Separación de los componentes del flujo en un hidrograma</i>	19
Figura 4.6 <i>Componentes del hidrograma de un manantial e Hietograma</i>	33
Figura 4.7 <i>Posibles reacciones del acuífero a la entrada de agua según lo observado en el hidrograma de un manantial</i>	34
Figura 4.8 <i>Coeficiente de almacenamiento en acuífero libre y confinado</i>	41
Figura 6.1 <i>Lodolitas negras del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande</i>	57
Figura 6.2 <i>Lodolitas grises del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande</i>	58
Figura 6.3 <i>Parte inferior de la Formación Manizales</i>	60
Figura 6.4 <i>Parte superior de la Formación Manizales</i>	61
Figura 6.5 <i>Parte superior de los Depósitos de caída piroclástica</i>	62
Figura 6.6 <i>Depósitos de caída piroclástica</i>	63
Figura 6.7 <i>Depósito aluvial de gravas y arenas</i>	64
Figura 6.8 <i>Depósito vulcanosedimentario</i>	65
Figura 6.9 <i>Expresiones geomorfológicas del área de estudio</i>	67
Figura 6.10 <i>Estratos verticalizados de lodolitas</i>	68
Figura 6.11 <i>Deformación en las lodolitas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande</i>	68
Figura 6.12 <i>Ubicación Lineamientos y trazas de la Falla El Perro y la Falla 2 (a) y Diagrama rosa de lineamientos en la microcuenca de la Quebrada El Perro (b)</i>	69
Figura 7.1 <i>Precipitación promedio mensual de la estación Aeropuerto La Nubia (1981-2010)</i>	72
Figura 7.2 <i>Hidrogramas de caudal promedio mensual (1981-2010) del Río Chinchiná (a) y la Quebrada El Perro (b)</i>	73
Figura 7.3 <i>Características del hidrograma general del caudal promedio mensual para la Quebrada El Perro (1981-2010)</i>	75
Figura 7.4 <i>Hidrograma individual No. 1</i>	76
Figura 7.5 <i>Hidrograma individual No. 2</i>	77

Figura 8.1 <i>Lodolitas negras y grises del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande</i>	80
Figura 8.2 <i>Lodolitas negras estratificadas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande</i>	81
Figura 8.3 <i>Fracturamiento en la parte superior de la Formación Manizales</i>	85
Figura 8.4 <i>Manantial LF029</i>	87
Figura 8.5 <i>Manantial LF110</i>	92
Figura 8.6 <i>Manantial LF027</i>	95
Figura 8.7 <i>Posibles direcciones de flujo de los sistemas locales y subregionales</i>	99
Figura 9.1 <i>Localización de manantiales monitoreados</i>	102
Figura 9.2 <i>Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF029 del acuífero Formación Manizales (b)</i>	105
Figura 9.3 <i>Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF029 (acuífero Fm. Manizales)</i>	109
Figura 9.4 <i>Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para dos periodos de recesión para el manantial LF029</i>	111
Figura 9.5 <i>Hietograma de la estación Niza (a) e hidrogramas para manantial LF017 (b) y manantial LF094 (c) del acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande</i>	114
Figura 9.6 <i>Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF017 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)</i>	120
Figura 9.7 <i>Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF094 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)</i>	122
Figura 9.8 <i>Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para tres periodos de recesión para el manantial LF017 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)</i>	125
Figura 9.9 <i>Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para dos periodos de recesión para el manantial LF094 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)</i>	127
Figura 9.10 <i>Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF003 (b) del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica</i>	132
Figura 9.11 <i>Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF063 (b) del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica</i>	134
Figura 9.12 <i>Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF077 (b) del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica</i>	137
Figura 9.13 <i>Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF110 (b) del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica</i>	139

Figura 9.14 <i>Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios del hidrograma del manantial LF003 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	144
Figura 9.15 <i>Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios del hidrograma del manantial LF063 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	146
Figura 9.16 <i>Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios del hidrograma del manantial LF077 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	148
Figura 9.17 <i>Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios del hidrograma del manantial LF110 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	150
Figura 9.18 <i>Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para dos periodos de recesión del manantial LF003 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	152
Figura 9.19 <i>Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para dos periodos de recesión del manantial LF063 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica).....</i>	154
Figura 9.20 <i>Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para un periodo de recesión del manantial LF077 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica).....</i>	156
Figura 9.21 <i>Hidrogramas y resultados de los calculos del coeficiente α para tres periodos de recesión para el manantial LF110 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	158
Figura 10.1 <i>Hidrogramas consolidados para los manantiales monitoreados en tres de los acuíferos de la zona</i>	167
Figura 10.2 <i>Comparación de la variación multitemporal de la temperatura entre los acuíferos monitoreados</i>	175
Figura 10.3 <i>Comparación de la variación multitemporal de la conductividad eléctrica entre las unidades acuíferas monitoreadas</i>	178

Lista de Tablas

Tabla 4.1 <i>Parámetros para la caracterización y medición de fracturas</i>	20
Tabla 4.2 <i>Clasificación de manantiales basada en promedios de caudal de descarga</i>	24
Tabla 4.3 <i>Clasificación simple de aguas subterráneas basada en el total de sólidos disueltos</i>	25
Tabla 8.1 <i>Localización, parámetros hidroquímicos y caudales de los manantiales del acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande</i>	82
Tabla 8.2 <i>Localización, parámetros hidroquímicos y caudales de los manantiales del acuífero Formación Manizales</i>	86
Tabla 8.3 <i>Localización, parámetros hidroquímicos y caudales de los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica</i>	89
Tabla 8.4 <i>Localización, parámetros hidroquímicos y caudales de los manantiales del acuífero Depósitos vulcanosedimentarios</i>	93
Tabla 9.1 <i>Lista de manantiales monitoreados por unidad hidrogeológica, con información recolectada</i>	101
Tabla 9.2 <i>Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma del manantial LF029 (acuífero Fm Manizales)</i>	106
Tabla 9.3 <i>Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizados para el manantial LF029 (acuífero Fm Manizales)</i>	113
Tabla 9.4 <i>Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma de los manantiales LF017 y LF094 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)</i>	116
Tabla 9.5 <i>Compilado de las capacidades de regulación (C) para los manantiales del acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande</i>	128
Tabla 9.6 <i>Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizados para el manantial LF017 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)</i>	129
Tabla 9.7 <i>Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizados para el manantial LF094 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)</i>	130
Tabla 9.8 <i>Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma del manantial LF003 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	133
Tabla 9.9 <i>Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma del manantial LF063 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	135
Tabla 9.10 <i>Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma del manantial LF110 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	140

Tabla 9.11 <i>Tiempos de concentración de los eventos E1 y E2 para los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica.....</i>	141
Tabla 9.12 <i>Duración de la recesión de los eventos E1 y E2 para los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica.....</i>	142
Tabla 9.13 <i>Compilado de las capacidades de regulación (C) para los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica.....</i>	159
Tabla 9.14 <i>Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizados para el manantial LF003 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	160
Tabla 9.15 <i>Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizados para el manantial LF063 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	161
Tabla 9.16 <i>Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizados para el manantial LF077 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	162
Tabla 9.17 <i>Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizados para el manantial LF110 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)</i>	163
Tabla 9.18 <i>Compilado de los volúmenes almacenados al inicio de la curva de recesión para los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica</i>	163
Tabla 10.1 <i>Comparación de los caudales de descarga medidos para las unidades acuíferas</i>	165
Tabla 10.2 <i>Comparación de las capacidades de regulación (C) entre las unidades acuíferas y para los manantiales de la zona de falla</i>	169
Tabla 10.3 <i>Consolidado de la duración de las curvas de recesión de las unidades acuíferas y los manantiales ubicados en la zona de falla</i>	170
Tabla 10.4 <i>Resultados comparativos de los volúmenes almacenados al inicio de la curva de recesión después de los eventos de precipitación</i>	171
Tabla 10.5 <i>Comparación de las propiedades hidráulicas básicas para las unidades acuíferas</i>	173

Lista de Anexos

Anexo A. Mapa Geológico.

Anexo B. Tabla de Clasificación de Manantiales según Bryan.

Anexo C. Mapa Hidrogeológico.

Anexo D. Mapa con Localización de Manantiales (Inventario Inicial).

Anexo E. Recolección Datos del Inventario Inicial.

Anexo F. Recolección Datos del Monitoreo.

Anexo G. Fichas Técnicas INGEOMINAS.

1. Introducción

Las zonas de montaña son una fuente importante de recursos hídricos para gran parte de la población mundial y en especial para Colombia. La disponibilidad de estos recursos se ve amenazada por el decrecimiento de las áreas con glaciares y los cambios ecológicos de las zonas de páramo. La existencia de agua subterránea en zonas de montaña y su contribución al flujo base históricamente se ha considerado de poca importancia, pero ahora se entiende como una contribución significativa a los recursos hídricos de estas regiones (Somers y McKenzie, 2020).

El agua subterránea en zonas de montaña se encuentra en depósitos aluviales y glaciares, así como en depósitos volcano-sedimentarios. Zonas acuíferas también se pueden encontrar en rocas consolidadas, afectadas por fracturamiento (Somers y McKenzie, 2020).

Los acuíferos de origen volcánico en áreas montañosas son de gran importancia debido a su productividad ya que son fuentes de agua subterránea, esto en Latinoamérica hace que países como México, Guatemala, Bolivia y otros países con gran extensión de depósitos volcánicos, dependan parcial o totalmente de este recurso para abastecer sus acueductos (Anton, 1993; Centamore et al., 1996; en Ríos-Sánchez, 2012). La mayoría de áreas con acuíferos volcánicos (principalmente en rocas cenozoicas y terciarias) en Latinoamérica, cuentan con poca información para realizar un manejo adecuado y sostenible de los recursos de agua (Zektser y Everett, 2004 en Ríos-Sánchez, 2012). Además, estas son regiones de complejidad tectónica, en las cuales el impacto de fallas y fracturas en la hidrogeología no ha sido evaluado, pero se espera que esta tenga influencia significativa en el comportamiento hidrogeológico de estos acuíferos (Ríos-Sánchez, 2012). La topografía es otro factor limitante ya que dificulta el acceso y no facilita

caracterizar detalladamente la geología subsuperficial, efectuar estudios geofísicos tradicionales y/o perforar pozos.

El estudio de acuíferos en zonas de montaña es además de gran importancia en términos de gestión del riesgo. Los cambios en la saturación del suelo, el flujo de agua subterránea y el incremento en la presión de poros son factores que comúnmente se consideran como detonantes para la inestabilidad de terrenos (Cervi et al., 2012; Miller y Sias, 1998; Van Asch et al., 2009; Cascini et al., 2010). Es común que se considere el agua lluvia (reciente) como la causante de la recarga de agua subterránea. Esto ha conducido a que se ignore o subestime el papel de flujos profundos de agua subterránea, especialmente en zonas afectadas por tectonismo, en los cambios de la presión de poros y su incidencia en la estabilidad de los terrenos (Cervi et al., 2012).

Para el caso de Colombia, el potencial acuífero de formaciones ígneas y metamórficas se considera inexistente. De hecho, los mapas hidrogeológicos a escala 1:500.000 del Servicio Geológico Colombiano (2004), clasifican la mayoría de estas formaciones como de categoría c2: impermeables o de muy baja productividad (Servicio Geológico Colombiano, 2004). Sin embargo, en Colombia, las zonas más propensas a deslizamientos se encuentran en la cadena montañosa de la cordillera de los Andes debido a sus condiciones topográficas, geológicas e hidrológicas (Boroschek y Domb, 2007). Es así como el hecho de que la mayoría de zonas montañosas sean inestables y susceptibles a deslizamientos, especialmente en épocas lluviosas, indica que se ha hecho una caracterización incompleta de estas zonas y se desconoce el potencial del agua subterránea y sus posibilidades de aprovechamiento, la contribución del agua subterránea al caudal de quebradas y manantiales y la contribución del agua subterránea en la estabilidad de terrenos. Prueba de esto último, es que, aunque haya varios estudios en el país sobre temas de deslizamiento (Vera y Albarracín, 2017;

Hernández y Ramírez, 2016; Ramos et al., 2015), en ellos no se considera el agua subterránea como factor detonante que condiciona la ocurrencia de los movimientos de remoción en masa.

La gran mayoría de estudios hidrogeológicos de zonas de montaña en el país, se han focalizado en la identificación y caracterización de zonas de recarga en el Macizo de Santander (Velandia et al., 2016) y el Valle de Aburrá (Vélez et al., 2008; Betancur et al., 2017; Figueredo, 2019). Velandia et al. (2016) con base en la medición y análisis cinemático de fracturas, y la presencia de afloramientos de agua, determinan sectores de alta porosidad secundaria y proponen una conexión hidráulica en la zona debido a las fracturas que se comportan como canales de flujo de aguas subterráneas y potencialmente de fluidos contaminantes. Vélez et al. (2008) hacen uso de isótopos ambientales (deuterio y oxígeno 18) para determinar las zonas de recarga de los acuíferos del Occidente antioqueño. Por su parte, Betancur et al. (2017) tienen en cuenta factores como ubicación de los manantiales, perfiles de intemperismo, topografía, patrones estructurales e infiltración para determinaron las áreas de recarga directa y los sistemas regionales de flujo para el Valle de Aburrá, además, utilizan métodos hidrogeoquímicos e isotópicos para validar su modelo. Figueredo (2019) hace una revisión bibliográfica donde identifica metodologías con modelos matemáticos hasta metodologías participativas usadas para la identificación de zonas de recarga hídrica o donde se proponen alternativas para la recarga artificial de acuíferos.

Los manantiales al ser puntos de descarga de aguas subterráneas, permiten a través de mediciones directas obtener información acerca de los parámetros más comunes y fáciles para monitorear acuíferos tales como niveles de agua y por tanto la cabeza hidráulica, el caudal de manantiales, la temperatura del agua y parámetros indicadores de la calidad química del agua (Vogt et al., 2010). Los datos de caudales se

han usado para crear hidrogramas con los cuales se pueden determinar las características hidráulicas de un acuífero, tales como la capacidad de almacenamiento, la transmisividad y la cantidad de agua almacenada por eventos de recarga debido a precipitación (Kresic y Bonnaci, 2010).

Aunque los manantiales son una fuente de información económica para estudios hidrogeológicos, estos no han sido totalmente aprovechados en la mejora del conocimiento de estos recursos y no se ha establecido su potencial como herramientas de monitoreo. Lo anterior debido a que entre las concepciones que se tienen de los manantiales, especialmente se cree que el agua de un manantial proviene de un área de recarga adyacente. Sin embargo, los manantiales son zonas de descarga de agua subterránea que puede provenir de áreas de circulación profunda o somera, incluso pueden estar indicando áreas de falla que generan flujos preferenciales, o presentarse como salidas de agua por encontrarse al lado de una barrera impermeable (Springer et al., 2008). Es así como el estudio de manantiales puede servir como la primera evaluación del potencial acuífero de una zona, dar indicios sobre direcciones de flujo, entre otras cosas.

En Colombia no existen metodologías ampliamente difundidas para estudios de acuíferos en zonas de montaña, ni se han explorado los beneficios de la caracterización y el monitoreo de manantiales en estas zonas. En Manizales aun siendo una zona montañosa, afectada por tectónica, alta susceptibilidad a la ocurrencia de diversas amenazas naturales como deslizamientos e inundaciones (Corpocaldas, 2015) y crisis de abastecimiento de agua (El Tiempo, 2011; Aguas de Manizales, 2018), se desconoce la contribución del agua subterránea en los deslizamientos y el potencial de este recurso como alternativa de abastecimiento.

La microcuenca de la Quebrada El Perro aun siendo un área de desarrollo, afectada por tectónica (Falla El Perro), con problemas de deslizamientos (Escobar y Patiño, 2003; Cortés, 2003) y presentar procesos erosivos activos, con presencia de algunas obras de estabilización de taludes y control de erosión (Corpocaldas, 2015), no ha sido caracterizada hidrogeológicamente, ni se conoce cómo el agua subterránea contribuye a la generación de estos procesos en ella.

La ausencia de metodologías genera conocimiento incompleto en los estudios de acuíferos de montaña y sistemas de flujo. Al no contarse con estudios sistemáticos de estos acuíferos puede decirse que los recursos hídricos subterráneos que se encuentran en estas regiones están siendo subutilizados. Por una parte, el desconocimiento del potencial hidrogeológico de las unidades geológicas en una zona no permite aprovechar un recurso que puede usarse como alternativa de abastecimiento en tiempos de crisis (ej. crisis de abastecimiento de agua en la ciudad de Manizales del año 2011). Las relaciones agua superficial/agua subterránea al no estar claramente establecidas y, por lo tanto, no evaluarse la contribución de esta última al caudal de ríos y quebradas, podría estar afectando políticas y planes de manejo de cuencas hidrográficas y ordenamiento territorial. También, en cuanto a temas de estabilidad de terrenos, si no se conoce la contribución del agua subterránea a los deslizamientos, el manejo de áreas inestables y obras de mitigación, se estarían haciendo de manera incompleta.

Este estudio se ha orientado a caracterizar el potencial hidrogeológico de la microcuenca de la Quebrada El Perro y determinar las propiedades hidráulicas de las unidades acuíferas con base en información de manantiales. Se propone además evaluarla relaciones agua superficial/agua subterránea. Para ello, se pretenden resolver las siguientes preguntas de investigación: ¿Qué formaciones geológicas aflorantes en la microcuenca tienen potencial acuífero? ¿Cuáles son las características básicas de estos

acuíferos? ¿Cómo el monitoreo de manantiales contribuye a la medición y caracterización de propiedades hidroquímicas, así como a la determinación de propiedades hidráulicas de acuíferos en zonas de montaña? ¿Cómo el monitoreo de manantiales contribuye a determinar la relación entre el agua superficial y el agua subterránea? ¿Cómo el monitoreo de manantiales e información de eventos de precipitación, contribuyen a establecer la respuesta de los acuíferos a estos eventos?

Para ello se desarrolló una metodología detallada para hacer la evaluación del potencial hidrogeológico en la microcuenca de la Quebrada El Perro, localizada al este de Manizales en una zona rural con algunas afectaciones urbanísticas. El estudio se basa principalmente en la identificación y caracterización de las unidades acuíferas siguiendo una cartografía geológica 1:5.000 (creada en este estudio) y la información obtenida de manantiales mediante un inventario de puntos de agua. Para desarrollo del proyecto se realizó el monitoreo de manantiales seleccionados durante tres meses (diciembre de 2019 a febrero de 2020), se realizaron mediciones semanales de caudal y parámetros hidroquímicos básicos tales como la conductividad eléctrica, pH y temperatura para crear hidrogramas y series de tiempo con el fin de analizar la respuesta a los eventos de precipitación de los acuíferos que alimentan estos manantiales, y estimar de manera comparativa las propiedades hidráulicas de estos acuíferos, basados en el análisis de las curvas de recesión.

Los resultados de la evaluación del potencial hidrogeológico de la zona indican que en la Quebrada El Perro, se encuentran acuíferos de porosidad primaria, secundaria y de doble porosidad, con comportamientos y características hidroquímicas e hidráulicas variables. El monitoreo indica que el agua subterránea juega un papel importante en la regulación del agua superficial. Este monitoreo, además, indica que estas unidades acuíferas responden de manera diferente a los eventos de precipitación,

tanto en los tiempos en que esta se convierte en recarga como en los cambios de las propiedades hidroquímicas.

2. Objetivos

Con el fin de responder las preguntas de investigación descritas anteriormente se plantearon los siguientes objetivos.

2.1 Objetivo General

Realizar una caracterización geológica e hidrogeológica y un monitoreo de las unidades acuíferas en la microcuenca de la Quebrada El Perro, analizar las propiedades hidroquímicas básicas del agua subterránea y su variación temporal, determinar propiedades hidráulicas de los acuíferos y caracterizar la relación del agua subterránea con el agua superficial.

2.2 Objetivos Específicos

*Elaborar una cartografía 1:5000 determinando las unidades geológicas presentes en la zona de estudio junto a sus características litológicas y estructurales.

*Evaluar el potencial hidrogeológico de las diferentes unidades geológicas de la microcuenca según su capacidad de contener, transmitir y almacenar agua.

*Determinar la circulación del agua subterránea en las unidades acuíferas identificadas definiendo zonas de alimentación o recarga, zonas de circulación y zonas de descarga.

*Determinar las propiedades químicas básicas del agua subterránea (temperatura, conductividad eléctrica, pH, total de sólidos disueltos) en los acuíferos de la zona y sus variaciones temporales.

*Caracterizar las variaciones de caudal en los manantiales monitoreados mediante el uso de hidrogramas para analizar la contribución del agua subterránea a las fuentes superficiales.

*Evaluar la respuesta de las unidades acuíferas a los eventos de precipitación mediante el análisis de hidrogramas.

*Obtener características hidráulicas (coeficiente de recesión α y capacidad de regulación C) de las unidades acuíferas de la zona de estudio mediante el uso de curvas de recesión en los manantiales monitoreados.

3. Localización y Características Generales del Área de Estudio

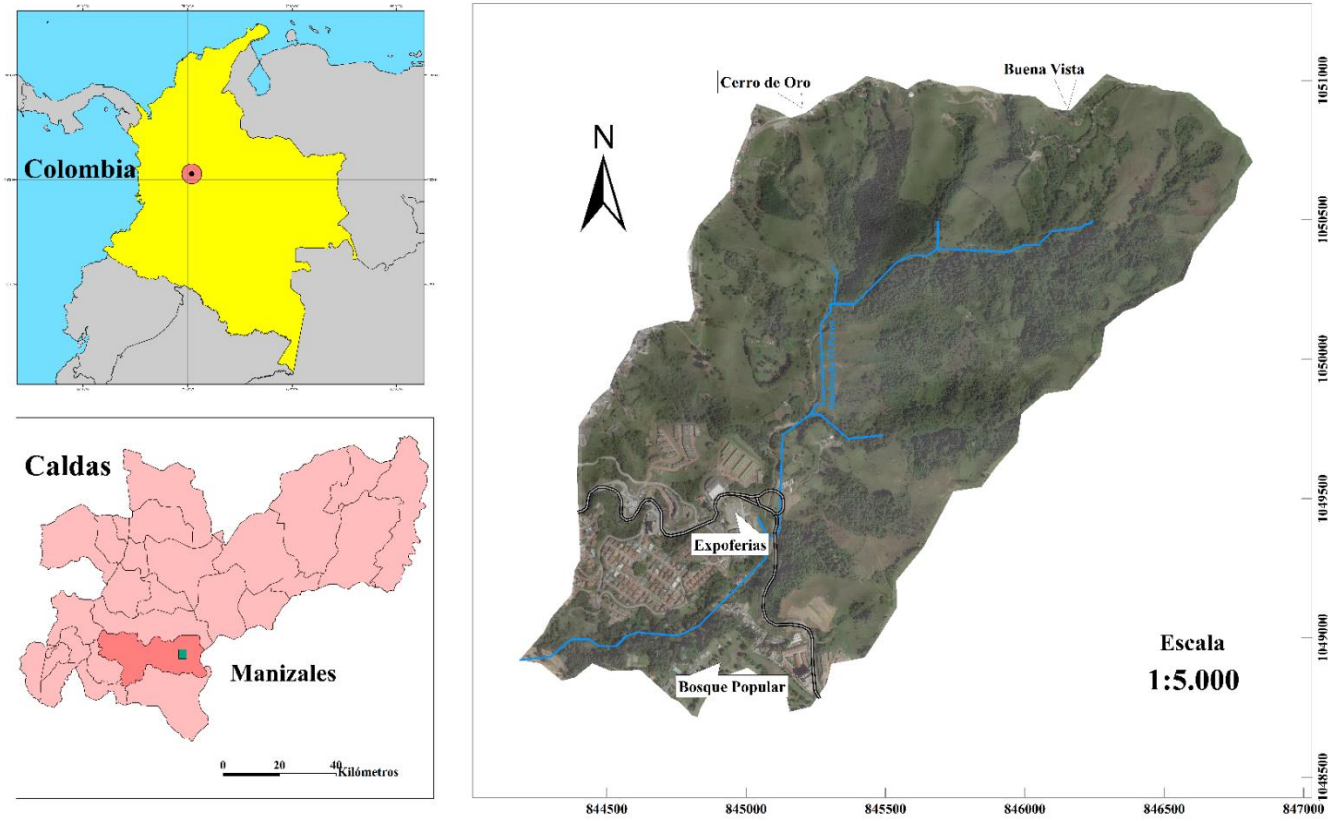
La microcuenca de la Quebrada El Perro está localizada al oriente del Municipio de Manizales, en el Departamento de Caldas, ubicado en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia (Figura 3.1). La zona de estudio tiene un área aproximada de 3.25 km², comprendida entre las planchas topográficas 206-III-B-4 y 206-III-D-2 a escala 1:10.000, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

La Quebrada El Perro nace a una altitud de 2400 m.s.n.m aproximadamente, a lo largo del sector conocido como Cerro de Oro vía la Vereda Buena Vista, y vierte sus aguas al Rio Chinchiná a 2000 m.s.n.m en las inmediaciones del Bosque Popular El Prado. El área se caracteriza por tener un “relieve quebrado, cuyas pendientes varían entre 0° y 45°” (Corpocaldas, 2015).

La microcuenca se encuentra moderadamente desarrollada y en ella se “destacan dos principales formas de uso del suelo, uno relacionado con aspectos urbanísticos y otro con la cobertura vegetal natural o antrópica” (Corpocaldas, 2015). Hacia la margen inferior izquierda de la microcuenca se ha consolidado un desarrollo urbanístico en donde se ha adecuado el terreno para la construcción de viviendas (Barrios Chachafruto, El Trébol y actual construcción del conjunto residencial “Amarello” junto a Expoferias) e infraestructura vial de la avenida Alberto Mendoza. Por el contrario, hacia la parte media y alta de la microcuenca se presenta cobertura vegetal tipo bosques y rastrojo como áreas protectoras de drenaje. También, existe la presencia de pastos los cuales son usados como potreros para prácticas de ganadería en algunas fincas de pequeña extensión.

Figura 3.1

Mapa localización de la microcuenca de la Quebrada El Perro



Nota. Imagen satelital obtenida de Bing Maps-Satellite mediante el programa SAS Planet.

4. Metodología

Para la evaluación del potencial acuífero de las unidades geológicas del área de estudio y caracterización de sus propiedades hidráulicas, se llevaron a cabo 4 fases: recolección de información básica, hidrología superficial, geología e hidrogeología. Dentro de la fase de hidrogeología se realizó un inventario de puntos de agua, se clasificó el potencial acuífero de las unidades geológicas y se hizo un monitoreo de caudales y propiedades hidroquímicas básicas. A partir de esta información se caracterizaron las propiedades hidráulicas de las unidades acuíferas, como se presenta en la Figura 4.3.

La caracterización de propiedades hidráulicas incluye el análisis de la respuesta de los acuíferos a los eventos de precipitación, en términos de variaciones de caudal (a través del análisis de hidrogramas) y de variación de las propiedades fisicoquímicas básicas del agua subterránea (a través del análisis de series multitemporales). De las curvas de recesión obtenidas para cada manantial, se calcularon coeficientes de recesión (α) y capacidades de regulación C ($1/\alpha$), las cuales fueron usadas como indicadores de la capacidad del acuífero para almacenar, retener y transmitir agua ya que dependen de la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento de los acuíferos. Finalmente se realizó un análisis comparativo de las propiedades hidráulicas obtenidas para las unidades acuíferas existentes en la zona de estudio.

Las siguientes secciones describen a detalle las actividades desarrolladas en cada fase y los fundamentos teóricos para la interpretación de los resultados. Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 resaltan las actividades y resultados más importantes obtenidos para cada fase y su contribución a la caracterización final de las unidades acuíferas.

Figura 4.1

Metodología desarrollada para las fases Información básica e Hidrología superficial

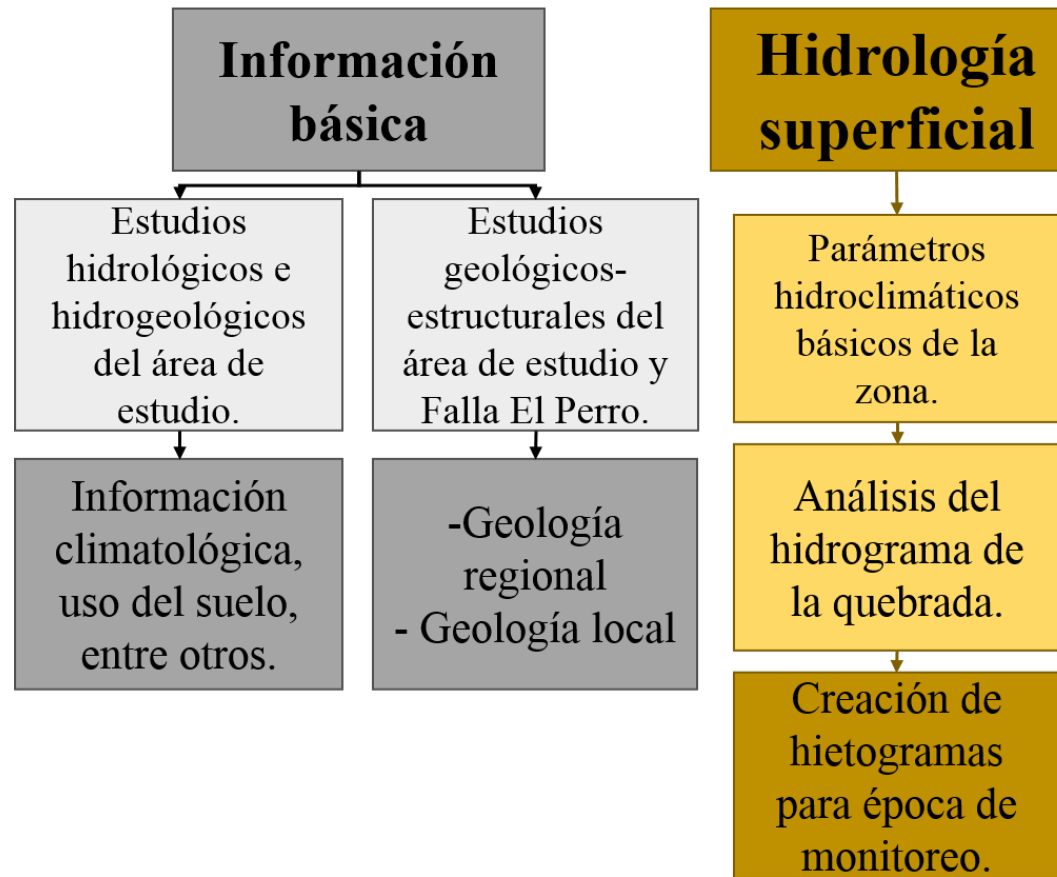


Figura 4.2

Metodología desarrollada para las fases Geología local y Evaluación Hidrogeológica

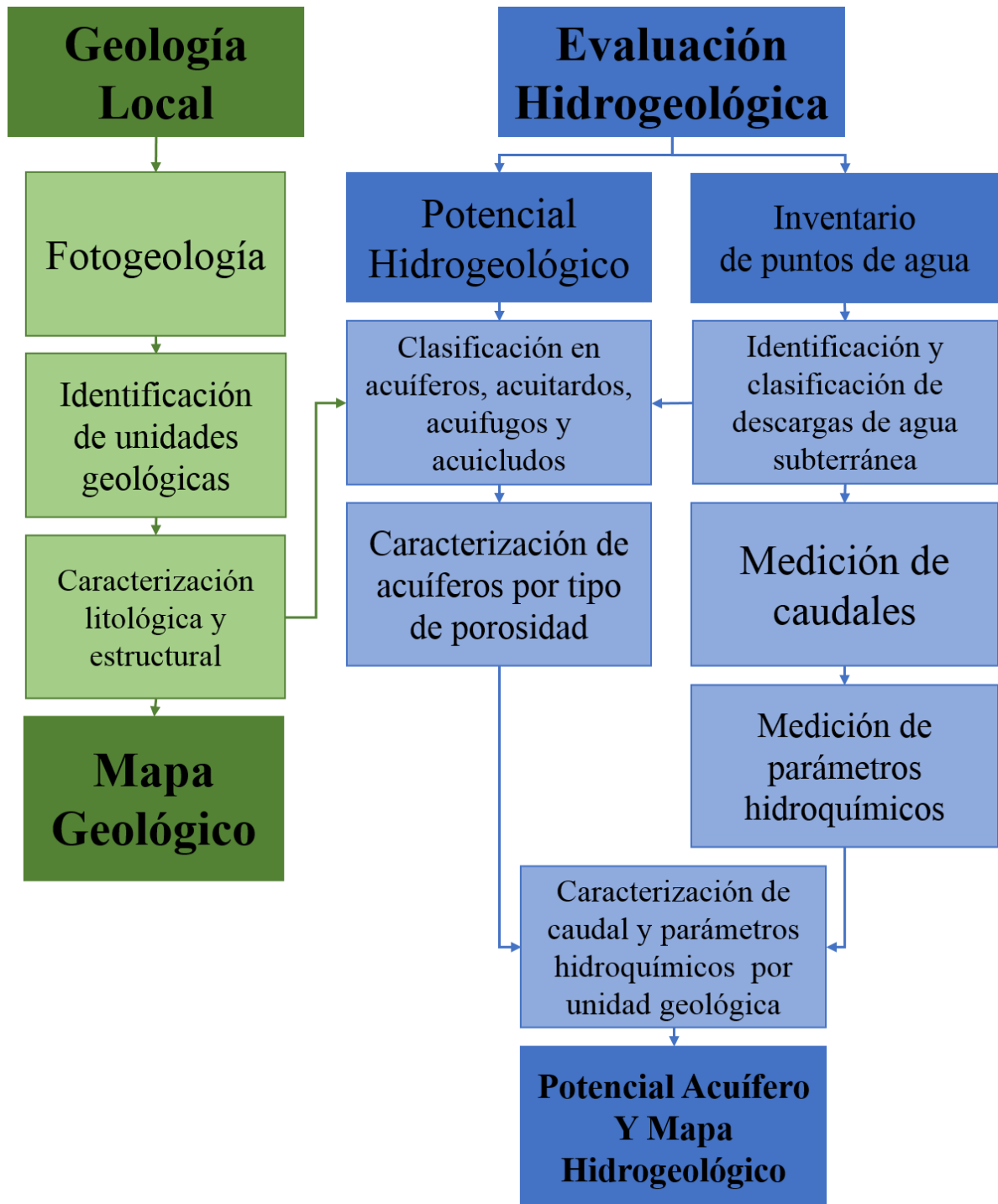
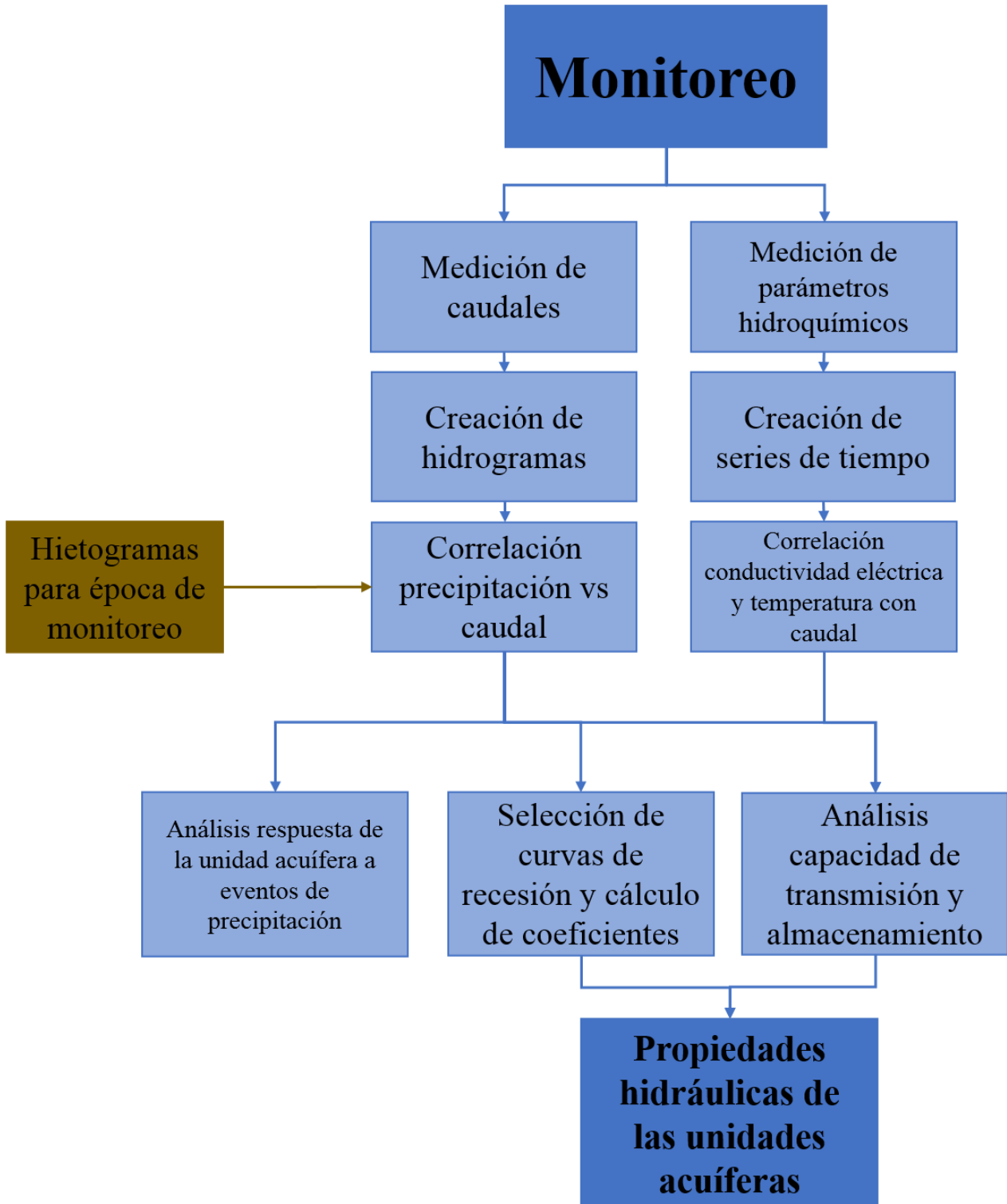


Figura 4.3

Metodología desarrollada para la fase monitoreo



4.1 Recolección y Análisis de Información Básica

En esta fase se llevó a cabo la recopilación de información existente referente a información general de la microcuenca, como estudios geológicos y estructurales, información climatológica, hidrológica e hidrogeológica tanto a nivel regional como local. Para la Microcuenca se adquirió una imagen de satélite (Bing Maps-Satellite), y un modelo digital de terreno elaborado a partir de imágenes ALOS-PALSAR, (JAXA-Alaska Satellite Facility, 2019) con una resolución espacial de 12.5 m.

4.2 Hidrología Superficial

Con base en estudios existentes (Corpocaldas, 2014) se obtuvieron parámetros hidroclimatológicos básicos de la microcuenca: precipitación media mensual, evapotranspiración, temperatura y caudal. Además, se obtuvo información pluviométrica de las precipitaciones diarias.

4.2.1 Análisis del Hidrograma de la Quebrada El Perro

Los datos de caudal modelado (Corpocaldas, 2014) de la Quebrada El Perro de los años entre 1981 y 2010 fueron graficados en un hidrograma el cual permite determinar la respuesta de esta a los eventos de precipitación.

El hidrograma es definido como un gráfico que relaciona alguna propiedad del flujo de agua de un cauce, tal como caudal, velocidad, etcétera, con el tiempo (Custodio y Llamas, 1983). Para el análisis realizado en este estudio, se entenderá por hidrograma el gráfico que muestra la variación del caudal con el tiempo.

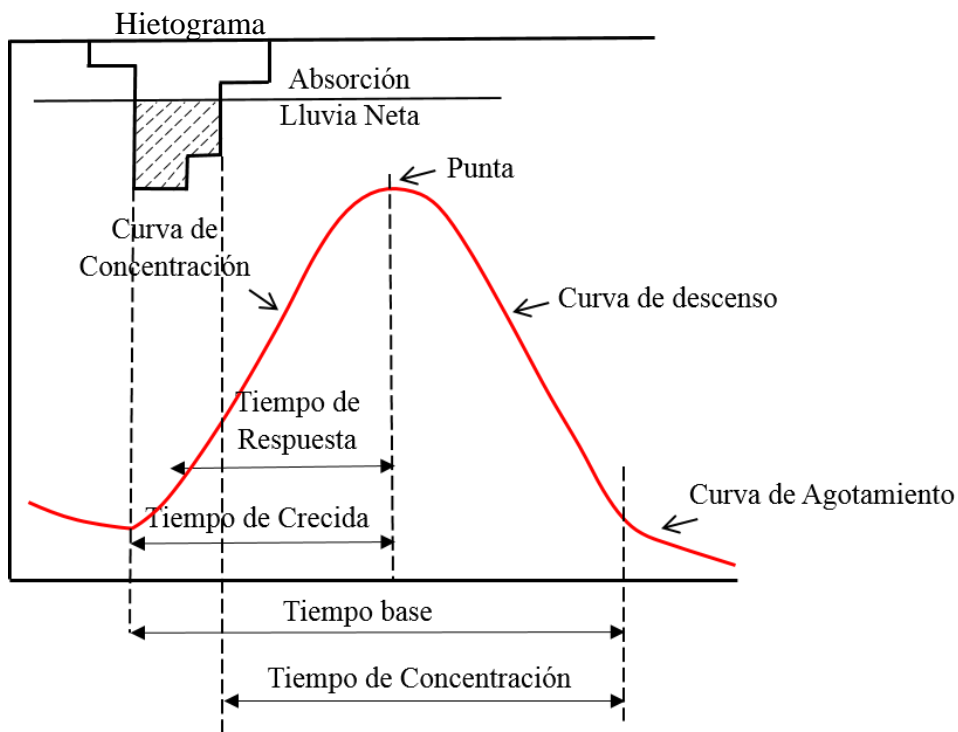
Uno de los análisis más comunes que se realizan dentro de una cuenca hidrográfica, es la respuesta del caudal frente a los eventos de precipitación. Para ello la

precipitación y el caudal se grafican simultáneamente. La precipitación se grafica en un diagrama de barras, denominado “hietograma” que representa los eventos de precipitación en un intervalo de tiempo, como se indica en la Figura 4.4.

Los componentes del hidrograma y su descripción se presentan en la Figura 4.4. Estas descripciones se basan en lo descrito por Custodio y Llamas (1983).

Figura 4.4

Componentes del hietograma e hidrograma



Nota. Tomado y adaptado de Custodio y Llamas (1983).

Curva de concentración: línea que indica el aumento de caudal debido al evento de precipitación, va desde el inicio del incremento de caudal hasta el valor máximo.

Punta/Pico: valor máximo de caudal.

Curva de descenso: curva que va desde el pico de caudal hasta el momento en el que la escorrentía producida por la precipitación ha cesado.

Curva de agotamiento: representa el momento donde el caudal procede solamente de la escorrentía subterránea.

Tiempo de crecida: tiempo transcurrido desde el ascenso del hidrograma hasta la punta.

Tiempo de respuesta o “lag”: tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hidrograma hasta la punta del hidrograma, representa el retraso de la escorrentía.

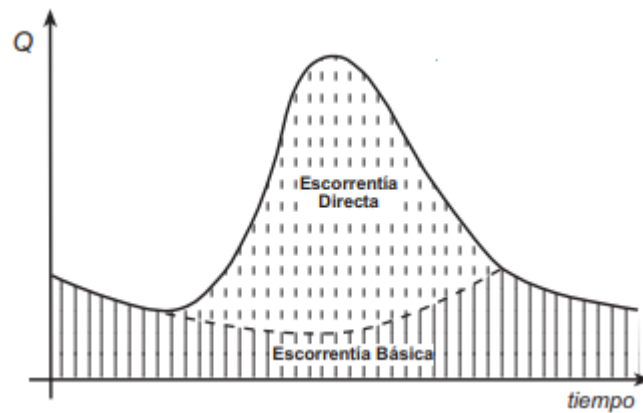
Tiempo base: tiempo que transcurre entre el comienzo de la crecida y el final de la escorrentía directa.

Tiempo de concentración: tiempo que va desde el final de la lluvia al final de la escorrentía directa, es decir, el tiempo que tarda en llegar al aforo la última gota de lluvia caída en el extremo más alejado de la cuenca y que circula por escorrentía directa.

Uno de los objetivos de esta fase es determinar la contribución del agua subterránea al caudal de la quebrada. Para esto se usó el hidrograma de escorrentía media mensual de los años entre 1981 a 2010 y se realizó la separación de los componentes del flujo. Sánchez (2017), define dos componentes principales que conforman el hidrograma, uno de ellos es la escorrentía directa que se produce por la precipitación que no se infiltra en el suelo y el otro es la escorrentía básica, para este estudio llamada flujo base, que se debe a la escorrentía subterránea y corresponde al caudal que tenía el río antes de los eventos de precipitación (Figura 4.5). Estos componentes deben ser separados ya sea por métodos gráficos o por métodos químicos. En este estudio, se empleó la metodología propuesta por Sánchez (2017), como se describirá en el capítulo de Hidrología Superficial.

Figura 4.5

Separación de los componentes del flujo en un hidrograma



Nota. Tomado de Sánchez (2017).

4.2.2 Creación de Hietogramas

La información pluviométrica de las precipitaciones diarias durante los meses de noviembre y diciembre del año 2019, enero y febrero del año 2020 en la ciudad de Manizales registradas en la estación Niza dominio del IDEA (Reporte meteorológico) fueron usadas para crear el hietograma que será usado en la fase de monitoreo.

4.3 Geología Local

En esta fase se realizó la identificación y caracterización de las unidades geológicas existentes en la zona de estudio. Inicialmente, se desarrolló una fotointerpretación mediante la identificación de lineamientos, estructuras geológicas y posibles zonas de interés que posteriormente se corroborarían en campo. Para esto se hizo uso de las fotografías aéreas: 0968 a 0971-10-11-2008, 1000 a 1004-10-11-2008 y 1030 a 1035-10-11-2008 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi cuya escala aproximada de la imagen es 1:17.000. Para mejorar el detalle en el mapeo de lineamientos y fallas, fue usado un modelo digital de terreno de la zona, de una resolución espacial de 12.5 m, con

el fin de crear mapas de modelos de sombra, pendiente y aspecto. Este mapa fue superpuesto a la imagen satelital de Bing Maps- Satellite para afinar el mapeo de estas estructuras. La información de los lineamientos fue graficada en un diagrama de rosas.

Además, con el propósito de actualizar y detallar la cartografía 1:100.000 del servicio geológico colombiano del año 1998 y para verificar las descripciones de otros estudios realizados en el Municipio de Manizales, que incluyen la zona de estudio, se realizó una cartografía geológica detallada 1:5.000 obtenida a través de salidas de campo durante 15 días, donde se controlaron afloramientos a lo largo del cauce principal y sus respectivos tributarios. Durante dicho proceso se recolectaron datos de 137 estaciones siguiendo la nomenclatura LF001 y se tomaron muestras representativas de roca y sedimento.

En cada estación además de obtener información del tipo de roca, grado de meteorización, grado de humedad, espesores, estratificación, profundidad radicular, etc. Se realizó un estudio de fracturas siguiendo la propuesta de caracterización y medición de fracturas de Singhal y Gupta (2010) donde los principales parámetros a tener en cuenta se recopilan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1

Parámetros para la caracterización y medición de fracturas

Parámetro	Descripción
1. Número de Sets	Número de sets o discontinuidades presentes en la red.
2. Orientación	Posición de la discontinuidad presente en la red.

3. Espaciamiento	Distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes del mismo conjunto.
4. Persistencia	Longitud del trazo de la discontinuidad.
5. Densidad	
- Lineal	Número de fracturas por unidad de longitud.
- Areal	Longitud acumulada de fracturas por unidad de área de exposición.
- Volumétrica	Área de superficie de fractura acumulada por unidad de volumen de roca.
6. Área y forma de la fractura	Área y forma de la superficie fracturada.
7. Conteo de fracturas volumétricas	Número de fracturas por metro cúbico de volumen de roca.
8. Unidad Matriz bloque	Tamaño y forma del bloque resultante de la red de fracturas.
9. Conectividad	Características de intersección y terminación de fracturas.
10. Apertura	Distancia perpendicular entre las paredes rocosas adyacentes de una discontinuidad, el espacio está lleno de aire o agua.
11. Aspericidad	Proyecciones de las paredes rocosas a lo largo de la superficie de discontinuidad.
12. Revestimientos y rellenos de paredes	Materiales sólidos que se presentan como revestimientos de paredes y rellenos a lo largo de la superficie de discontinuidad.

Nota. Tomado y adaptado de Singhal y Gupta (2010).

Finalmente, se analizaron bajo la lupa binocular marca Leyca las muestras recolectadas a lo largo de la microcuenca de la Quebrada El Perro, teniendo en cuenta su composición, litología, análisis sedimentológico como tamaño de grano, redondez, esfericidad y selección, con el fin de complementar de forma detallada las descripciones realizadas inicialmente en la fase de campo. Además, se estudiaron los indicadores cinemáticos presentes en las muestras de roca pertenecientes a la zona de falla.

Los resultados de esta cartografía se presentan en el Mapa Geológico de la zona (Anexo A).

4.4 Evaluación Hidrogeológica

La evaluación de la hidrogeología de la zona de estudio se realizó en dos subfases: en la primera se realizó el inventario de puntos de agua en la microcuenca, y en la segunda se determinó el potencial que tiene cada unidad para almacenar y transmitir agua.

4.4.1 Importancia Hidrogeológica de los Manantiales

En áreas de montaña el inventario y monitoreo de manantiales cobra especial relevancia ya que estos son casi el único acceso al acuífero, esto hace que se conviertan casi en la única fuente de información hidrogeológica y sean considerados una fuente económica de información para estudios hidrogeológicos.

Los manantiales son lugares donde la cabeza hidráulica de un acuífero intercepta la superficie topográfica, a menudo fluyendo naturalmente desde la roca o el suelo hacia la superficie de la tierra o hacia un cuerpo de agua superficial (Wilson y Moore, 1998 en Springer et al., 2008). Los manantiales surgen en la mayoría de los ecosistemas de la

tierra, incluyendo una amplia gama de entornos terrestres superficiales, y como descarga subacuática de lechos de agua dulce y cuerpos de agua marina (Springer et al., 2008). Existen numerosas estructuras geológicas y topográficas que pueden causar la generación de un manantial.

La importancia de los manantiales radica en que estos puntos de agua se consideran una respuesta integrada a los procesos geológicos e hidrogeológicos que están sucediendo en las áreas del acuífero que lo están alimentando (Springer et al., 2008). La existencia de un manantial requiere que el subsuelo sea incapaz de transmitir agua a la misma velocidad a la que se le está suministrando. Para que suceda una descarga de alto volumen concentrado en un solo sitio se requiere una combinación de factores como: áreas grandes de recarga, alta tasa de recarga y alta permeabilidad del acuífero que alimenta el manantial. Finalmente, la presencia de un punto de descarga localizado, en vez de zonas de filtración (seepage), son evidencias de la heterogeneidad de la permeabilidad en el acuífero (Manga, 2001).

4.4.2 Inventario de Puntos de Agua

Debido a la difícil topografía de la zona de estudio y las limitaciones al acceso de toda la extensión de la misma, el foco del inventario se centró en los drenajes. A lo largo de estos se identificaron 55 descargas de agua subterránea. Para cada una de ellas se tomaron datos de coordenadas y altura, y mediciones de caudal y parámetros fisicoquímicos como se describirá más adelante.

Para medir el caudal se utilizó el método volumétrico, encausando la salida de agua y tomando el tiempo que tarda en llenar un volumen determinado, en este caso volúmenes de 100, 200 y 2000 ml. Este método se realizó tres veces por punto de agua

para luego promediar estos valores. Las mediciones no fueron posibles para los manantiales que descargan por goteo.

Cuando la cantidad de agua drenada lo hizo posible, se hicieron mediciones de propiedades fisicoquímicas básicas del agua subterránea como el caudal, pH, temperatura, conductividad eléctrica y total de sólidos disueltos, usando un multiparámetro marca Hanna HI 98129.

Cada manantial se clasificó según las categorías descritas por Bryan (1919) basadas en los factores esenciales que controlan el desarrollo de ellos, como son la fuente del agua y la estructura rocosa que lleva dicha agua a la superficie. En el Anexo B se presenta un resumen de dicha clasificación.

Los datos tomados durante el inventario fueron agrupados y analizados por unidad geológica. Para cada una de ellas se realizó el promedio de caudal de descarga y se clasificó con base en las categorías de Meinzer (1923) en Kresic (2010) como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2

Clasificación de manantiales basada en promedios de caudal de descarga

Magnitud	Descarga	Descarga en unidades inglesas (aproximado)
Primero	$\geq 10 \text{ m}^3/\text{s}$	353 s-ft (ft^3/s)
Segundo	1 a $10 \text{ m}^3/\text{s}$	35 a 353 s-ft (ft^3/s)
Tercero	0.1 a $1 \text{ m}^3/\text{s}$	3.5 a 35 s-ft (ft^3/s)
Cuarto	10 a 100 l/s	158 gal/min a $3.5 \text{ ft}^3/\text{s}$
Quinto	1 a 10 l/s	16 a 158 gal/min
Sexto	0.1 a 1 l/s	1.6 a 16 gal/min

Séptimo	100 x 10 ⁻³ a 10 x 10 ⁻³ l/s	1.25 pt a 1.68 gal/min
Octavo	<10 x 10 ⁻³ l/s	<1.25 pt/min

Nota. Clasificación basada en el sistema métrico. m³/s: metros cúbicos por segundo, l/s: litros por segundo, cm³/s: centímetros cúbicos por segundo, s-ft: segundo-pie, ft³/s: pies cúbicos por segundo, gal/min: galones por minuto, pt/min: pintas por minuto. Tomado y adaptado de Meinzer (1923) en Kresic (2010).

Finalmente, el agua fue clasificada en categorías basadas en datos de conductividad eléctrica convertidos a total de sólidos disueltos, usando la tabla de clasificación de Freeze y Cherry (1979) (Tabla 4.3).

Tabla 4.3

Clasificación simple de aguas subterráneas basada en el total de sólidos disueltos

Categoría	Total de sólidos disueltos (mg/l o g/m³)
Agua dulce	0-1000
Agua salobre	1000-10000
Agua salina	10000-100000
Agua de salmuera	>100000

Nota. Tomado y adaptado de Freeze y Cherry (1979).

Los resultados de la clasificación del potencial hidrogeológico, los tipos de acuíferos y las características más importantes de los mismos, basados en la información geológica y el inventario se presentan en el capítulo 8 (Hidrogeología) y en el Mapa Hidrogeológico (Anexo C).

4.4.3 Evaluación del Potencial Hidrogeológico de las Unidades Geológicas

Las unidades geológicas fueron clasificadas con base en el potencial que tienen para almacenar y transmitir agua de acuerdo con las siguientes categorías: acuíferos, acuífugos, acuitardos y acuícludos. A continuación, se incluyen las definiciones de estos términos, basado en lo descrito por Custodio y Llamas (1983).

Acuífero: se denomina a aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas y hace que el hombre pueda aprovecharlas en cantidades necesarias para subvenir a sus necesidades, la idea del aprovechamiento de esta agua depende de las necesidades y disponibilidad en la zona de estudio.

Acuícludo: se define como aquella formación geológica que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación.

Acuitardo: hace referencia a aquellas formaciones geológicas que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para su explotación, pero, sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos.

Acuífugo: se denomina a aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, por ejemplo, rocas ígneas cristalinas no alteradas o rocas metamórficas sin meteorización o fracturación.

Una vez las unidades acuíferas son identificadas, éstas se clasificaron según el tipo de porosidad y permeabilidad que ellas presentan basado en los conceptos definidos por Fetter (2018), como se describe a continuación:

Acuíferos de porosidad primaria: Corresponde a aquellas unidades donde el agua subterránea fluye a través de espacios y conductos entre poros que se desarrollan durante el origen o depositación de la unidad. Ejemplos de estos son las vesículas y poros intergranulares.

Acuíferos de porosidad secundaria: Corresponde a aquellas unidades donde el agua subterránea fluye a través de espacios y conductos desarrollados por procesos posteriores al origen o depositación de la unidad. Ejemplos de estos son fracturas, diaclasas y canales de disolución.

Acuíferos de doble porosidad: Corresponde a aquellas unidades donde el agua subterránea fluye a través de espacios y conductos desarrollados tanto durante el origen o depositación de la unidad como por procesos posteriores.

4.5 Monitoreo de Manantiales y Características Hidráulicas de las Unidades

Acuíferas

Del total de puntos inventariados, se escogieron siete manantiales representativos de las unidades acuíferas más importantes para ser monitoreados una vez por semana durante los meses de diciembre del año 2019, enero y febrero del año 2020. Este periodo corresponde a la segunda época seca de la región. La selección de estos manantiales se hizo teniendo en cuenta que pertenecieran a las diferentes unidades acuíferas, que estuvieran espacialmente bien distribuidos y presentaran diferentes rangos de conductividad eléctrica y caudal. El monitoreo incluyó la medición del caudal de descarga (Q), pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE) y total de sólidos disueltos (TDS). Con estos datos se crearon hidrogramas para los siete puntos de monitoreo y series de tiempo, como se mostrará más adelante, que representan las

variaciones de conductividad eléctrica y temperatura con el tiempo. Los datos de TDS no se analizaron ya que ellos representan básicamente los mismos procesos que la CE. Para el caso de los datos de pH, estos no fueron empleados para este estudio ya que el sensor de pH usado presentó daños durante varias semanas del monitoreo lo cual no permitió recolectar datos suficientes para el análisis.

Finalmente, de esta fase se obtuvieron datos para determinar de manera cualitativa, semi-cuantitativa y comparativa las propiedades hidráulicas de los acuíferos identificados en la zona de estudio. Las propiedades analizadas corresponden a la capacidad para transmitir agua, definida como conductividad hidráulica o transmisividad (asociada principalmente con la permeabilidad) y la capacidad de almacenamiento o retención de agua del acuífero (asociada principalmente con la porosidad efectiva).

4.5.1 Importancia Hidrogeológica de los Parámetros Hidroquímicos Medidos en el Monitoreo

Entre los parámetros más comunes y fáciles para monitorear agua subterránea se encuentran los niveles de agua y por tanto la cabeza hidráulica, el caudal de manantiales, la temperatura del agua y la conductividad eléctrica (CE) ya que estos se consideran parámetros físicos robustos (Vogt et al., 2010).

4.5.1.1 Temperatura. El agua que se mueve a través de un acuífero transporta calor y de esta manera afecta la distribución de la temperatura del subsuelo. Por esto la temperatura puede ser usada como un trazador en procesos hidrológicos y para verificar modelos hidrogeológicos conceptuales La temperatura puede ser usada como un trazador al ser fácil, precisa y económica. (Manga y Kirchner, 2004).

Manga y Kirchner (2004) han indicado que la temperatura del agua de un manantial se puede relacionar a la velocidad del agua en el acuífero. En acuíferos con velocidades de circulación alta, la energía térmica que se adiciona por el gradiente geotérmico es disipada en volúmenes más grandes de agua lo cual hace que la temperatura en el manantial baje. De hecho, la temperatura del agua en un manantial puede ser más baja que la temperatura media del aire a la elevación del punto de descarga, si el agua es recargada en zonas topográficamente más elevadas. Por el contrario, en áreas donde el agua subterránea se mueve a baja velocidad (debido a baja permeabilidad) el gradiente térmico subsuperficial prácticamente no es afectado y la temperatura del agua del manantial será muy cercana a la de la temperatura del aire a la elevación del punto de descarga. Los manantiales con las más altas temperaturas ocurren a velocidades intermedias de agua subterránea, las cuales permiten que el flujo de agua remueva el flujo de energía geotérmica por advección, pero el calor (energía calórica que se ha agregado) no se diluye por grandes volúmenes de agua en circulación.

La temperatura del agua de los manantiales se ve afectada por factores tales como la entrada de agua de recarga por precipitación y flujos laterales. Los factores que contribuyen a la variación en la temperatura incluyen las propiedades físicoquímicas del agua de recarga y la velocidad de infiltración. Como menciona Rodríguez et al. (2018), el transporte de calor por el agua subterránea ha sido utilizado como trazador para identificar infiltración de agua superficial, flujo a través de fracturas y patrones de flujo en cuencas subterráneas. Los autores también indican que datos de temperatura también han sido utilizados para cuantificar valores de recarga y descarga y para estimar el intercambio con agua superficial.

4.5.1.2 Total de Sólidos Disueltos (TDS) y Conductividad Eléctrica (CE). El total de sólidos disueltos en el agua está conformado por aniones inorgánicos y compuestos. Los TDS se miden como el residuo de una muestra que es filtrada (para remover los sólidos suspendidos), calentada y evaporada (Fitts, 2002). La conductividad eléctrica mide la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica (Freeze y Cherry, 1979). La CE está relacionada con los TDS ya que es una función de la concentración de los solutos iónicos. La CE se mide de manera fácil y rápida en el campo y por ello se reporta más comúnmente que los TDS. Las unidades de CE son conductancia/longitud, medida como Siemens/m (S/m) o microsiemens/cm (uS/cm) (Fitts, 2002).

Existe una relación empírica entre TDS y CE

$$CE = A (TDS)$$

CE en uS/cm y TDS en mg/L. A es una constante que varía entre 0.55 a 0.75 (uS/cm) /mg/L para un rango grande de aguas naturales (Hem, 1985 en Fitts, 2002).

La mayoría de las aguas subterráneas someras son de baja CE, esta se incrementa debido a la circulación del agua, por disolución de los minerales del acuífero y con el incremento de los tiempos de residencia (Fitts, 2002).

4.5.1.2.1 Comportamiento de la CE Durante el Flujo de Agua Subterránea.

Casi todas las aguas subterráneas se originan de la lluvia o deshielo que se infiltra a través del suelo en sistemas de flujo en los materiales geológicos subyacentes. La zona del suelo tiene capacidades únicas y poderosas para alterar la química del agua, ya que la infiltración ocurre a través de esta delgada zona biológicamente activa. En las áreas de recarga la zona del suelo sufre una pérdida neta de materia mineral por el agua que

fluye. A medida que el agua subterránea se mueve a lo largo de las líneas de flujo desde la recarga hasta las áreas de descarga, su química se ve alterada por los efectos de una variedad de procesos geoquímicos (Freeze y Cherry, 1979).

A medida que el agua subterránea se mueve a lo largo de la dirección del flujo en la zona saturada, normalmente se dan aumentos del total de sólidos disueltos, debido al incremento de iones principales por disolución. Como se esperaría de esta generalización, se ha observado en las investigaciones de aguas subterráneas en muchas partes del mundo que el agua subterránea somera en las áreas de recarga es más baja en sólidos disueltos que el agua más profunda en el mismo sistema y mayor en sólidos disueltos que el agua en zonas poco profundas en las zonas de descarga (Freeze y Cherry, 1979).

4.5.1.2.2 Precipitación y Mineralización del Agua Subterránea. La interacción del agua subterránea con agua superficial juega además un papel importante en la composición química de ella. Cuando se da recarga por precipitación los procesos de dilución se evidencian en la disminución de la conductividad eléctrica debido a la mezcla de agua subterránea con agua lluvia, que normalmente tiene bajos contenidos de sales disueltas (Baena et al., 2009; Guggenmos et al., 2011).

Jian et al. (2018) usaron la conductividad y otros parámetros hidroquímicos para analizar la respuesta de manantiales en sistemas kársticos a eventos de precipitación. Hatipoglu-Bagci y Sazan (2014), usaron la CE y otros parámetros para determinar el origen de la recarga de agua subterránea en manantiales y estimar el periodo de precipitación que dio origen a esa recarga.

4.5.2 Hidrogramas de Manantiales

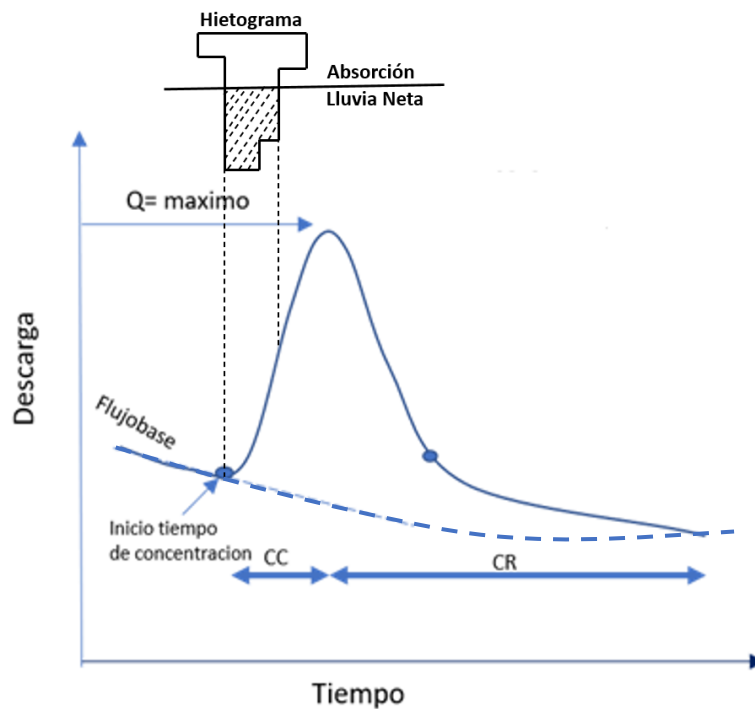
El caudal de descarga de un manantial refleja el resultado final de varios procesos que rigen la transformación de la precipitación y otras entradas de agua al área de drenaje del manantial en una respuesta única y localizada. En muchos casos el hidrograma de un manantial es muy parecido a los hidrogramas de corrientes superficiales, especialmente cuando los manantiales drenan acuíferos libres que responden rápidamente a la entrada de agua (Trček, y Zojer, 2010; Kresic y Bonacci, 2010).

Los cambios en el caudal en función del tiempo, observados en los hidrogramas son indicadores de cambios en el volumen de recarga de agua en el acuífero. Además, el análisis detallado del hidrograma provee información acerca de las características hidráulicas de un acuífero, tales como la capacidad de almacenamiento, la transmisividad y la cantidad de agua almacenada (Kresic y Bonacci, 2010).

De manera similar a los hidrogramas superficiales, el hidrograma de un manantial, producido como la respuesta a un evento de recarga por precipitación, es descrito y explicado en la Figura 4.6 con base en sus componentes, los cuales son un poco diferentes a los del hidrograma superficial en cuanto a los tiempos de respuesta al evento de precipitación.

Figura 4.6

Componentes del hidrograma de un manantial e Hietograma



Nota. CC: curva de concentración. CR: curva de recesión. Tomado y adaptado de Treck y Zojer (2010).

La curva de concentración (CC en la Figura 4.6) corresponde a la curva donde se empieza a notar el incremento de caudal hasta alcanzar el máximo valor. Este incremento se interpreta como un incremento en el almacenamiento del acuífero debido a la recarga por el evento de precipitación.

La curva de recesión (CR en la Figura 4.6) se toma desde el valor máximo hasta el punto de caudal mínimo, marcado como un valor extrapolado de la línea indicando el flujo base. La curva de recesión refleja la salida del acuífero del agua recargada por el evento de precipitación.

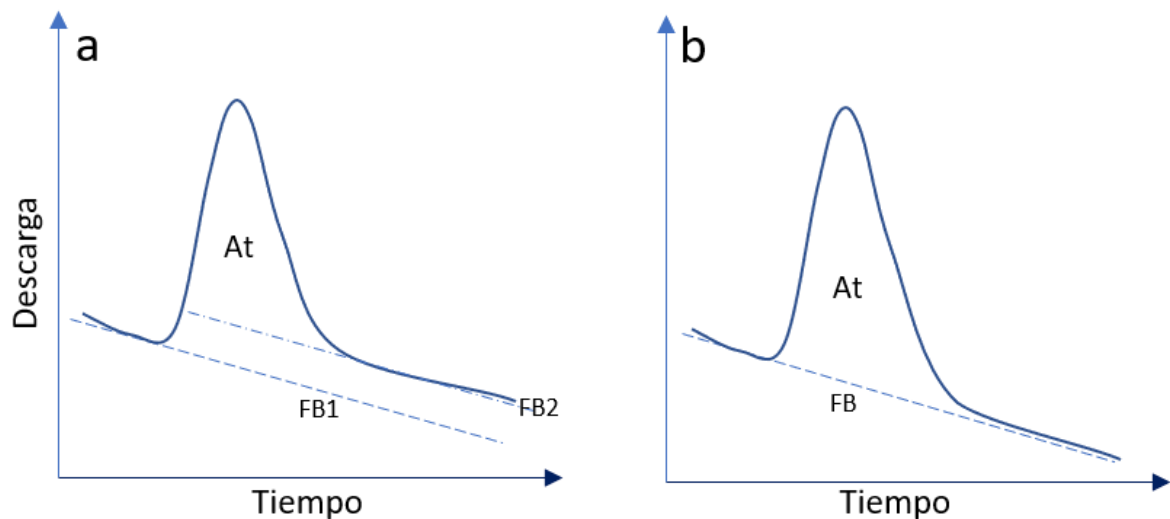
La forma de la curva del hidrograma depende del tamaño y forma del área de drenaje del manantial, así como de la magnitud e intensidad del evento de precipitación.

El área por debajo de la curva corresponde al volumen de agua que ha entrado al acuífero. El tiempo de concentración o de respuesta del manantial al evento de precipitación y la forma del hidrograma son buenos indicadores iniciales de la capacidad de recarga y la transmisividad del acuífero que alimenta el manantial (Kresic y Bonacci, 2010).

Una vez la respuesta a la recarga “temporal” por un evento de precipitación deja de ser observada en el hidrograma, dos cosas pueden ocurrir: que dicho episodio de recarga temporal incremente el volumen de agua almacenada, representado como un incremento en el valor del flujo base (Figura 4.7.a), o que el agua sea totalmente drenada fuera del acuífero y el evento no incremente de manera significativa el agua almacenada (Figura 4.7.b), es decir que el caudal vuelva a ajustarse a la tendencia del flujo base antes del evento (Kresic y Bonacci, 2010).

Figura 4.7

Posibles reacciones del acuífero a la entrada de agua según lo observado en el hidrograma de un manantial



Nota. a. Incremento en el almacenamiento. En el hidrograma se observa una elevación del flujo base (FB1 es la línea de flujo base antes del evento de recarga, FB2 es la línea después de

terminado el evento). b. Descarga del total de agua del evento, sin incremento en el almacenamiento. FB: Flujo base. At: Volumen de agua almacenado de manera temporal en el acuífero. Tomado y adaptado de Kresic y Bonacci (2010).

4.5.3 Relación de los Hidrogramas con la Precipitación

Para cada uno de los hidrogramas se realizó una descripción general del hidrograma obtenido para la duración del monitoreo, analizando de manera comparativa los cambios en el almacenamiento y su relación con la precipitación sucedida durante el tiempo del monitoreo, usando el hietograma de la precipitación diaria de la estación pluviométrica Niza dominio del IDEA. Seguidamente se identificaron picos de caudal (que generan hidrogramas individuales), asociados a eventos específicos de precipitación.

4.5.4 Caracterización de Hidrogramas Individuales y su Respuesta a la Precipitación

Los picos de caudal observados en el hidrograma fueron analizados para identificar los eventos que generaron “hidrogramas individuales completos” donde claramente se pueden observar las curvas de concentración y de recesión. Para estos hidrogramas individuales, los datos del evento de precipitación como duración, tiempo de concentración, total de la precipitación caída e intensidad fueron registrados. En el hidrograma los tiempos de concentración, valores del pico, % de incremento de caudal y duración de la recesión fueron tabulados para ser comparados con manantiales alimentados por el mismo acuífero u otros acuíferos. También fueron tabulados los eventos que sólo registraron picos, sin importar que no se observara claramente la curva de concentración o y/o recesión.

4.6 Análisis Multitemporal de Temperatura y Conductividad Eléctrica (CE) y su Relación con el Hidrograma

Las gráficas obtenidas para la temperatura fueron comparadas con los hidrogramas para determinar cómo la mineralización y la temperatura del agua de los diferentes acuíferos es afectada por los eventos de recarga (progresiva y de corta duración) y recesión.

4.7 Análisis de Curvas de Recesión y Determinación de Propiedades Hidráulicas

Hidrogramas individuales fueron seleccionados para obtener los coeficientes de recesión, usando la ecuación de Maillet (Kresic y Bonacci, 2010). Para ello se escogieron curvas que tuvieran una forma exponencial y que contaran con mínimo tres datos. Estas curvas fueron ajustadas a una curva exponencial obteniendo valores de α .

Las curvas de recesión contienen información acerca de las propiedades de almacenamiento y conductividad hidráulica del acuífero que alimenta el manantial como se evidencia en los estudios de Amit et al. (2002); Kresic y Bonacci (2010); Dewandel et al. (2003). El análisis matemático de estas curvas se hace a través del ajuste de los datos a curvas teóricas que describen de manera cuantitativa la disminución del caudal de descarga, y estima el volumen de agua drenado en intervalos específicos de tiempo. Una de las fórmulas matemáticas que comúnmente se usa para describir la curva de recesión es la ecuación de Maillet (Kresic y Bonacci, 2010).

La fórmula de Maillet representa la curva de recesión de un modelo análogo de un reservorio completamente saturado de agua, drenado a través de un tapón poroso (Dewandel et al., 2003). Este modelo genera una curva de tiempo-caudal que se ajusta a una función exponencial de la siguiente forma:

$$Q_t = Q_0 \times e^{-\alpha(t-t_0)}$$

En donde:

Q_0 : Caudal al inicio de la recesión

t_0 : tiempo al comienzo de la recesión

Q_t : Caudal de descarga al tiempo t

t : tiempo después del comienzo de la recesión

α : coeficiente de recesión

Las variables son las mismas de la ecuación de Boussinesq.

El valor del coeficiente de recesión depende de la transmisividad y el coeficiente del almacenamiento del acuífero.

Las relaciones entre las propiedades hidráulicas y geometría del acuífero, con el caudal inicial y α , fueron descritas por Dewandel et al. (2003)

$$Q_0 = \frac{\pi}{2} K H l \frac{h_m}{L} \text{ y } \alpha = \frac{\pi^2 K H}{4 \phi L^2}$$

En donde:

Q_0 : Es el caudal al comienzo de la recesión

L : Longitud del acuífero

H : Profundidad del acuífero por debajo del punto de surgencia del manantial

h_m : cabeza hidráulica inicial a una distancia L

l : Longitud del drenaje (para el cual se derivó el modelo)

K : Conductividad hidráulica del acuífero

ϕ : Porosidad efectiva (o coeficiente de almacenamiento para acuíferos libres)

Para efectos de interpretación, dados los valores bajos del coeficiente, el inverso de éste fue utilizado, siguiendo lo propuesto por Machuca (2012). Cuando el coeficiente se invierte, se obtiene el coeficiente C, cuyas unidades son días. Este coeficiente representa la capacidad de regulación del acuífero, en términos de su habilidad para recibir el agua de la precipitación y luego soltarla. En la literatura, altos valores de α y bajos de C normalmente se asocian a acuíferos con una baja capacidad de regulación, debido a su baja capacidad de almacenamiento y/o alta conductividad hidráulica. Los valores bajos de α y altos de C se dan en acuíferos de muy buena capacidad de regulación debido a su alta capacidad de almacenamiento y/o baja conductividad hidráulica (Machuca, 2012; Amit et al., 2002).

Los valores del coeficiente de recesión fueron usados además para calcular el volumen de agua almacenado en el acuífero al comienzo de la curva de recesión, usando la siguiente formula:

$$Vt = \frac{Qt}{\alpha}$$

En donde:

Qt: caudal de descarga a un tiempo t

Vt: Volumen almacenado a un tiempo t por encima del nivel de descarga
(elevación del manantial)

Este volumen, cuando se conoce en detalle la geometría del área de drenaje del manantial, puede ser usado para calcular la precipitación efectiva que entra a cada acuífero. En este estudio, considerando que no se puede determinar con exactitud el área de drenaje de estos manantiales, se usa para comparar la capacidad de

almacenamiento temporal (asociada a la conductividad hidráulica) entre las diferentes unidades acuíferas de la zona de estudio.

Transmisividad (T): Mide la capacidad de un acuífero para conducir o transmitir agua, esta es igual a la conductividad hidráulica (K) del acuífero multiplicada por el espesor saturado (b) de este (Heath, 1983).

$$T = Kb$$

Para Theis (1935) en Custodio y Llamas (1983), la transmisividad es el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada. Sus dimensiones son las de velocidad por longitud, y se expresa m²/día o cm²/seg.

Conductividad Hidráulica (K): Esta es uno de los factores que controlan el movimiento del agua subterránea en la ecuación de la ley de Darcy (Darcy, 1856). Depende del tamaño y la disposición de las aberturas de transmisión de agua (poros y fracturas) y de las características dinámicas del fluido (agua) como la viscosidad cinemática, la densidad y la fuerza del campo gravitacional (Heath, 1983).

Para Fetter (2018), la conductividad hidráulica K depende de la permeabilidad intrínseca y de las características del fluido, como se indica a continuación:

$$K = k_i \left(\frac{\gamma}{\mu} \right) = k_i \left(\frac{\rho g}{\mu} \right)$$

En donde:

k_i = permeabilidad intrínseca

γ = peso específico = densidad x fuerza debido a la gravedad

ρ = densidad (m/L^3)

g = fuerza debido a la gravedad (m/t^2)

μ = viscosidad dinámica (m/Lt)

Si la conductividad hidráulica es esencialmente la misma en cualquier área, se dice que el acuífero en esa área es homogéneo. Si, por el contrario, la conductividad hidráulica difiere de una parte del área a otra, se dice que el acuífero es heterogéneo (Heath, 1983).

Permeabilidad Intrínseca (k_i): Esta es representativa sólo de las propiedades del medio poroso, esencialmente en función del tamaño de las aberturas a través de las cuales se mueve el fluido (Fetter, 2018).

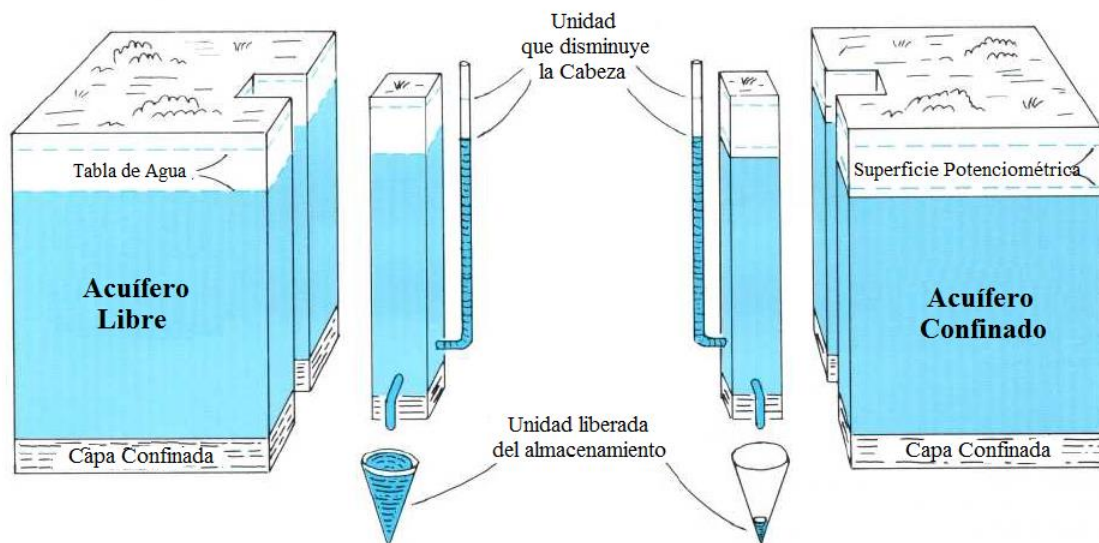
Coefficiente de Almacenamiento (S): Se define como el volumen de agua que un acuífero libera o toma en almacenamiento por unidad de superficie del acuífero por unidad de cambio de cabeza. El coeficiente de almacenamiento es una unidad sin dimensiones (Heath, 1983), como se muestra a continuación:

$$S = \frac{\text{volumen de agua}}{(\text{unidad de área})(\text{Unidad del cambio de cabeza})} = \frac{(m^3)}{(m^2)(m)} = \frac{m^3}{m^3}$$

El tamaño del coeficiente de almacenamiento depende de si el acuífero está confinado o no (Figura 4.8).

Figura 4.8

Coefficiente de almacenamiento en acuífero libre y confinado



Nota. Tomado y adaptado de Heath (1983).

4.8 Síntesis de la Información

Con el objetivo de consolidar los resultados del monitoreo, apoyados con los datos del inventario de puntos de agua, comparar las propiedades hidráulicas de las unidades acuíferas y crear una descripción general de las características más importantes de estas, se crearon tablas de clasificación de los caudales de descarga de cada unidad, se obtuvieron promedios de los tiempos de concentración, tiempos de recesión, coeficiente de recesión y volúmenes almacenados al inicio de la curva de recesión. También se incluyeron en esta síntesis los efectos que en estas propiedades puede tener la zona de falla.

Esta descripción general de las características más importantes de las unidades acuíferas de la zona de estudio se dividió en dos aspectos: productividad y propiedades hidráulicas, y propiedades hidroquímicas básicas.

4.8.1 Síntesis de Productividad y Propiedades Hidráulicas

Para efectos de comparación de comportamientos y análisis de tendencias:

Caudal. Se agruparon hidrogramas por unidad acuífera, debido a la diferencia de rangos.

Capacidad de Regulación (C). Los valores calculados para la de todas las curvas de recesión, se promediaron inicialmente por manantial y luego se sintetizaron en rangos por unidades acuíferas. Además, los valores obtenidos para los dos manantiales ubicados en la zona de falla se analizaron de manera individual para analizar el efecto de la falla en ellos.

Duración curvas de Recesión. Se generaron rangos y promedios por unidades acuíferas sin tener en cuenta los valores obtenidos para los dos manantiales ubicados en la zona de falla.

Volúmenes Almacenados al inicio de la Curva de Recesión. Para el cálculo, teniendo en cuenta que no todos los manantiales responden a los mismos eventos de precipitación y los volúmenes son tan variables, se seleccionaron cuatro eventos y se compararon las respuestas individuales de cada manantial.

Finalmente, basado en toda la información anterior, se definió y clasificó la productividad relativa de las unidades acuíferas de la zona.

4.8.2 Síntesis de Propiedades Hidroquímicas Básicas

Primero con el fin de comparar las propiedades hidroquímicas básicas entre las unidades acuíferas fueron calculados los promedios de temperatura, pH y conductividad eléctrica (CE) con los datos del inventario, y finalmente, con los datos del monitoreo se analizaron y describieron las respuestas y correlaciones con el hidrograma de los

parámetros multitemporales (temperatura y conductividad eléctrica) de cada unidad acuífera.

5. Revisión de Literatura para la Zona de Estudio

5.1 Información Regional

La información existente es dividida según dos aspectos:

Geología Regional: Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales (Corpocaldas, 2015). Este informe suministró información acerca de la geología y tectónica regional de la Ciudad de Manizales.

Hidrogeología Regional: Información acerca de unidades hidrogeológicas del país obtenida a partir del mapa hidrogeológico de Colombia (Servicio Geológico de Colombia, 2004).

5.2 Información Local

La información existente es dividida según dos aspectos:

5.2.1 Estudios Hidrográficos e Hidrogeológicos de la Microcuenca de la Quebrada El Perro

En este aspecto la información es escasa, se cuenta con el POMCA del Río Chinchiná (Corpocaldas, 2014), donde se realiza un análisis climatológico mediante la localización de estaciones con registros de precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar, radiación solar, evaporación, evapotranspiración, balance hidrológico, etc., de la cuenca del Río Chinchiná que estuvieran cercanas a la Quebrada El Perro desde 1981 al 2010. También, se obtiene información de análisis hidrológicos, físicos y morfológicos, curvas de caudales, etc., de la Quebrada El Perro.

Además, Bedoya (2013) realiza una evaluación diagnóstica integral y sistemática de la cuenca hidrográfica de la Quebrada El Perro “centrándose en encontrar la relación

causa-efecto de los procesos degradativos, a la luz de las interrelaciones: roca-suelo-grado y longitud de la pendiente-clima-planta-animal-infraestructura-factor humano”.

5.2.2 Estudios Geológicos y Estructurales del Área de Estudio y la Falla El Perro

Flórez (1986) realizó un estudio geomorfológico detallado del área Manizales-Chinchiná, en el cual resumió el modelado del paisaje de este sector, dividiendo su evolución en cuatro fases que comienzan en el Terciario inferior y terminan en el Pliocuaternario.

Naranjo y Ríos (1989) realizan una propuesta de la geología de Manizales y sus alrededores, distingüendo las unidades existentes en el área. Además, proponiendo “la Falla El Perro como el límite oriental de la Formación Manizales.”

Gómez (1990) define que la Falla El Perro podría ser el límite entre las Formaciones Quebradagrande y Abejorral. También Borrero y Naranjo (1990) en Borrero et al. (1995) proponen que la Formación Manizales y Casabianca en el Mioceno-Pleistoceno presenta un control estructural definido por la Falla El Perro.

Guzmán (1991) delimita el trazo de la Falla El Perro entre tramos: el tramo norte, descrito al norte de la Quebrada Minitas, tratándose de un elemento lineal individualizado, es decir, que no se anastomosa con lineamientos asociados, presenta un trazo ligeramente curvilíneo, de concavidad dirigida hacia el W, y su continuidad norte es cortada por la Falla Solferino de dirección NE ; el tramo central ubicado al sur de la misma quebrada describe un relieve más abrupto donde existen lineamientos curvilíneos cortos asociados a encizalladuras modeladas amplias; y en el tramo sur se presenta una bifurcación.

Echavarría et al. (1991) proponen para la Falla El Perro una bifurcación hacia el sur denominada Falla Albania, donde pone en contacto rocas metamórficas al E y rocas sedimentarias al W.

Aguirre et al. (1993) en su trabajo Modelo tridimensional de las formaciones superficiales de Manizales, dan una aproximación a la composición, posición geomorfológica y distribución tridimensional de las formaciones superficiales en Manizales. Concluyen que en su mayoría la Ciudad de Manizales está asentada sobre tres formaciones superficiales blandas de gran extensión: depósitos de caída piroclástica y rellenos, Formación Casabianca y Formación Manizales; depositadas sobre un conjunto rígido correspondiente a la Formación Quebradagrande. También establecen la profundidad de la tabla de agua, a partir de datos obtenidos mediante perforaciones consultadas, encontrándose dos niveles locales variables entre 5 y 10 m de profundidad presumiblemente asociados a las capas más porosas de la secuencia piroclástica.

Ríos y Sánchez (1996) anotan que la Falla El Perro presenta fuertes expresiones morfológicas como silletas amplias alineadas, facetas triangulares, control estructural rectilíneo de cauces importantes, valles rectilíneos asimétricos, escarpes en roca dura, discontinuidades altimétricas, hombreras y procesos erosivos especialmente en los sectores de Manizales y Salamina. Además, asocian “...como evidencia un escarpe de falla en un depósito coluvial (compuesto por material piroclástico como lapilli y ceniza), cuaternario reciente, escarpe con cara libre hacia el occidente de 22 m de largo por un metro de alto”.

Betancourth et al. (1998) presentan un estudio geológico, hidrogeológico y morfoetectónico de la cuenca del Río Chinchiná en donde si bien no abordan de forma

local la microcuenca de la Quebrada El Perro, esta información ha sido incluida a manera de carácter regional.

Betancourth et al. (1998) consideran que las características morfoneotectónicas para la Falla El Perro son: control rectilíneo de cauces, silletas, cambios altimétricos de cuchilla, hombreras, colinas deflectadas, cambios altimétricos de ladera y facetas triangulares. Además, enfatiza en el trazo de esta falla “...afecta depósitos coluviales recientes, indicando una componente vertical de carácter normal”, asocia indicios morfoneotectónicos contundentes en los barrios La Sultana y La Cumbre “donde se identifica deslizamientos asociados y agrietamiento de viviendas aledañas, anotando la separación de 50 cm de una vivienda con respecto a las demás”.

Montaña y Morales (2000) en su estudio Geológico-Estructural de la Falla El Perro, realizan un análisis estructural de esta falla e identifican estructuras como antiforales, pliegues apretados y asimétricos; y deducen que el control estructural de la Quebrada El Perro se debe principalmente a la foliación que muestra el Complejo Quebradagrande.

Herrera y López (2003) realizan un análisis estratigráfico de la Formación Manizales en donde concluyen que en ésta son comunes cuatro tipos de estratos sedimentarios coexistiendo a lo largo del registro sedimentario. Esta agrupación comprende depósitos de flujo piroclásticos, depósitos de lahares y de flujos de corriente, depósitos vulcanoclásticos que contienen un bajo contenido de ceniza y/o cristal en la matriz, y depósitos no volcánicos.

6. Geología

6.1 Marco Geológico Regional

La zona de estudio se encuentra situada en el sector oriente de la ciudad de Manizales, se trata de un área montañosa cuyo entorno

“lo constituyen unidades de roca que se han establecido en distintos períodos de tiempo y cuya historia está contenida dentro de la misma evolución de la Cordillera Central, en un ambiente muy dinámico, que involucró tanto el dominio oceánico como continental. Rocas sedimentarias depositadas en un mar Cretácico poco profundo, intercaladas con productos de vulcanismo submarino constituyen la base de la columna geológica regional en el área de estudio (Formación Quebrada Grande -Kqd-, gabros del Río Olivares -Kgb-); estas rocas se encuentran suprayacidas por rocas y depósitos continentales del Terciario Superior principalmente (Formaciones Casabianca -Tcsb- y Manizales -Tsmz-) y del Cuaternario que tuvieron origen en una actividad volcánica tanto intrusiva (Domo Sancancio -Qdsc- y Domo Tesorito -Qdt-) como extrusiva (Depósitos de Caída Piroclástica -Qcp-)...” (Corpocaldas, 2015).

En cuanto a la tectónica regional,

“el extremo NW de los Andes Suramericanos donde se encuentra Colombia, está afectado por la convergencia de las placas Suramericana, Caribe y Nazca, las cuales le imprimen características muy complejas al marco estructural de la zona, manifestándose en una importante sismicidad y con características de fallamiento activo transcurrente, con cambios en las tasas de movimiento y hasta en el sentido de desplazamiento en varias estructuras principales del mismo” (Corpocaldas, 2015).

6.1.1 Complejo Quebradagrande (Ksc)

Fue definido inicialmente por Botero (1963) como una formación compuesta en su aspecto sedimentario por esquistos silíceos negros, filitas grafitosas, lilitas, algunas cuarcitas, diques de andesita y dacita, con un espesor total para la sección tipo de 1270 m, de los cuales 455 son sedimentos y 815 rocas verdes. Posteriormente, Etayo et al. (1983) establece que esta formación se encuentra localizada en la parte occidental de la Cordillera Central, la cual tiene como límite oriental el sistema de Fallas Romeral, al occidente el sistema de fallas del Rio Cauca, al norte el contacto es una unión rumbodeslizante de las fallas del Rio Cauca y Romeral y al sur enfrentamiento con el Arco de Isla de Macuchi, del Ecuador. Sin embargo, Maya y Gonzáles (1995) en Naranjo y Ríos (1989) proponen el nombre de Complejo Quebradagrande, considerando una unidad de rango estratigráfico mayor como una unidad tectonoestratigráfica.

Otros autores que han descrito las rocas de esta unidad (Álvarez, 1983; Botero y González, 1983; Lozano et al., 1984) la dividen en dos miembros, uno volcánico y otro sedimentario.

6.1.1.1 Miembro Volcánico. Álvarez (1983) lo describe como una franja de roca larga y estrecha, compuesta por espilitas, basaltos y diabasas con características toleíticas, con menores cantidades de brechas de flujo y tobas, lo cual podría sugerir un ambiente de arco volcánico. Según Botero y González (1983), las rocas que conforman este miembro volcánico son de composición esencialmente básica y de afinidad toleítica, espilitas, diabasas, basaltos, andesitas y rocas piroclásticas como tobas bandeadas y brechas forman cuerpos alargados en dirección norte-sur y generalmente se encuentran en contacto fallado con las rocas del miembro sedimentario a lo largo de la falla Romeral.

A este miembro se le asigna una edad con base en fósiles encontrados en sedimentos intercalados de Aptiano-Albiano (González, 1980) correspondientes a la edad del magmatismo y radiométricamente desde el Cretácico temprano hasta el Cretácico tardío (Restrepo et al., 1982; Sánchez, 1992) las cuales corresponderían al metamorfismo de muy bajo grado.

6.1.1.2 Miembro Sedimentario. Según Botero y González (1983) se encuentra conformado en su mayor parte por lutitas carbonosas y arcillosas y en menor proporción grauvacas, areniscas feldespáticas, limolitas, liditas y localmente bancos de caliza negra con venas de cuarzo que cuando se encuentran relacionadas con zonas de falla, adquieren una textura esquistosa.

Lozano et al. (1984) describen los sedimentos de este miembro como estratos de grauvacas negras y grises de grano medio a fino, limolitas, lentes de calizas y cherts. Naranjo y Ríos (1989) determinan que este miembro litológicamente comprende chert negro, lutitas con sericita, limolitas negras, areniscas cuarzosas, areniscas conglomeráticas, grauvacas negras y grises, lentes de caliza, shales, arenitas líticas, conglomerados intraformacionales, con huellas de metamorfismo dinámico. Además “... presentan una diagénesis alta, con presencia de sericita y clorita, y en algunos sectores presenta aspecto esquistoso, con superficies carbonosas brillantes que les imprimen una aparente foliación...” común en las zonas de falla.

En general a este Complejo se le asignan edades obtenidas por medio de fósiles que van desde el Cretácico Inferior (Grosse, 1926) hasta el Cretácico Superior (Hall et al., 1972 en Naranjo y Ríos, 1989). González (1980) reporta edades del Hauteriviano medio hasta el Albiano, mientras que Hall et al. (1972) en Naranjo y Ríos (1989) reporta el hallazgo de microfósiles de edad Turoniano-Cenomaniano. Moreno et al. (1993) y Naranjo y Ríos (1989), asignan una edad de Aptiano tardío.

6.1.2 Formación Manizales (Tsmz)

Inicialmente, Flórez (1986) propuso informalmente el nombre de Formación Manizales como: “una acumulación volcanodetrítica de piedemonte”, de edad Mioceno y cuyas facies volcánicas representan la primera manifestación de vulcanismo Cenozoico del eje de la Cordillera Central (González, 1980).

Naranjo y Ríos (1989) reconocen la Formación Manizales como “...un conjunto de rocas sedimentarias volcanogénicas derivadas del complejo volcánico Ruiz-Tolima depositadas en un intervalo de tiempo de 8 a 4 Ma.”. Estos autores usaron la aparición de los primeros fragmentos de pómez como punto de correlación entre dos secciones (el escarpe de Chipre y el Río Chinchiná), cuya unión consideraron como localidad tipo, para establecer un espesor promedio total de 260 m. Además, justifican la base de esta unidad mediante una característica notable, “la ausencia absoluta de material volcánico tanto en los fragmentos como en la matriz” al tratarse de, “una terraza aluvial de unos 30 m de espesor que descansa discordantemente sobre la Formación Quebradagrande, y que litológicamente se caracteriza por ser un conglomerado poligomítico, con matriz de arcilla, limo, arena y grava...”; así mismo, registran un contacto erosivo entre tal nivel conglomerático y “una espesa secuencia de rocas volcanoclásticas con estratificación masiva y de color blanco”. Además, anotan que el límite oriental de esta formación está dado por la Falla El Perro.

Echavarría et al. (1991) clasifican la Formación Manizales como un flujo volcanosedimentario conformado por conglomerados polimícticos matriz soportados, presentando un bajo grado de consolidación, ausencia de estructuras sedimentarias y una matriz limo-arenosa con avanzado estado de alteración.

Montaña y Morales (2000) indican que: “la Formación Manizales aflora en la Quebrada El Perro, hacia el flanco W del Bosque Popular”, observándose como un conglomerado matriz soportado con líticos de composición metamórfica e ígnea, y una matriz arenosa con presencia de minerales como cuarzo, biotita, plagioclasa, moscovita, feldespatos, hornblenda y algunos líticos no especificados.

Herrera y López (2003) realizan un análisis estratigráfico de la Formación Manizales teniendo en cuenta las ideas de Smith (1991), aunque con algunas modificaciones, concluyen que “en la Formación Manizales son comunes cuatro tipos de estratos sedimentarios coexistiendo a lo largo del registro sedimentario”. Esta agrupación comprende depósitos de flujo piroclásticos, depósitos de lahares y de flujos de corriente, depósitos volcanoclásticos que contienen un bajo contenido de ceniza y/o cristal en la matriz, y depósitos no volcánicos.

6.1.3 Formación Casabianca (Tscb)

Según Thouret et al. (1985) en Naranjo y Ríos (1989), la reactivación de la actividad volcánica del Plioceno temprano con ciclos de producción y distribución de detritos volcánicos que se prolongan hasta el Pleistoceno, dieron origen a la Formación Casabianca.

Naranjo y Ríos (1989) denominaron la formación como “un conjunto de sedimentos volcanogénicos de grano grueso, y en menor proporción, ignimbritas, tobas y sedimentos volcánicos retrabajados de grano fino, producidos como resultado de una gran agradación en cauces fluviales inducidos por el vulcanismo de la cadena Ruiz-Cerro Bravo.”. Además, atribuyen a esta secuencia volcanoclástica un espesor promedio de 50 m y una distribución areal restringida al SE y W de Manizales donde todos los afloramientos de la Formación Casabianca están meteorizados en alto grado. Esto

último coincidiendo con los niveles muy meteorizados de color rojizo reportados por Montaña y Morales (2000).

Echavarría et al. (1991) describen esta formación como sedimentos volcanogénicos de grano grueso, constituidos por conglomerados matriz soportados y mal seleccionados. Además, constituyen como principal característica de esta unidad en la ciudad de Manizales, un alto grado de meteorización tanto en la matriz como en los clastos.

6.1.4 Depósitos de Caída Piroclástica (Qcp)

Según Naranjo y Ríos (1989) estos depósitos “representan las últimas manifestaciones de actividad volcánica explosiva del complejo volcánico Ruiz-Tolima. En la zona de Manizales hay por lo menos 7 erupciones piroclásticas registradas y sus depósitos se presentan en forma de mantos delgados que cubren las demás litologías; presentan un espesor variable entre 10 y 20 m y son constantes en toda la zona. Están compuestos de fragmentos de pómez y escorias de composición dacítica, así como de fragmentos de rocas (dacitas y andesitas porfídicas), que forman niveles de ceniza y lapilli. La forma de presentación y el hecho de estar siguiendo la paleotopografía existente demuestra que las erupciones responsables de tales depósitos son recientes”.

Aguirre y Dunóyer (1997) en Herrera y López (2003), describen intercalaciones de capas de tefra de caída compuestas de ceniza y lapilli pumítico, depositadas en un intervalo de tiempo (determinado a partir de dataciones ^{14}C) desde antes de 39000 años A.P hasta menos de 5000 años A.P.

González (2001) define que estos depósitos están compuestos por cenizas, lapilli pumítico y en ocasiones bombas volcánicas. Localmente aparecen intercalaciones de

niveles arcillosos entre la secuencia ceniza-lapilli lo que indica la depositación en un medio acuoso. Este mismo autor asigna una edad de Pleistoceno tardío-Holoceno.

6.2 Tectónica Regional

La ciudad de Manizales

“se encuentra afectada tectónicamente por dos sistemas principales de fallas, el de Romeral y el de Palestina, con tendencias dominantes Norte-Sur y Noreste, respectivamente, con algunas desviaciones al NW-NE, los cuales poseen una gran continuidad regional e imprimen fuertes rasgos de tectonismo en las rocas del área, evidenciados por un gran fracturamiento, diaclasamiento y levantamiento del basamento rocoso (Formación Quebradagrande), lo que tiene alta incidencia en los movimientos de masa presenten en la zona.

Se presentan dos sistemas de lineamientos con tendencias predominantes Este-Oeste, Noreste y Noroeste, con una continuidad menor en sus trazos y una expresión geomorfológica menos relevante; debe entenderse que estos lineamientos acentúan su expresión geomorfológica dependiendo de los agentes, condiciones y factores erosivos, por lo cual la menor expresión en el paisaje de dichos lineamientos no implica necesariamente que éstos sean menos importantes” (Corpocaldas, 2015).

Las fallas más importantes identificadas para Manizales son: Falla Chipre, Falla Manizales-Aranzazu, Falla El Cementerio, Falla Solferino I y II, Falla El Perro, Falla Romeral, Falla San Jerónimo, Falla Samaná Sur y lineamientos estructurales.

Falla Chipre: Hacia el oeste de la ciudad de Manizales, se presenta un escarpe de falla de 200 m el cual afecta los depósitos de la Formación Manizales. Esta falla es una estructura dispuesta en dirección N-S sin embargo al norte se quiebra hacia el NW (Aguirre et. al., 1993).

Falla Manizales-Aranzazu: Naranjo y Ríos (1989) y Echavarría et. al. (1991) la cartografían como la Falla Manizales, la cual se caracteriza como una estructura dispuesta N-S que afecta la Formación Manizales y controla el cauce de las Quebradas Marmato al sur y Matadero al norte. Nombrada posteriormente por Betancourth et. al. (1998) como Falla Manizales-Aranzazu. Además, Franco y Pietro (1992) en Corpocaldas (2015) definen esta falla de tipo normal de acuerdo a las microevidencias estructurales encontradas.

Falla El Cementerio: Esta falla controla los cauces de las Quebradas Única y Solferino hacia el sector norte y presenta una dirección SW-NE (Aguirre et. al., 1993).
Falla Solferino I y II: Está conformada por dos trazos en dirección N-S paralelos entre sí que a su vez son interceptadas y desplazadas por un sistema de fallas E-W (Aguirre et. al., 1993).

Falla El Perro: Naranjo y Ríos (1989) proponen: “la Falla El Perro como el límite oriental de la Formación Manizales.”. Esta controla linealmente el cauce de la Quebrada El Perro en dirección N-S afectando rocas del Complejo Quebradagrande. Se evidencia geomorfológicamente mediante un conjunto de silletas y facetas triangulares alineadas hacia el Norte (Betancourth et. al., 1998).

Falla Romeral: Fue definida por Grosse (1926) como una falla de tipo inversa. Esta ejerce un control estructural de los cauces en las Quebradas de La Quebra, El Rosario y Río Guacaica (Betancourth et. al., 1998).

Falla San Jerónimo: Pertenece al sistema de Fallas Romeral y presenta una dirección aproximada N 14° E. Hacia el sector del Barrio La Alhambra al NE de la ciudad de Manizales, se trunca con la Falla El Perro (Betancourth et. al., 1998).

Falla Samaná Sur: Hace parte del sistema de Fallas Romeral y fue descrita por Gonzales (1980) como una estructura que se ubica al este de Manizales y cruza en sentido NE el Barrio La Enea y el sector de Maltería.

Lineamientos estructurales: Estos se identifican en sentido NE y NW y son debido a la complejidad tectónica sobre la cual se encuentra la ciudad de Manizales (Corpocaldas, 2015).

6.3 Geología Local

Las unidades aflorantes en la zona de estudio corresponden a miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande, Formación Manizales, Formación Casabianca y Depósitos cuaternarios (Depósitos de caída piroclástica, Depósitos vulcanosedimentarios y Depósitos aluviales), las cuales se describen a continuación. Los resultados de la cartografía geológica se presentan en el Anexo A (Mapa Geológico).

6.3.1 Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande (Ksc)

Localización. Este miembro aflora en la parte superior y media de la microcuenca, asociándose al drenaje principal y la mayoría de los tributarios de esta zona.

Litología. Se compone de forma general de lodolitas grises y negras violáceas. En algunos sectores en la parte media y alta de la quebrada sin seguir una localización

específica se encuentra interestratificación con orientación NE de lodolitas grises que presentan recristalización y silisificación, y lodolitas negras violáceas con alto contenido de materia orgánica (Figura 6.1), en paquetes con espesores de pocos centímetros, presentando una dirección de foliación oblicua a la estratificación lo cual podría indicar un carácter metasedimentario de la roca debido a un metamorfismo impuesto de bajo grado. Además, las capas de lodolitas grises se encuentran también onduladas y cuniformes, indicando milonitización o deformación sobreimpuesta.

Figura 6.1

Lodolitas negras del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande



Nota. Lodolitas negras violáceas con alto contenido de materia orgánica, en paquetes con espesores de pocos centímetros estratificadas N5E/ 25NW, altamente diaclasadas. Ubicación: 845298.6 E 1050624.3 N. Altura: 2136.2 m.s.n.m.

También, en algunos sectores de la parte media y alta de la quebrada sin seguir una localización específica, sólo se presenta interestratificación de lodolitas grises y silíceas de aproximadamente 1 a 2 cm de espesor, en paquetes que superan los 30 cm, altamente diaclasadas y con metamorfismo dinámico sobreimpuesto evidenciado por capas crenuladas, y capas de 30 cm de lodolitas silíceas sin estratificación, menos diaclasadas y de forma masiva indicando que estas se comportan reológicamente diferente (Figura 6.2).

Figura 6.2

Lodolitas grises del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande



Nota. Interestratificación de 1 a 2 cm de espesor de lodolitas grises y silíceas en paquetes que no superan los 15 cm, estratificadas con capas de 30 cm de lodolitas silíceas masivas.

Estratificación: N45E/42SE. Ubicación: 845599.4 E 1050364.7 N. Altura: 2131.7 m.s.n.m.

Al igual que las lodolitas grises mencionadas anteriormente, las lodolitas negras se presentan de forma similar y por separado como paquetes de lodolitas masivas con espesores de hasta 15 cm, poco diaclasadas, intercaladas con paquetes de lodolita negra estratificada con espesores de pocos centímetros y altamente diaclasadas. Estas últimas pueden llegar a presentar un grado de humedad lo cual imprime cierta plasticidad al material y generan también junto a las costras de hierro, tonos amarillentos en la roca.

Límites Verticales. Este miembro es el basamento de la zona de estudio, y se encuentra suprayacido en contacto discordante por los depósitos cuaternarios hacia la parte superior y media de la microcuenca, y suprayacido en contacto discordante por la Formación Manizales hacia la parte inferior en inmediaciones del Río Chinchiná.

6.3.2 Formación Manizales (Tsmz)

Localización. Aflora hacia la parte baja de la microcuenca en inmediaciones del bosque popular y cercana a la desembocadura del Río Chinchiná.

Litología. Compuesta hacia la parte inferior por conglomerados matriz soportados (Figura 6.3), que poseen en general alto grado de compactación, una matriz arcillosa con coloraciones pardas a grisáceas amarillentas, compuesta de cristales de cuarzo, hornblenda, biotita y cantidades variables de vidrio volcánico alterado, embebiendo clastos tamaño guijo a bloque, subangulares a subredondeados, de alta a mediana esfericidad, de diferentes composiciones como lodolitas negras, esquistos grises sericíticos, basaltos, cuarzo lechoso y otras composiciones que no se logran identificar debido al grado de meteorización. Hacia la parte superior, en contacto concordante, se encuentran arenitas masivas con aporte volcanoclástico (Figura 6.4), diaclasadas, con moderada a alta compactación, con espesores que varían de 50 cm a 6 m, con coloraciones originalmente grisáceas que se enmascaran por un color pardo

rojizo por efectos de meteorización. Estas arenitas están compuestas por cuarzo, biotita, hornblenda y vidrio volcánico alterado, con tamaño de grano ceniza, de redondeados a angulares, de moderado a bien seleccionados, y con alta esfericidad a excepción de la biotita que presenta baja esfericidad. A su vez estas arenitas masivas se presentan intercaladas con arenitas que presentan laminación plano paralela de igual composición.

Figura 6.3

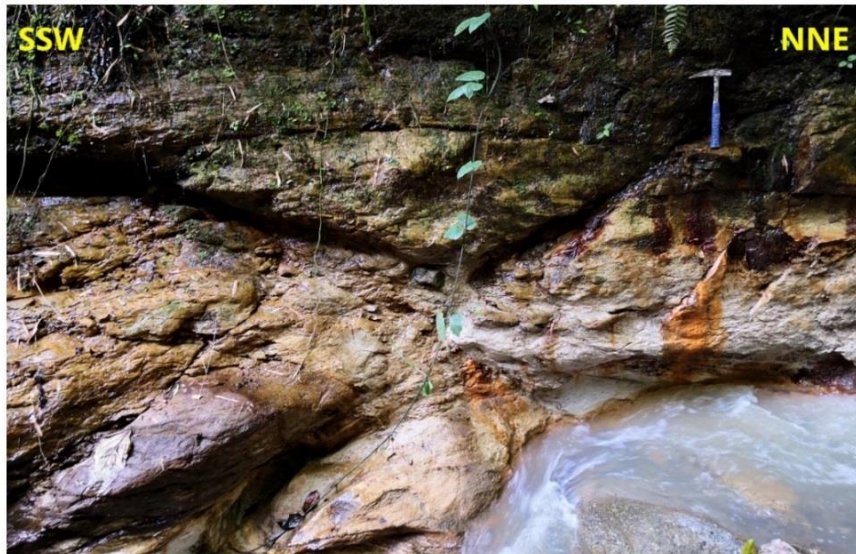
Parte inferior de la Formación Manizales



Nota. Conglomerado matriz soportado. Ubicación: 844525.8 E 1048991.3 N. Altura: 2009.3 m.s.n.m.

Figura 6.4

Parte superior de la Formación Manizales



Nota. Arenitas masivas y diaclasadas con aporte volcánico-clástico. Ubicación: 844872.2 E 1049116.9 N. Altura: 1993.2 m.s.n.m.

Límites Verticales. Se encuentra infrayacida en contacto discordante por el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande, y suprayacida en contacto concordante por los Depósitos de caída piroclástica.

6.3.3 Depósitos de Caída Piroclástica (Qcp)

Esta unidad se encuentra aflorando a lo largo de toda la microcuenca; debido a las diferencias litológicas y sus implicaciones en la hidrogeología, esta unidad fue dividida en dos partes, las cuales serán descritas a continuación:

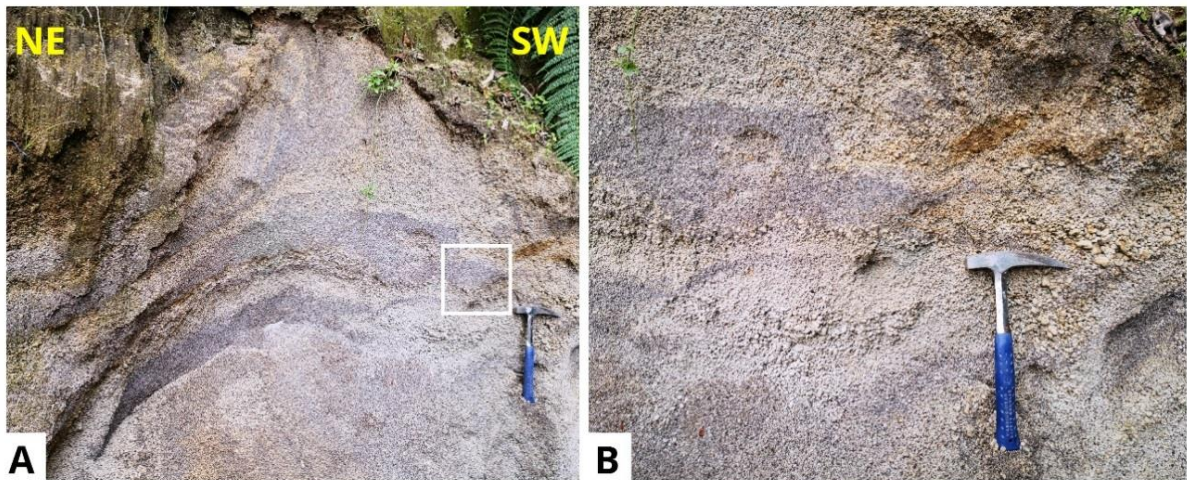
6.3.3.1 Depósitos de Caída Piroclástica – Parte Superior (Qcp-s).

Litología. Depósito con tamaño de grano lapilli, bien seleccionado, fragmentos de origen volcánico con cuarzo, pómez y hornblenda juntos de redondeados a subredondeados con alta esfericidad, también clastos de cuarzoarenita, fragmentos de

cuarzo, fragmentos de hornblenda, y clastos de cuarzo y hornblenda juntos, algunos con una tonalidad rojiza por efectos de oxidación (Figura 6.5 y Figura 6.6.b).

Figura 6.5

Parte superior de los Depósitos de caída piroclástica



Nota. A y B. Depósito de caída piroclástica con tamaño de grano lapilli. Ubicación: 845482.9 E 1050792.1 N Altura: 2216.1 m.s.n.m.

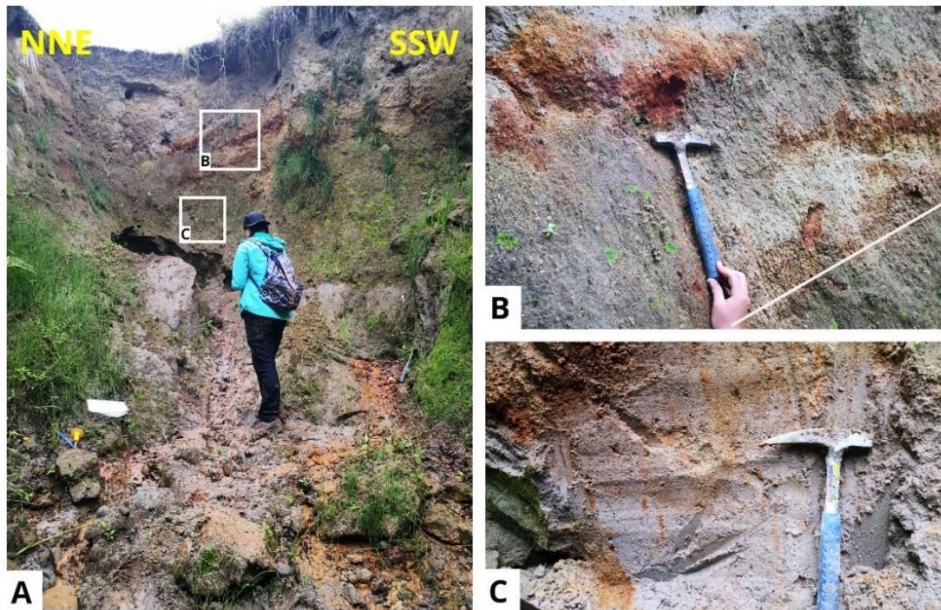
Límites Verticales. Este depósito se encuentra infrayacido en contacto concordante por la parte inferior de los Depósitos de caída piroclástica y suprayacido en contacto concordante por pequeños niveles de suelo.

6.3.3.2 Depósitos de Caída Piroclástica – Parte Inferior (Qcp-i).

Litología. Depósito grisáceo con tamaño de grano ceniza, fragmentos de origen volcánico con cuarzo, hornblenda, biotita y vidrio volcánico alterado formando una matriz arcillosa, subredondeados a subangulares, con alta esfericidad a excepción de la biotita, y moderadamente seleccionados (Figura 6.6.c).

Figura 6.6

Depósitos de caída piroclástica



Nota. A. Depósito de caída piroclástica. B. Parte superior de los Depósitos de caída con tamaño de grano lapilli. C. Parte inferior de los Depósitos de caída con tamaño de grano ceniza.

Ubicación: 845254.5 E 1049845.8 N. Altura: 2057.1 m.s.n.m.

Límites Verticales. Este depósito se encuentra infrayaciendo en contacto concordante la parte superior de los Depósitos de caída piroclástica y suprayaciendo en contacto discordante el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande en la parte superior y media de la microcuenca, y suprayaciendo en contacto concordante la Formación Manizales hacia la parte inferior de la microcuenca.

6.3.4 Depósitos Aluviales (*Qal*)

Localización. Estos depósitos afloran a lo largo del cauce principal de la Quebrada El Perro.

Litología. Están compuestos por gravas y arenas de origen fluviotorrencial (Figura 6.7) con clastos angulares a redondeados, tamaños de guijo a bloque, mal

seleccionados, compuestos por lodolitas grises y negras, cuarzo, lodolitas recristalizadas y roca posiblemente hipohabisal; matriz tamaño arena media a fina con presencia de minerales de cuarzo, hornblenda y biotita.

Figura 6.7

Depósito aluvial de gravas y arenas



Nota. Ubicación: 845262.8 E 1050084 N. Altura: 2093.6 m.s.n.m.

Límites Verticales. Se encuentran suprayaciendo y en contacto discordante con las unidades anteriormente descritas.

De manera localizada hacia parte intermedia y baja de la microcuenca se presenta de forma discordante un depósito vulcanosedimentario (Qvs), compuesto por lentes de gravas y arenas de tamaño guijo a guijarro, de redondeados a subangulares, pobremente seleccionados, con clastos de lodolitas y cuarzo. Embebidos en una matriz

tamaño ceniza, compuesta por cuarzo, hornblenda y vidrio volcánico alterado (Figura 6.8).

Figura 6.8

Depósito vulcanosedimentario



Nota. Lentes de gravas y arenas embebidos en una matriz tamaño ceniza. Ubicación: 845274.4 E 1049786.8 N. Altura: 2088 m.s.n.m.

6.4 Geología Estructural

En el área de estudio se identificaron dos fallas: La Falla El Perro ha sido cartografiada en estudios anteriores por Naranjo y Ríos (1989), Guzmán (1991), Echavarría et al. (1991), Ríos y Sánchez (1996) y Betancourth et al. (1998). La otra falla no ha sido reportada en la bibliografía y para este estudio se nombra como Falla 2. Estas

dos se toman de manera separada debido a las diferencias de longitudes y orientaciones, además, no se tienen elementos suficientes para indicar que la falla de menor longitud se trate de una ramificación de la falla principal (El Perro). Adicionalmente fueron mapeados 38 lineamientos.

6.4.1 Falla El Perro

Naranjo y Ríos (1989) y Echavarría et al. (1991) definen la Falla El Perro como tipo inversa, mientras que Guzmán (1991), Ríos y Sánchez (1996) y Betancourth et al. (1998) la definen de tipo normal. En este estudio no se encontraron elementos suficientes para definir este carácter, sin embargo, teniendo en cuenta áreas de deformación y elementos geomorfológicos, se logra trazar la falla para la zona de la Quebrada El Perro (Figura 6.12), con una longitud de 1401 m y orientación N27E.

Las expresiones geomorfológicas evidenciadas en campo que permitieron trazar la Falla El Perro, son silletas y hombreras de falla (Figura 6.9). Esta falla afecta principalmente a las lodolitas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande hacia la parte noreste de la microcuenca.

Figura 6.9

Expresiones geomorfológicas del área de estudio



Nota. Líneas punteadas blancas señalan hombreras de falla observadas en la zona de estudio.

6.4.2 Falla 2

Esta falla presenta una longitud de 904.58 m y orientación N62W (Figura 6.11). Afecta principalmente a las lodolitas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande hacia la parte noroeste de la microcuenca, en sectores asociados a la zona de falla, donde las lodolitas presentan verticalización de sus estratos (Figura 6.10). y deformación evidenciada mediante textura augen y mini pliegues (Figura 6.11).

Figura 6.10

Estratos verticalizados de lodolitas



Nota. Ubicación: 845249 E 1050540 N. Altura: 2150 m.s.n.m.

Figura 6.11

Deformación en las lodolitas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande



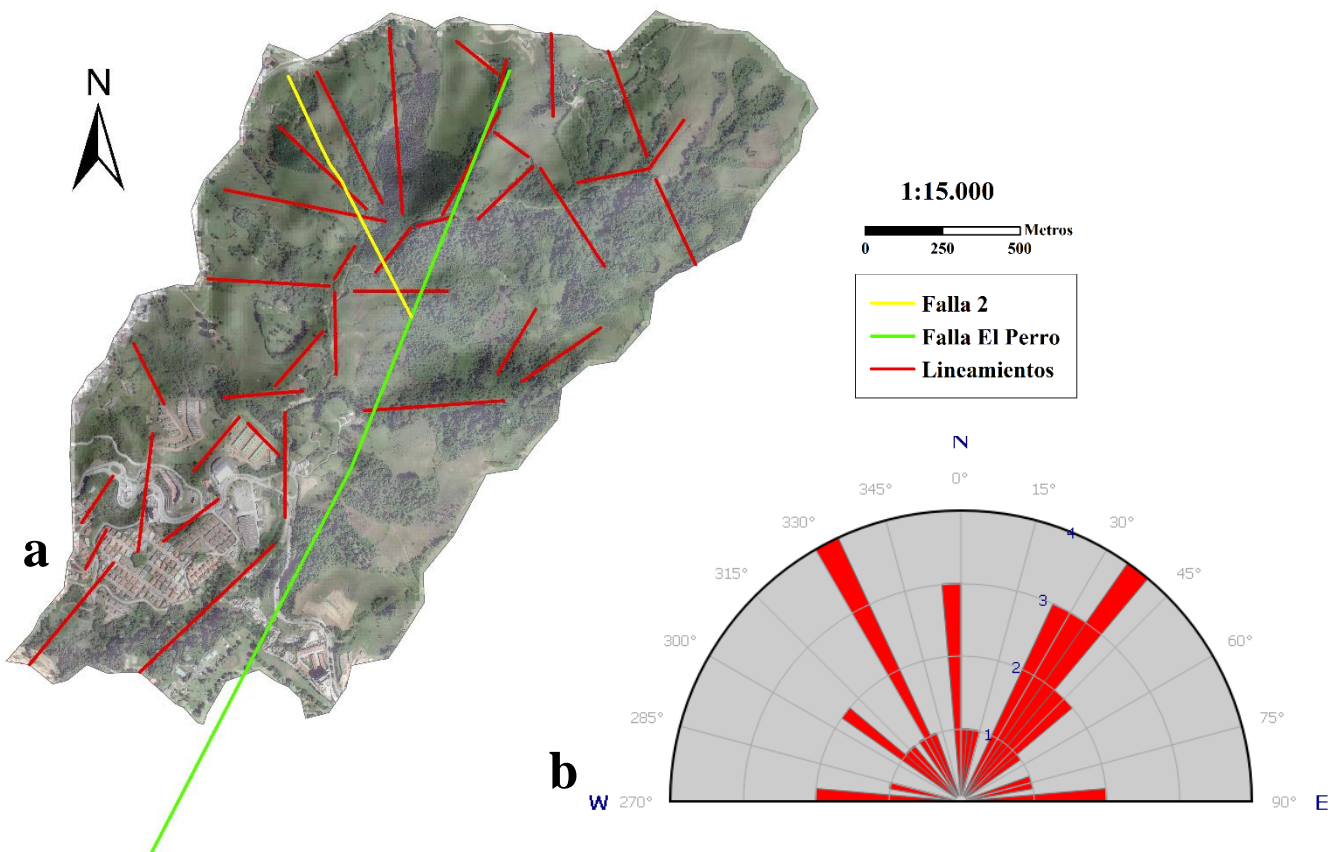
Nota. Ubicación: 845200 E 1050540 N. Altura: 2131.4 m.s.n.m.

6.4.3 Lineamientos

Los lineamientos se encuentran distribuidos a lo largo de toda la microcuenca, con longitudes entre 119 y 602 m, un promedio de 285 m, y grandes variaciones en las direcciones (Figura 6.12). Hacia la parte norte de la microcuenca se observa mayor concentración de lineamientos con distancias mayores a 250 m. En la Figura 6.13 se presentan graficados en un diagrama rosa los lineamientos encontrados en la zona de estudio.

Figura 6.12

Ubicación Lineamientos y trazas de la Falla El Perro y la Falla 2 (a) y Diagrama rosa de lineamientos en la microcuenca de la Quebrada El Perro (b)



Nota. Diagrama rosa creado en GeoRose (Rose Diagram and Stereonet Plot Program) descargado de <http://www.yongtechnology.com/georose/>.

7. Hidrología Superficial

7.1 Hidrología y Climatología

El Municipio de Manizales hace parte del sistema hídrico de la subcuenca del Río Chinchiná, el cual a su vez pertenece a la cuenca del Río Cauca. El Río Chinchiná atraviesa todo el municipio de este a oeste y sus principales afluentes son las Quebradas Olivares y Manizales, esta primera nace a 2700 m.s.n.m, en inmediaciones del Alto del Zancudo y el Alto de La Coca, y se encuentra al norte del municipio con el Río Guacaica; por otra parte, la Quebrada Manizales nace a 3600 m.s.n.m y fluye por el sureste, pasando por barrios como La Enea, San Marcel y Lusitania (Corpocaldas, 2015). Al Oriente de la ciudad, desde el sector conocido como Cerro de Oro hasta el Bosque popular, se pone de manifiesto el nacimiento a los 2400 m.s.n.m aproximadamente de la microcuenca de la Quebrada El Perro (principal objetivo de este estudio) la cual vierte sus aguas al Río Chinchiná.

7.1.1 Temperatura

El clima en la subcuenca del Río Chinchiná es típicamente (ínter) tropical, caracterizado por pequeñas fluctuaciones de la temperatura interanual, pero grandes fluctuaciones diarias y una distribución bimodal de la lluvia durante el año. Esta área está influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZIT) y por el carácter montañoso de la región (WITTE, 1995 en Corpocaldas, 2014). La temperatura está determinada por la altitud, por ello existen importantes disimetrías de orden espacial y temporal; así, la temperatura mínima en la cuenca del Río Chinchiná está por debajo de -3 °C en la zona alta y la temperatura máxima, registrada en Santágueda, es de 29.2 °C a 1000 m. Por otro lado, se registran como los meses más fríos a septiembre, octubre,

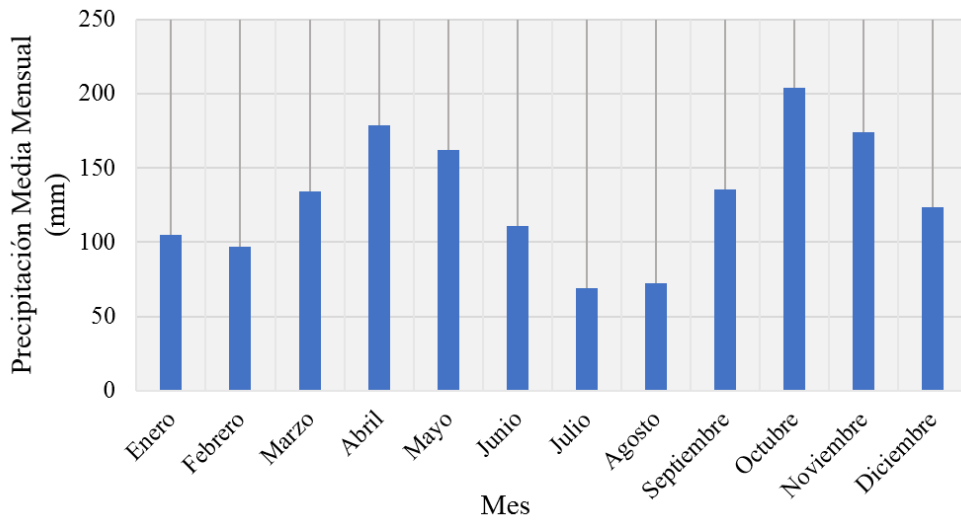
noviembre y diciembre, mientras los meses más cálidos son febrero, marzo, abril y mayo (Corpocaldas, 2001 en Corpocaldas, 2014). En la cuenca del Río Chinchiná hay variedades de climas: para el caso de Manizales al estar ubicado en la cuenca media, predomina el clima frío húmedo y muy húmedo, entre los 2000 y 3000 m.s.n.m, las temperaturas oscilan entre 12 y 18 °C y la precipitación está entre 1000 y 4000 mm/año (INGESAM, 2005).

7.1.2 Precipitación

La precipitación media mensual de la microcuenca se obtuvo utilizando los datos de la estación Aeropuerto La Nubia (Corpocaldas-IDEA U.N., 2013, en Corpocaldas, 2014), para el periodo de 1981 a 2010, ya que, aunque la estación Niza es más cercana, esta no cuenta con información de suficientes años. En total la microcuenca recibe 1565.3 mm/año, con valores entre 69.2 mm/mes y 204 mm/mes, como se indica en la Figura 7.1. Para la microcuenca, como para toda la región en general, existen dos periodos lluviosos: el primero de febrero a julio, con el máximo de precipitación en abril de 178.9 mm/mes y el segundo de agosto a enero, con el máximo de precipitación en octubre, de 204mm/mes. Los periodos menos lluviosos se dan entre enero y febrero, con un mínimo de 96.6 mm/mes, y julio a agosto, con un mínimo de 69.2 mm/mes.

Figura 7.1

Precipitación promedio mensual de la estación Aeropuerto La Nubia (1981-2010)



Nota. Información extraída del Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del Río Chinchiná en el departamento de Caldas (POMCA), Fase de diagnóstico-Tomo I, 2014. http://www.corpocaldas.gov.co/dynamic_page.aspx?p=1508

7.1.3 Evapotranspiración

De acuerdo a la modelación hidrogeológica de Corpocaldas-IDEA U.N., 2013 (en Corpocaldas, 2014), los valores de evapotranspiración potencial mensual y potencial anual para el periodo 1981-2010, calculadas por el método Thornwaite están entre 80-90mm y 1000-1100 mm respectivamente, para el caso de la microcuenca de La Quebrada El Perro.

7.1.4 Escorrentía Superficial

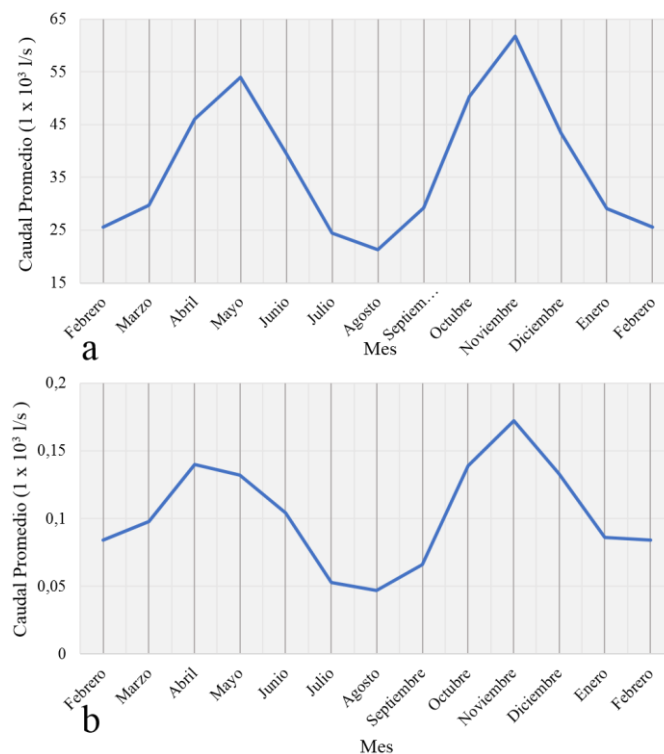
Los datos de escorrentía de la microcuenca fueron obtenidos del estudio Corpocaldas-IDEA U.N., 2013 (en Corpocaldas, 2014) para los años 1981-2010. En dicho estudio, se estimaron los caudales en las subcuencas del Río Chinchiná,

empleando el modelo TETIS en su versión agregada y se presentaron resultados que consolidan el análisis de estadística descriptiva de las series simuladas.

El hidrograma modelado de la Quebrada El Perro es similar en forma al hidrograma del Río Chinchiná como se indica en la Figura 7.2. Los caudales mensuales calculados para la microcuenca se encuentran entre 0.047×10^3 l/s y 0.172×10^3 l/s, los máximos de caudal se dan en el mes de abril de 0.14×10^3 l/s y otro en el mes de noviembre de 0.172×10^3 l/s. Estos máximos coinciden con los dos periodos lluviosos de la cuenca y conforman dos hidrogramas individuales, que serán descritos y analizados a continuación.

Figura 7.2

Hidrogramas de caudal promedio mensual (1981-2010) del Río Chinchiná (a) y la Quebrada El Perro (b)



Nota. Información extraída del Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del Río Chinchiná en el departamento de Caldas (POMCA), Fase de diagnóstico-Tomo I, 2014. http://www.corpocaldas.gov.co/dynamic_page.aspx?p=1508

7.2 Características del Hidrograma General y Separación de Flujos

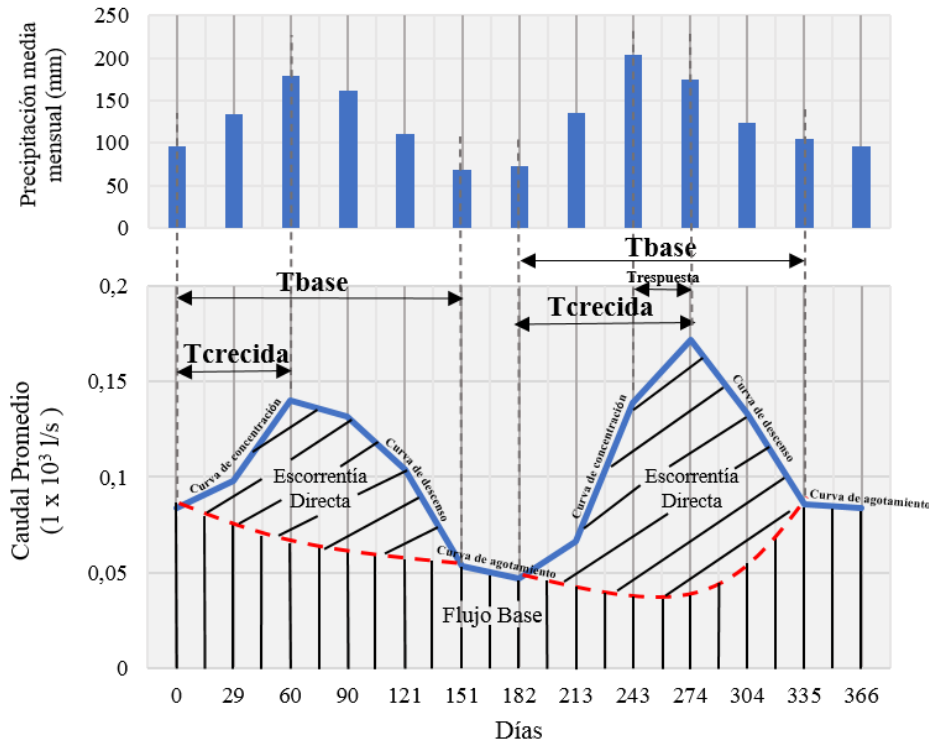
Como se discutió en la metodología, las relaciones entre la precipitación y la escorrentía se hacen a través de los hidrogramas en donde se analiza la respuesta del caudal a la precipitación, en términos de la duración del tiempo de concentración, duración de las curvas de descenso, de agotamiento y la separación de flujos.

La separación de los componentes del hidrograma por tipo de contribución indica cuál parte del caudal proviene de la precipitación (escorrentía directa) y cuál proviene del flujo base (Figura 7.3). Para esto, se hizo uso del método gráfico propuesto por Sánchez (2017), en donde se prolongó la curva de agotamiento previa a la crecida hasta la vertical de la punta del hidrograma, luego se continuó la curva de forma ascendente hasta el punto donde se encuentra la curva de agotamiento posterior a la crecida. De esta forma la parte del caudal que es debida a la lluvia neta (escorrentía directa) se encuentra por encima de esta curva, mientras que el caudal que inicialmente tenía la quebrada antes de las precipitaciones (flujo base) se encuentra debajo de esta curva. Además, se calculó el volumen total de la escorrentía directa mediante planimetría usando el hidrograma de cada sección.

Como se mencionó anteriormente, los datos de caudal en el hidrograma pueden separarse en dos hidrogramas individuales, el hidrograma No. 1 corresponde al periodo febrero-agosto en donde los cambios de caudal se dan como respuesta a la primera temporada lluviosa de la región. El hidrograma No. 2 corresponde a al periodo agosto-febrero en donde los cambios de caudal se dan como respuesta a la segunda temporada lluviosa de la región (Ver Figura 7.3).

Figura 7.3

Características del hidrograma general del caudal promedio mensual para la Quebrada El Perro, 1981-2010



Nota. Los datos de caudal y precipitación fueron obtenidos del Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del Río Chinchiná en el departamento de Caldas (POMCA), Fase de diagnóstico-Tomo I, 2014. http://www.corpocaldas.gov.co/dynamic_page.aspx?p=1508

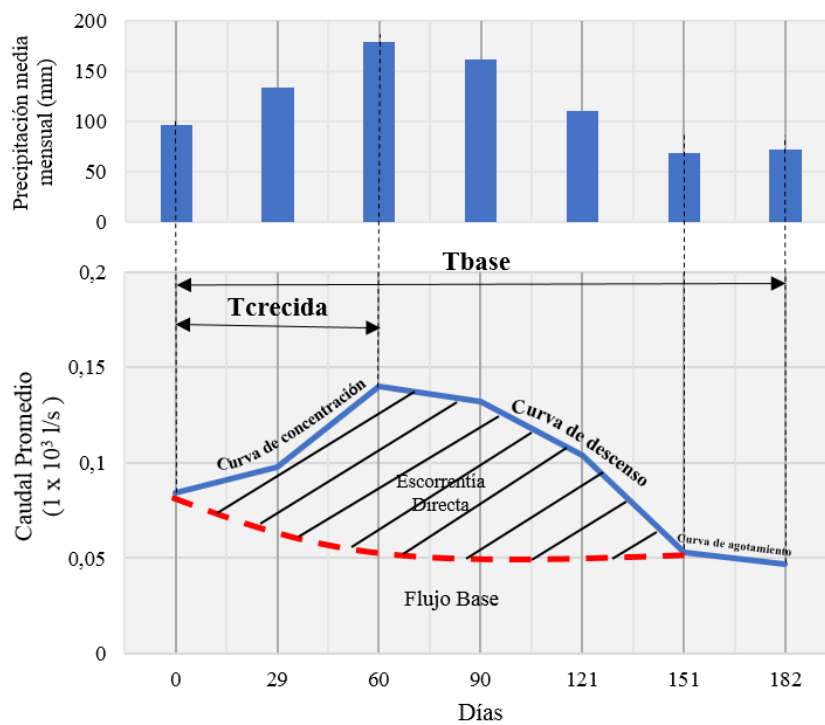
Hidrograma Individual No. 1. Se tiene un acumulado de precipitación de 751.3 mm. La curva de concentración tiene una duración de tres meses, esta inicia en febrero con un valor de caudal de 0.084×10^3 l/s, y alcanza un máximo de caudal de 0.14×10^3 l/s en el mes de abril (Figura 7.4). A partir de esta fecha comienza la curva de descenso, la cual dura cuatro meses, hasta llegar a un valor de caudal de 0.053×10^3 l/s en el mes de junio, a partir de este mes comienza a observarse la curva de agotamiento, la cual alcanza un valor mínimo de caudal de 0.047×10^3 l/s en el mes de agosto.

En cuanto al tiempo de respuesta del caudal frente a la precipitación, se observa que para este periodo el caudal muestra una respuesta casi inmediata a los cambios en la cantidad de precipitación mensual. En la Figura 7.4 se observa que el máximo de caudal está coincidiendo con el máximo de precipitación en el mes de abril.

Para este hidrograma individual No. 1, el valor de la escorrentía directa es de $619.272 \times 10^3 \text{ l}$ (40% del total del caudal) y el valor del flujo base es de $928.908 \times 10^3 \text{ l}$ (60 % del total del caudal).

Figura 7.4

Hidrograma individual No. 1



Hidrograma individual No. 2. Se tiene un acumulado de precipitación de 814 mm. La curva de concentración inicia en agosto con un valor de $0.047 \times 10^3 \text{ l/s}$, y tiene una duración cuatro meses hasta alcanzar un máximo de $0.172 \times 10^3 \text{ l/s}$ en el mes de noviembre. A partir de esta fecha comienza la curva de descenso la cual dura tres meses

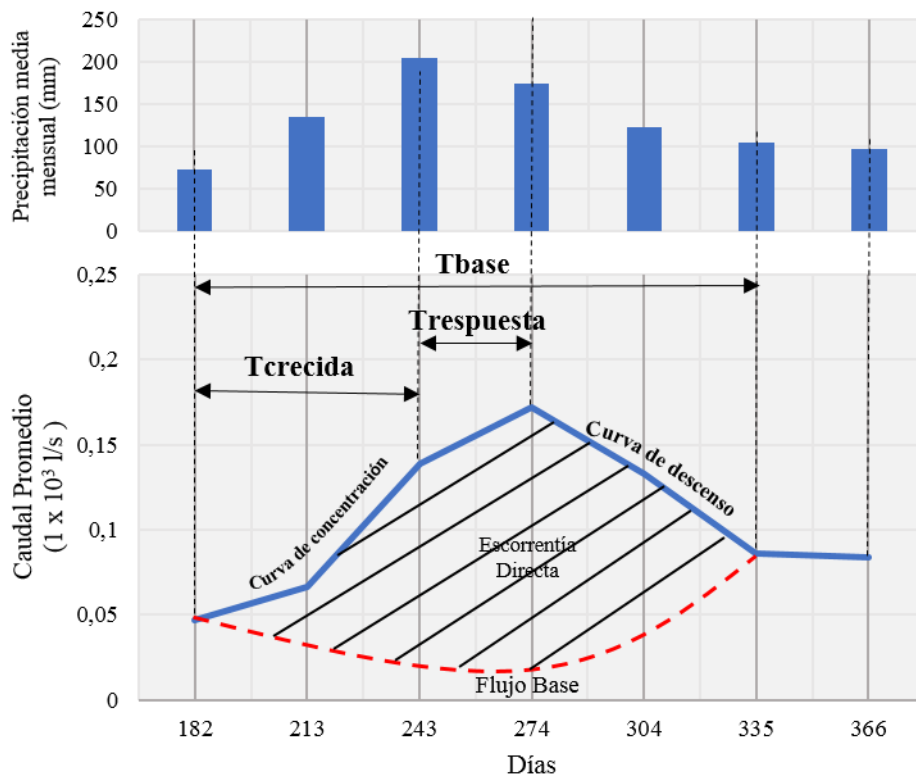
hasta llegar a un valor de 0.086×10^3 l/s en el mes de enero, y finalmente la curva de agotamiento dura un mes llegando a un valor mínimo de 0.084×10^3 l/s en el mes de febrero (Figura 7.5).

En cuanto al tiempo de respuesta del caudal frente a la precipitación, se observa que para este periodo el caudal muestra un tiempo de respuesta de 30 días aproximadamente (entre octubre y noviembre), ya que el máximo de precipitación de esta sección (octubre) se manifiesta como un máximo en el hidrograma en el mes de noviembre.

Para este hidrograma individual No. 2, el valor de la escorrentía directa es de 922.320×10^3 l (54.5 % del total del caudal) y el valor del flujo base es de 770796×10^3 l (45.5% del total del caudal).

Figura 7.5

Hidrograma Individual No. 2



De forma general, para los dos hidrogramas individuales descritos anteriormente, se tiene que la contribución de agua subterránea es mayor al 40% en ambos periodos de recesión.

Se observa además que hay un incremento casi del 100% (de 0.047×10^3 l/s a 0.084×10^3 l/s) en el almacenamiento de la microcuenca en el hidrograma individual No. 2 producto del evento de precipitación del mes de octubre. Claramente como se observa en la Figura 7.3, la microcuenca venía de un periodo de agotamiento y recesión desde el hidrograma individual No. 1 ya que en esta sección al no haber tiempo de retardo, se interpreta que el sistema está reaccionando rápidamente a los eventos de precipitación, es decir, el agua entra e inmediatamente se refleja en la superficie sin producir almacenamiento como tal, hasta que de forma contraria en el hidrograma individual No. 2 al presentarse un mes de tiempo de retardo, se está indicando que el sistema aquí no responde rápidamente a los eventos de precipitación sino que funciona más lento teniendo tiempo de almacenar agua y aumentar el flujo base.

Además, la escorrentía directa del hidrograma individual No.2 (922320×10^3 l) es mayor al hidrograma individual No. 1 (619272×10^3 l), esto se puede deber posiblemente a que, aunque en volumen los dos periodos de precipitación sean parecidos, será la intensidad el factor más importante para marcar esta diferencia ya que cuando los periodos de precipitación son más intensos, el agua no tiene tiempo de infiltrarse, sino que la mayoría se vuelve agua superficial. De esta forma, se evidencia una vez más que el almacenamiento de la microcuenca está relacionado a las oscilaciones del ciclo hidrológico. En cuanto al flujo base, éste en el hidrograma individual No. 1 (928908×10^3 l) es mayor al del hidrograma individual No. 2 (770796×10^3 l).

8. Potencial Hidrogeológico

Como se mencionó en la metodología, las unidades geológicas aflorantes en la zona de estudio se clasificaron con base en su potencial para almacenar y transmitir agua, este potencial se basa principalmente en la porosidad y permeabilidad de estas unidades. De las seis unidades aflorantes, cinco se identificaron con potencial acuífero (Formación Manizales, miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande, parte superior de los Depósitos de caída piroclástica, Depósitos vulcanosedimentarios y los Depósitos aluviales). La parte inferior de los Depósitos de caída piroclástica se clasificó como acuitardo. En este capítulo se presenta la descripción detallada de cada unidad incluyendo datos de descarga de agua (caudal) y parámetros hidroquímicos básicos tomados durante sólo la fase del inventario inicial. El Anexo C incluye el mapa hidrogeológico de la zona y la localización de los manantiales inventariados en este estudio, en este no se observa la unidad Parte inferior de los Depósitos de caída piroclástica debido a que se encuentra infrayacido por la parte superior de estos depósitos, además, la unidad Depósitos vulcanosedimentario fue graficada mediante puntos debido a que su poca extensión no es cartografiable según la escala usada. En este mismo anexo, se incluyen dos perfiles donde se observa la disposición de las unidades acuíferas y la descarga de algunos manantiales. En el Anexo G se presentan fichas técnicas correspondientes al inventario de puntos de agua siguiendo el formato de INGEOMINAS.

8.1 Unidades Acuíferas

8.1.1 Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande (Ksc)

Esta unidad se clasifica como acuífero de porosidad secundaria por fracturamiento. Según la caracterización y medición de fracturas propuesta por Singhal

y Gupta (2010), la orientación del fracturamiento en comparación con la estratificación de las lodolitas (NE) se encuentra de forma perpendicular y paralela con amplios rangos de variación, siendo más común el fracturamiento con orientación perpendicular a la estratificación. Se presentan desde uno a cuatro sets de fracturas que varían en espaciado de uno a cien centímetros, con densidades lineales de 2 a 40 fracturas por metro. La persistencia del fracturamiento es moderada a fuerte generando bloques de forma tabular, prismática y diédrica (Figura 8.1.a y 8.1.b). Las fracturas se encuentran conectadas el 90% de las veces de forma cruzada (Figura 8.2), y el 10% restante no están conectadas (Ciegas), con aperturas que varían de 0.1 mm a 3 cm. La superficie del fracturamiento en general es irregular, las cuales en su mayoría se encuentran vacías o rellenas con material orgánico y sedimento de origen fluvial.

Figura 8.1

Lodolitas negras y grises del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande



Nota. A y B. Fracturamiento de lodolitas grises, silíceas formando bloques diédricos. C. Interestratificación N15E/36SE de lodolitas grises y negras. Ubicación: 845498.3 E 1050312.8 N. Altura: 2120.6 m.s.n.m.

Figura 8.2

Lodolitas negras estratificadas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande



Nota. Estratificación: N85E/11SE. Ubicación: 845796.1 E 1050758.7 N. Altura: 2188.3 m.s.n.m.

Álvarez (1983) en Naranjo y Ríos (1989) define un espesor de aproximadamente 600 m para el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande en la localidad de Aranzazu. En la zona de estudio no fue posible determinar el espesor real de esta unidad. El afloramiento observado con el mayor espesor es de aproximadamente 7 m. Además, para la mayoría de la zona, esta unidad se encuentra suprayacida en contacto discordante por los Depósitos de caída piroclástica y hacia la parte baja de la microcuenca, por la Formación Manizales.

8.1.1.1 Descarga de Agua Subterránea. En esta unidad se inventariaron 7 manantiales, que corresponden al 12.72% del total identificados en este estudio. La identificación, coordenadas y resultados de las mediciones realizadas se presentan en la Tabla 8.1. En el Anexo D se encuentra la localización de los mismos.

Tabla 8.1

Localización, parámetros hidroquímicos y caudales de los manantiales del acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande

Nombre	Coordenadas		Altura	Parámetro fisicoquímico medido				
	Este	Norte		CE (uS/cm)	T (°C)	pH	TDS (ppm)	Q (l/s) x 10 ⁻³
LF017	844992	1049157	1971.3	56	18.9	6.11	30	0.203
LF094	845783	1050680	2195.6	3999	16.3	3.6	2000	1.4906
LF100	845946	1050393	2208.4	430	16.1	6.18	284	5.286
LF092	845708	1050557	2135	96	16.5	5.8	51	
LF076	845200	1050540	2131.4					
LF040	845719	1050387	2156.7					
LF038	845651	1050355	2143.2					
Promedio				194*				2.33 x 10 ⁻³

Nota. *Para el promedio de conductividad eléctrica, no se tuvo en cuenta el valor obtenido del manantial LF094 (3999 uS/cm) ya que se considera un valor anómalo. CE: conductividad eléctrica, T: temperatura, TDS: total de sólidos disueltos, Q: caudal.

Todos los manantiales de esta unidad son de tipo “Manantiales de fractura” (Inclined Fracture Spring) según la clasificación de Bryan (1919). Estos se encuentran a elevaciones entre 1971.3 y 2208.4 m.s.n.m. El agua en esta unidad acuífera no logra un

flujo efectivo a través de los espacios porosos de la roca, por lo cual su movimiento tiene lugar a través de aberturas en forma de láminas o placas, que para este caso son diaclasas, las cuales se presentan de forma irregular e inclinada pero no de manera sistemática.

De los 7 manantiales inventariados, a tres fue posible medirles caudales durante el inventario inicial. El manantial LF092 tiene una descarga muy baja, para ser medida con precisión.

Los caudales de descarga para esta unidad medidos durante el inventario varían de 0.203×10^{-3} a 5.28×10^{-3} l/s, correspondientes a una magnitud 8ª según la clasificación de Meinzer (1923). En comparación con la descarga de las otras unidades acuíferas de este estudio, estos caudales son los más bajos.

8.1.1.2 Parámetros Hidroquímicos del Agua Subterránea. De los manantiales inventariados, a cuatro fue posible medirles parámetros hidroquímicos (temperatura, pH y conductividad eléctrica y total de sólidos disueltos). Los valores de conductividad eléctrica se encuentran entre 56 y 430 uS/cm (TDS: 30 y 284 ppm), con un valor anómalo de 3999 uS/cm (TDS: 2000 ppm), los valores por debajo de 430 uS/cm indican que el agua es dulce. El valor de 3999 uS/cm no es exacto y el agua de ese manantial puede tener una salinidad más alta, ya que el 3999 corresponde al límite de detección del instrumento. En todo caso, valores de CE mayores de este valor son considerados como agua salobre, de acuerdo con la tabla de clasificación simple de aguas subterráneas basada en el total de sólidos disueltos de Freeze y Cherry (1979). Sin considerar el valor anómalo. El valor medio de la mineralización es el segundo más alto en la microcuenca.

Es importante anotar que el valor de CE de 3999 uS/cm (que en realidad debe ser mayor), es un valor anómalo dentro de la cuenca. El promedio de CE para los manantiales de esta unidad es 194 uS/cm mientras que para el conjunto de todos los manantiales de la microcuenca es de 209.395 uS/cm. El manantial LF094 que presenta el valor anómalo de CE (3999 uS/cm) se encuentra en la zona de influencia de la Falla El Perro (Ver Anexo D). Esto podría estar indicando que el agua proviene de una circulación profunda, asociada a la falla en mención. La otra posibilidad podría ser contaminación, aunque no se detectaron fuentes de contaminación superficial cercanas. Además, existe un manantial a 13 metros (LF110) descargado a través de los Depósitos de caída piroclástica que no presenta este tipo de valores anómalos en la CE. Es necesario hacer estudios hidroquímicos detallados para conocer la causa de esta alta mineralización.

Los valores de pH para esta unidad medidos durante el inventario están en el rango de 5.8 y 6.18, que indican agua ácida, y un valor anómalo de 3.6 que indica agua muy ácida, este último valor de pH, es un valor anómalo dentro de la microcuenca que pertenece al manantial LF094. La temperatura presenta valores entre 16.1 y 18.9 °C. Estos valores se encuentran dentro del rango de valores promedio de temperatura para el clima de Manizales. Las temperaturas más bajas se presentan hacia la parte alta de la microcuenca por encima de los 2100 m.s.n.m. lo cual sugiere relación inversa entre temperatura y elevación topográfica.

8.1.2. Formación Manizales (Tsmz)

Esta unidad se clasifica como acuífero de doble porosidad (porosidad secundaria por fracturamiento). Según la caracterización y medición de fracturas propuesta por Singhal y Gupta (2010), esta unidad presenta 2 sets de fracturas con

orientación NW y NE, un espaciamiento entre 3 y 100 cm, y una densidad lineal de 4 a 7 fracturas por metro. La persistencia de fracturamiento es moderada (Figuras 8.3.a y 8.3.b), generando bloques de forma prismática y tabular. Las fracturas se encuentran conectadas de forma cruzada, con aperturas que varían de 0.1 a 3 cm. La superficie de fracturamiento es irregular y no se encuentra rellena por algún material.

Figura 8.3

Fracturamiento en la parte superior de la Formación Manizales



Nota. Parte superior de la Formación Manizales, arenitas diaclasas con aporte volcánico.
Ubicación: 844732.9 E 1049020 N. Altura: 2049.2 m.s.n.m.

Naranjo y Ríos (1989) dan un espesor para esta unidad de 260 m con base en la aparición de los primeros fragmentos de pómez como punto de correlación entre dos secciones tipo. Para la zona de estudio no es posible determinar el espesor real de esta unidad. Además, esta unidad está infrayacida por el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande e suprafrayacida por los Depósitos de caída piroclástica.

8.1.2.1 Descarga de Agua Subterránea. En esta unidad se inventariaron 7 manantiales, que corresponden al 12.72% del total identificados en este estudio para toda la microcuenca. La identificación, coordenadas y resultados de las mediciones realizadas se presentan en la Tabla 8.2. En el Anexo D se encuentra la localización de los mismos.

Tabla 8.2

Localización, parámetros hidroquímicos y caudales de los manantiales del acuífero Formación Manizales

Nombre	Coordenada		Altura	Parámetro fisicoquímico medido				
	Este	Norte		CE (uS/cm)	T (°C)	pH	TDS (ppm)	Q (l/s) x 10 ⁻³
LF029	844526	1048991	2009.3	304	18.9	6.63	161	26.525
LF021	844854	1049061	2026.3	345	17	6.44	183	1.515
LF019	844866	1049086	1989.3	180	18.1	6.3	97	
LF020	844866	1049061	1988.7					
LF025	844733	1049020	2041.2					
LF026	844714	1049008	2042.3					
LF018	844872	1049117	1993.2					
Promedio				276.33				14.02 x 10 ⁻³

Nota. CE: conductividad eléctrica, T: temperatura, TDS: total de sólidos disueltos, Q: caudal.

Todos los manantiales de esta unidad son de tipo “Manantiales de fractura” (Inclined Fracture Spring) según la clasificación de Bryan (1919). Estos se encuentran a elevaciones entre 1988.7 y 2042.3 m.s.n.m. El agua en esta unidad acuífera no logra un flujo efectivo a través de los espacios porosos de la roca, por lo cual su movimiento

tiene lugar a través de aberturas en forma de láminas o placas, que para este caso son diaclasas, las cuales se presentan de forma irregular e inclinada pero no de manera sistemática. Por ejemplo, en el manantial LF029 (Figura 8.4), el agua sale por un plano de fractura con orientación N45W/22SW.

Figura 8.4

Manantial LF029



Nota. Surgencia de agua por fractura en arenitas de la parte superior de la Formación Manizales. Ubicación: 844525.813 E 1048991.328 N. Altura: 2009.3 m.s.n.m.

Del total de manantiales inventariados en esta unidad, fue posible hacer mediciones de caudal a dos de ellos. El manantial LF019 tienen descarga por goteo lo que impide medir caudal. Los caudales de descarga para esta unidad medidos durante el inventario varían de 1.515×10^{-3} a 26.525×10^{-3} l/s, los cuales son magnitud 7^a y 8^a según la clasificación de manantiales basada en la tasa promedio de descarga de

Meinzer (1923). La diferencia entre los valores de caudal se debe al grado de fracturamiento del área del acuífero que está alimentando estos dos manantiales: el LF021 está drenando en una zona con un grado de fracturamiento despreciable mientras que el LF029 se encuentra asociado a una zona con alto grado de fracturamiento.

En comparación con la descarga de las otras unidades acuíferas de este estudio, estos caudales son los segundos más altos, después de los Depósitos de caída piroclástica.

8.1.2.2 Parámetros Hidroquímicos del Agua Subterránea. Los valores de conductividad eléctrica para esta unidad medidos durante el inventario inicial (Tabla 8.3), se encuentran entre 180 y 345 uS/cm (SDT: 97 y 183 ppm) por lo que se considera que el agua de este acuífero es dulce, de acuerdo a la tabla de clasificación simple de aguas subterráneas basada en el total de sólidos disueltos de Freeze y Cherry (1979). El agua de esta unidad tiene el más alto promedio de mineralización de las unidades de la zona (CE: 276.33 uS/cm).

Los valores de pH para esta unidad medidos durante el inventario están en el rango de 6.3 y 6.63 indicando que el agua presenta un pH ácido.

La temperatura presenta valores entre 17 y 18.9 °C Estos valores se encuentran dentro del rango de valores promedio de temperatura para el clima de Manizales. No se encontró evidencia de una relación entre temperatura y elevación topográfica.

8.1.3. Parte Superior de los Depósitos de Caída Piroclástica (Qcp-s)

Esta unidad se clasifica como acuífero de porosidad primaria. Naranjo y Ríos (1989) definen un espesor variable de 10 a 20 m para toda la unidad de los Depósitos de caída piroclástica, tanto parte superior como inferior. En la zona de estudio se determina un espesor aproximado de 4 m para sólo la parte superior.

8.1.3.1 Descarga de Agua Subterránea. En esta unidad se inventariaron 38 manantiales, que corresponden al 69.09% del total de manantiales identificados en este estudio. La identificación, coordenadas y resultados de las mediciones realizadas se presentan en la Tabla 8.3. En el Anexo D se encuentra la localización de los mismos.

Tabla 8.3

Localización, parámetros hidroquímicos y caudales de los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica

Nombre	Coordenadas		Altura	Parámetros fisicoquímicos medidos				
	Este	Norte		CE (uS/cm)	T (°C)	pH	TDS (ppm)	Q (l/s) x 10 ⁻³
LF003	845254.5	1049845.9	2065	161	18.5	6.33	65	10.81
LF063	845336.1	1050297.1	2119.7	67	18.8	6.2	35	1.567
LF077	846305.7	1050891.1	2335.4	105	17	5.78	51	26.143
LF110	845790	1050691.7	2178.2	386	16.9	6.22	204	377.358
LF048	845341.4	1049744.6	2084.1	154	17.2	7.39	97	11.627
LF051	845423.4	1049713.5	2091	176	16.3	6.49	93	4.13
LF035	845336.1	1050198.9	2094.5	74	17	6.78	39	5.081
LF065	845300.3	1050363.1	2125.7	106	17.2	6.65	53	11.547
LF044	844526.4	1048737.1	2023.8	117	16.5	5.93	62	21.052
LF090-1	846687.7	1050501.7	2206.1	82	16.9	6.15	44	32.679
LF090	846687.7	1050501.7	2206.1	115	16.9	6.18	46	18.05
LF097	845303.7	1049259.4	2115.5	147	17.4	5.95	77	14.164
LF104	844555.8	1048977.3	1997.2	209	19.3	6.42	111	43.478
LF107	845298.4	1050473.2	2132.1	130	16	6.31	69	7.291
LF045	844579.4	1048682.1	1975	113	15.9	6.35	60	5.364

LF011	845346	1050185	2061.9	273	16.7	6.13	146
LF085	845165	1050365	2127	101	18.1	5.65	54
LF070	845258	1050606	2144.3	130	18.3	6.19	44
LF091	845678	1050556	2007.3				
LF075	845250	1050540	2150				
LF088	845662	1050461	2147.2				
LF089	845744	1050461	2162.5				
LF066	845276	1050450	2141.1				
LF084	845367	1050334	2096				
LF060	845182	1050065	2111.2				
LF080	846596	1050878	2431.2				
LF078	846369	1050798	2334.7				
LF049	845361	1049731					
LF052	845461	1049727	2102.2				
LF055	845593	1049715	2127.7				
LF098	845375	1049284	2131.9				
LF095	845395	1049101	2103.5				
LF096	845399	1049084	2105.2				
LF103	844494	1048953	1988.2				
LF082	844717	1050012	2160.5				
LF011	845346	1050185	2061.9				
LF006	845247	1049981	2081.8				
LF004	845302	1049891	2082.5				
<hr/>							
Promedio				134.5			15.21 x 10 ⁻³

Nota. CE: conductividad eléctrica, T: temperatura, TDS: total de sólidos disueltos, Q: caudal.

Los manantiales de esta unidad son de dos diferentes tipos, 36 manantiales se clasifican como “Manantiales de contacto” (Gravity Spring) según la clasificación de Bryan (1919). Los de esta categoría se localizan entre alturas de 1975 y 2431.2 m.s.n.m. se caracterizan por generar una superficie de contacto horizontal, regular y de gran extensión entre una roca porosa (parte superior de los Depósitos de caída tamaño lapilli) y una roca impermeable (parte inferior de los Depósitos de caída tamaño ceniza). Los dos manantiales restantes se clasifican como “Manantiales de depresión” (Border Spring) según la clasificación de Bryan (1919). Estos se encuentran entre elevaciones de 2081.8 y 2082.5 m.s.n.m. ocurriendo como zonas sobresaturadas de agua producto de una depresión en el terreno la cual coincide con el nivel freático.

De los 38 manantiales de esta unidad, sólo fue posible medir caudales de descarga para 15 manantiales. Los manantiales LF011, LF085 y LF070 tienen caudales muy bajos, por goteo, lo cual no permitió medir caudal. En el caso de los demás manantiales, estos al ser de difícil acceso, no permitieron realizar mediciones.

Los valores de descarga obtenidos durante el inventario para esta unidad varían entre 1.567×10^{-3} a 43.478×10^{-3} l/s, que corresponden a magnitudes 7ª y 8ª según la clasificación de Meinzer (1923). Es importante anotar que para el manantial LF110 se midió un caudal de 377×10^{-3} l/s por lo que se clasifica como magnitud 6ª. Este valor es casi diez veces más grande que el promedio de caudales de los otros manantiales y al ser un valor único no se considera representativo de la unidad. Una razón para explicar este valor de descarga mucho más alto que los otros manantiales puede ser su localización en la zona de la Falla El Perro, la cual puede estar generando un área de mayor permeabilidad.

En comparación con la descarga de las otras unidades acuíferas en este estudio, el promedio del caudal en esta unidad es el más alto de todas.

Figura 8.5

Manantial LF110



Nota. A y B. Surgencia de agua en la superficie de contacto entre la parte superior e inferior de los Depósitos de caída piroclástica. Ubicación: 845790 E 1050691.6 N Altura: 2178.2 m.s.n.m.

8.1.3.2 Parámetros Hidroquímicos del Agua Subterránea. Los valores de conductividad eléctrica para esta unidad medidos durante el inventario, se encuentran entre 48 y 386 uS/cm (SDT: 27 y 204 ppm) por lo que se considera agua dulce, de acuerdo a la tabla de clasificación simple de aguas subterráneas basada en el total de sólidos disueltos de Freeze y Cherry (1979). El promedio de CE indica que el agua de esta formación tiene baja mineralización, por debajo de las unidades acuíferas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande y la Formación Manizales.

Los valores de pH para esta unidad medidos durante el inventario están en el rango de 5.65 y 7.39 indicando agua de carácter ácido a neutro.

La temperatura presenta valores entre 15.9 y 20 °C Estos valores se encuentran dentro del rango de valores promedio de temperatura para el clima de Manizales. No se encontró relación entre temperatura y elevación topográfica.

8.1.4. Depósitos Vulcanosedimentarios (Qvs)

Esta unidad se clasifica como acuífero de alta porosidad primaria y ausencia de porosidad secundaria. Los afloramientos estudiados tienen un espesor total de aproximadamente 7 m, mientras que los lentes de grava y arena no llegan a superar el metro de espesor. Además, esta unidad en su extensión horizontal, se encuentran en contacto discordante con los Depósitos de caída piroclástica.

8.1.4.3 Descarga de Agua Subterránea. En esta unidad se inventariaron 3 manantiales, que corresponden al 5.45% del total de manantiales identificados en este estudio para toda la microcuenca. La identificación, coordenadas y resultados de las mediciones realizadas se presentan en la Tabla 8.4. En el Anexo D se encuentra la localización de los mismos.

Tabla 8.4

Localización, parámetros hidroquímicos y caudales de los manantiales del acuífero Depósitos vulcanosedimentarios

Nombre	Coordenada		Altura	Parámetro fisicoquímico medido				
	Este	Norte		CE	T	pH	TDS	Q (l/s)
				(uS/cm)	(°C)		(ppm)	x 10 ⁻³
LF027	844699	1048992	2045.4	146	16.7	6.64	78	9.2165
LF108	845333	1049738	2097.4	123	17.0	6.69	63	1.3

LF047	845274	1049787	2088	111	16.3	7.13	54
Promedio				126.7	5 x 10 ⁻³		

Nota. CE: conductividad eléctrica, T: temperatura, TDS: total de sólidos disueltos, Q: caudal.

Todos los manantiales de esta unidad son de tipo “Manantiales Artesianos” (Unbedded Artesian Spring) según la clasificación de Bryan (1919), ubicados entre 2045.4 y 2097.4 m.s.n.m. En este tipo de manantiales, debido a que los lentes de grava y arena no se depositan en una capa regular, sino que se caracterizan por ser una capa porosa inclinada que aflora, está expuesta a absorber agua desde un nivel alto de la superficie y descargarla en el nivel más bajo de este lente.

Para esta unidad sólo fue posible medir caudales a dos de los manantiales inventariados. El LF047 presenta descarga muy baja, por goteo lo cual no permitió hacerle medición de caudal. Los dos valores de caudal son 9.2165×10^{-3} y 1.3×10^{-3} l/s, y corresponde a una magnitud 8^a según la clasificación de Meinzer (1923). Estas mediciones tienen un valor intermedio en comparación con la descarga de las otras unidades acuíferas de este estudio.

Figura 8.6

Manantial LF027



Nota. Surgencia de agua por goteo en lentes de grava. Ubicación: 844699 E 1048992 N Altura: 2045.4 m.s.n.m.

8.1.4.2 Parámetros Hidroquímicos del Agua Subterránea. Los dos valores de conductividad eléctrica para esta unidad medidos durante el inventario inicial son 111 y 146 uS/cm (SDT: 54 y 78 ppm), los cuales se consideran como agua dulce, de acuerdo a la tabla de clasificación simple de aguas subterráneas basada en el total de sólidos disueltos de Freeze y Cherry (1979). Comparado con las otras unidades, el agua de este acuífero presenta la más baja salinidad en la microcuenca.

Los dos valores de pH para esta unidad medidos durante el inventario son 6.64 y 7.13, lo que indica en ambos casos que el agua presenta un pH ácido a neutro.

La temperatura presenta dos valores de 16.3 y 16.7 °C durante las mediciones del inventario. Estos valores se encuentran dentro del rango de valores promedio de temperatura para el clima de Manizales. No se evidencia relación entre temperatura y elevación topográfica.

8.1.5 Depósitos Aluviales (*Qal*)

Estos depósitos se clasifican como una unidad con posible potencial acuífero debido a su porosidad primaria y permeabilidad por su litología y tamaño de grano (Ver capítulo 6 Geología). Debido a que no se encontraron descargas de agua subterránea, esta unidad no se puede describir en más detalle.

8.2 Acuitardo

8.2.1 Parte Inferior de los Depósitos de Caída Piroclástica (*Qdc-i*)

Esta unidad está compuesta por sedimentos inconsolidados, con tamaño de grano ceniza, fragmentos de origen volcánico con cuarzo, hornblenda, biotita y vidrio volcánico alterado formando una matriz arcillosa. Se clasifica como un acuitardo considerando el tamaño de grano (ceniza) y la presencia de matriz arcillosa. En campo se observó su menor capacidad de absorción y transmisión de agua ya que el agua que viene siendo transmitida desde el acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica, al llegar a esta parte inferior no puede infiltrarse debido a su menor porosidad/permeabilidad por lo que se crea una superficie de contacto entre estas dos por donde parte del agua fluye hacia la superficie.

Naranjo y Ríos (1989) definen un espesor variable de 10 a 20 m para toda la unidad de los Depósitos de caída piroclástica, tanto parte superior como inferior. En la zona de estudio se determina un espesor aproximado de 5 m para sólo la parte inferior.

8.3 Sistemas de Flujos

Los parámetros que rigen el funcionamiento del agua subterránea bajo el efecto gravitacional son: clima, topografía y referente geológico, los cuales permiten la formación de tres sistemas generales de flujo: local, intermedio y regional, en los que el tiempo de residencia del agua subterránea es de menor a mayor, respectivamente. Estos flujos presentan cada uno su zona de recarga, tránsito y descarga particular (Tóth 2000, en Peñuela y Carrillo, 2012).

Tóth ilustra cómo los parámetros de temperatura, contenido de iones mayores y profundidad cambian en los sistemas de flujo conforme estos circulan y evolucionan en su naturaleza local, intermedia o regional (Tóth, 1999 en Pérez et al., 2018). La teoría de los sistemas de Flujo (TSF) propuesta por Tóth (1963) es una técnica que ha demostrado ser sumamente útil para definir el funcionamiento o dinámica del agua subterránea, mediante el análisis sistemático y evaluación de su interacción con otros componentes del ambiente incluyendo vegetación, suelo, aspectos geomorfológicos, entre otros (Tóth, 2000 en Peñuela y Carrillo, 2012).

Aunque el tipo de materiales geológicos, el clima y la topografía juegan papeles centrales para determinar la dinámica y los tipos de flujo presentes en una determinada zona de estudio (Sanford, 2002; Zhou y Li, 2011 en Pérez et al., 2018), se requiere mayor cantidad de estudios hidrogeológicos que incorporen el entendimiento de los sistemas de flujo para establecer la dinámica del agua subterránea en el área de estudio y la definición de la jerarquía de los diferentes flujos presentes. Por ejemplo, Pérez et al., (2018) recurren a parámetros como la temperatura, iones mayores mediante análisis

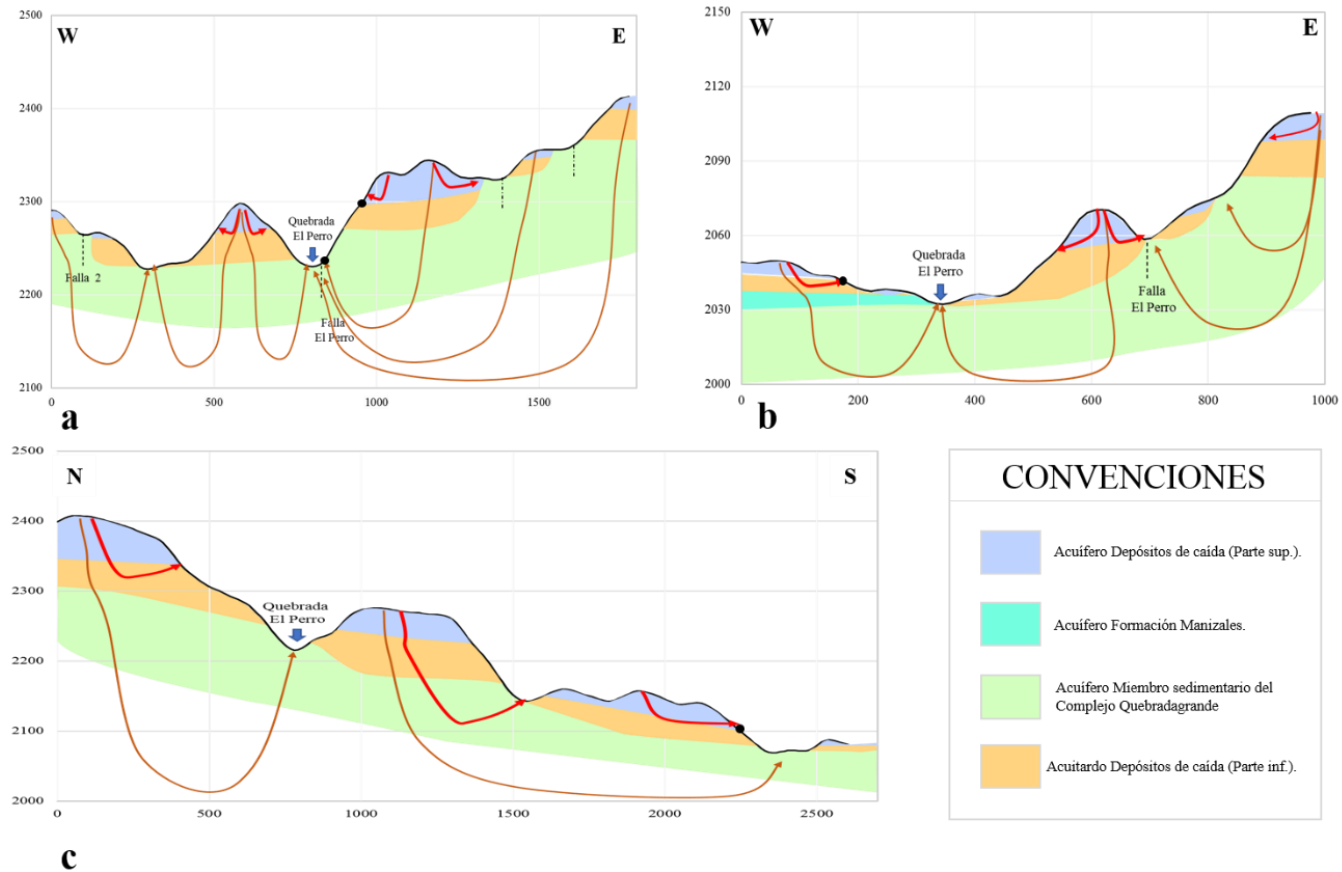
químicos y profundidad (nivel estático) para identificar la dinámica del agua subterránea.

Un elemento que añade complejidad en el estudio de sistemas de flujos en una zona es la presencia de fallas geológicas, las cuales pueden actuar como fronteras de flujo impidiendo o facilitando la interconexión hidráulica de acuíferos (Pérez et al., 2018). Es así como para la microcuenca de la Quebrada El Perro, se hacen necesarios estudios en los manantiales ubicados en la zona de falla que permitan evidenciar incrementos de temperatura y cantidad de iones mayores para determinar si la presencia de estas fallas favorece la mezcla de flujos y/o conectan flujos profundos con la superficie. Así como estudios que clarifiquen la posibilidad de conexión hidráulica subterránea entre cuencas hidrográficas vecinas, a lo largo de las rocas fracturadas del Miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande.

Para tener una idea de cómo funciona el flujo de agua subterránea en la zona de estudio se crearon tres cortes, como se indica en la Figura 8.7. Para cada uno de ellos se realizó una modelación del flujo en 2D, usando el programa Topodrive (referencia) e incluyendo datos de permeabilidad reportados en la literatura para este tipo de litología. Los resultados se presentan en la Figuras 8.7.

Figura 8.7

Posibles direcciones de flujo de los sistemas locales y subregionales



Nota. Los puntos negros indican descargas de agua (manantiales). Las líneas naranjas indican las direcciones de flujo subregional y las líneas rojas indican las direcciones del flujo local.

Los resultados de esta modelación indican que en la zona se estarían generando sistemas de flujo local y subregional. En los sistemas locales la zona de recarga es adyacente a la zona de descarga. Esta última está determinada no solo por la topografía sino por los cambios en la permeabilidad de la parte superior e inferior de los depósitos de caída. En los sistemas subregionales las zonas de recarga y descarga están controladas principalmente por la topografía, de esta forma, las zonas de descarga coinciden con las zonas más bajas, indicadas por la quebrada El perro y sus principales afluentes.

De los diagramas también se puede concluir que la mayoría de la zona de estudio se puede considerar como área de recarga, ya que toda la zona está cubierta por depósitos de origen volcánico los cuales son permeables y absorben el agua producto de la precipitación.

9. Monitoreo de Manantiales, Relaciones con el Agua Superficial y Propiedades Hidráulicas de los Acuíferos

Como se mencionó en la metodología, siete manantiales fueron seleccionados para obtener información acerca de la variación temporal del caudal y de parámetros hidroquímicos básicos del agua subterránea. Esta información fue procesada con el fin de determinar de manera cualitativa las propiedades hidráulicas de los acuíferos y analizar la respuesta de estos a la precipitación. La selección de estos manantiales se hizo teniendo en cuenta especialmente su distribución espacial y facilidad para recolectar información en ellos. Debido a la amplia cobertura de los Depósitos de caída piroclástica y su importancia hidrogeológica, en esta unidad se encuentran la mayoría de los puntos de monitoreo. Dos manantiales localizados en la zona de la Falla El Perro también fueron incluidos, con el fin de analizar los efectos de esta falla en las propiedades de los acuíferos. La identificación de los manantiales y su localización se indican en la Tabla 9.1 y en la Figura 9.1.

Tabla 9.1

Lista de manantiales monitoreados por unidad hidrogeológica, con información recolectada

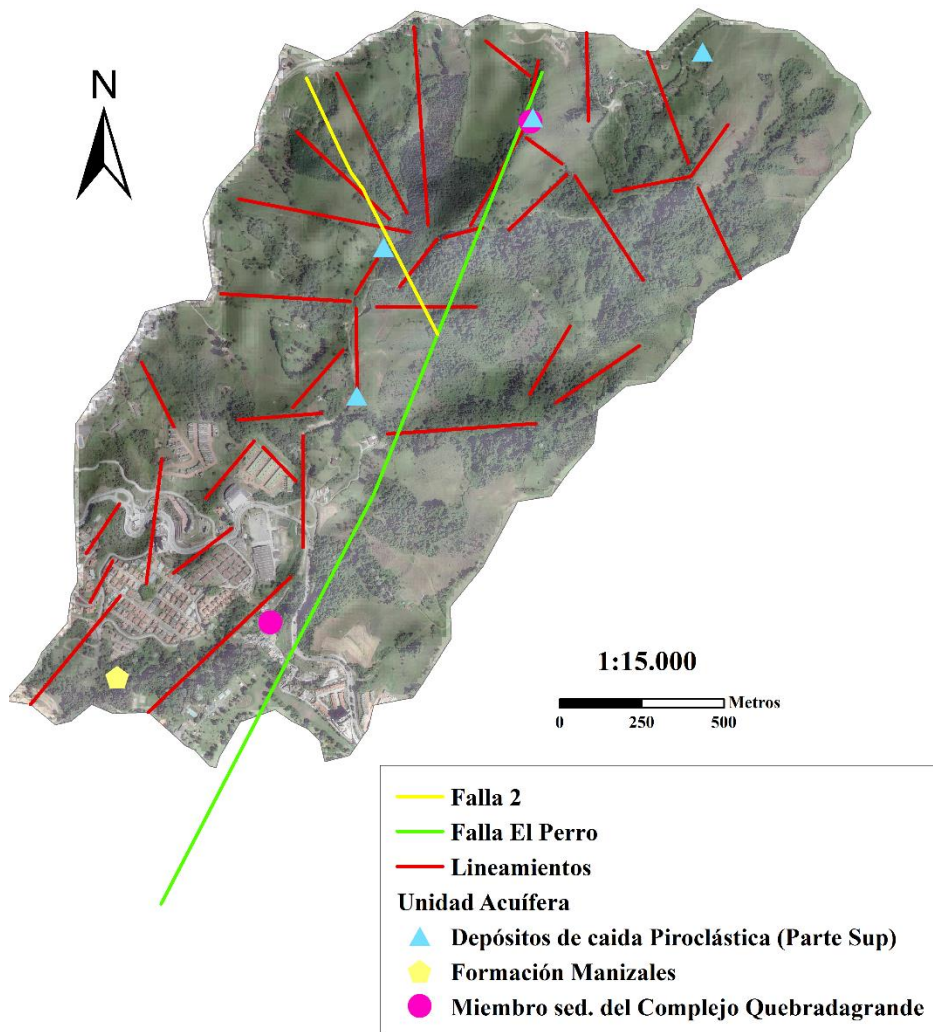
Unidad Acuífera	Nombre del Manantial
Formación Manizales	LF029
Complejo Quebradagrande (miembro Sedimentario)	LF017 LF094*
	LF003

Depósitos de caída	LF063
Piroclástica	LF077
(parte superior)	LF110*

Nota. Los manantiales con * indican que están ubicados en la zona de la Falla El Perro.

Figura 9.1

Localización de manantiales monitoreados



De acuerdo a lo descrito en la metodología (Capítulo 4), para cada manantial se creó un hidrograma usando los datos de caudal tomados durante el monitoreo. Estos

hidrogramas son descritos basados en la tendencia del caudal (flujo base) y su relación con los cambios en el almacenamiento en el área del acuífero que alimenta cada manantial: la tendencia ascendente del caudal refleja un incremento en el almacenamiento debido a episodios de recarga por precipitación. La tendencia descendente refleja la disminución en el almacenamiento por la pérdida del agua al haber finalizado el episodio de recarga (Figura 4.6).

Para analizar la influencia de la precipitación en la variación del almacenamiento de los acuíferos, la variación en el caudal fue comparada con el hietograma creado con datos diarios, medidos en la estación Niza, para el mismo tiempo del monitoreo (diciembre 2 de 2019 a febrero 28 de 2020) adicionando los últimos diez días de noviembre. En el hietograma se identificaron los eventos de precipitación que ocurrieron durante el monitoreo, fueron numerados de E1 hasta E8, y además para cada uno se calculó el total de la precipitación, la intensidad y la fecha del centroide (ver ejemplo en la Tabla 9.2).

En cada hidrograma general además se identificaron picos de caudal que generaron hidrogramas individuales, para los cuales fue posible observar curvas de concentración y recesión. Para ellos se tabularon los datos correspondientes a la respuesta al evento de precipitación que los causó, tales como el tiempo de inicio de esa respuesta, tiempo de concentración, tiempo de la recesión y el porcentaje de incremento del caudal. Estos hidrogramas individuales se consideran eventos de recarga temporal, que pueden o no afectar el almacenamiento general del acuífero, como se describirá en las secciones siguientes. Algunos de estos hidrogramas individuales fueron seleccionados para analizar la curva de recesión y calcular su coeficiente, el cual se relaciona con las propiedades hidráulicas del acuífero. Los valores del coeficiente fueron convertidos al índice C ($1/\alpha$), descrito como la capacidad de regulación del

acuífero (Machuca, 2012). La interpretación de C es descrita en la metodología (capítulo 4).

Con los datos de conductividad eléctrica (CE) y temperatura (T) de cada manantial se crearon series multitemporales las cuales fueron descritas comparando los cambios y tendencias con los cambios en el flujo base y la recarga temporal observados en el hidrograma. El objetivo de este análisis es determinar cómo la entrada de agua nueva al acuífero por recarga y la descarga general afectan la mineralización y temperatura del agua.

A continuación, se presentan los resultados del monitoreo por unidad acuífera.

9.1 Acuífero Formación Manizales (AFM)

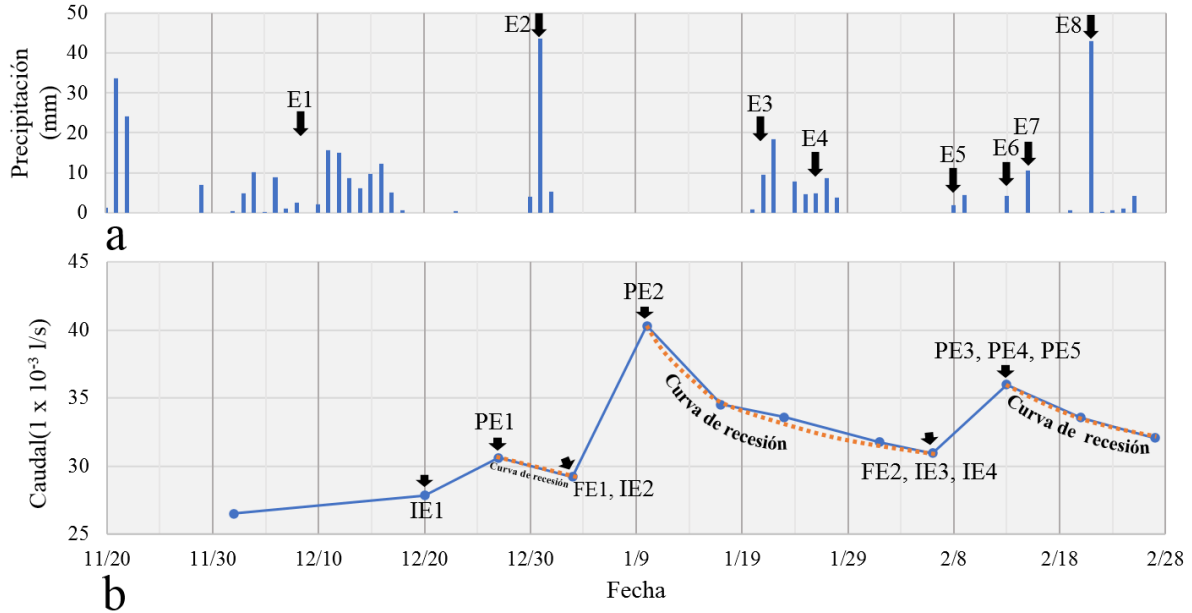
Para este acuífero se seleccionó el manantial LF029. Este se clasifica como manantial de fractura y se encuentra ubicado a una altitud de 2009.3 msnm en la parte baja de la microcuenca, cercano a la desembocadura de las aguas al Río Chinchiná (Figura 9.1).

9.1.1 Descripción General del Hidrograma y Respuesta a la Precipitación

Los datos obtenidos de caudal para este manantial varían entre 26.52×10^{-3} y 40.32×10^{-3} l/s. Los resultados de las mediciones para todas las campañas de monitoreo se encuentran en el Anexo F. El hidrograma obtenido (Figura 9.2) indica una tendencia ascendente del flujo base durante el periodo de observación: al comienzo del monitoreo se registró el caudal más bajo (26.52×10^{-3} l/s) y al final de febrero se registró un valor de 32.07×10^{-3} l/s. En el hidrograma se observan además tres máximos de caudal, en diciembre 27 de 30.62×10^{-3} l/s, enero 10 de 40.32×10^{-3} l/s y febrero 13 de 35.99×10^{-3} l/s. La tendencia ascendente del flujo base indica que el acuífero que alimenta este manantial incrementó su almacenamiento durante este periodo.

Figura 9.2

Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF029 del acuífero Formación Manizales (b)



Nota. E1 a E8 indican los eventos de precipitación en el hietograma. La respuesta a cada evento se indica en el hidrograma de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

En la Figura 9.2 se observa que el aumento del flujo base se da como respuesta a los eventos de precipitación sucedidos durante el monitoreo. Los tres picos de caudal observados generaron hidrogramas individuales que son la respuesta a los eventos de precipitación E1, E2, y al acumulado de los eventos E3, E4 y E5. La respuesta a los eventos E6, E7 y E8 no fue observada durante el periodo de monitoreo.

Para cada hidrograma individual los tiempos de inicio de la respuesta a cada evento de precipitación (IE), al pico del evento (PE), llamado tiempo de concentración y el final de la respuesta (FE), llamado tiempo de recesión, fueron medidos y tabulados para los eventos E1 y E2, como se indica en la Figura 9.2 y en la Tabla 9.2. Para el tercer hidrograma individual, debido a que es una respuesta acumulada a varios eventos,

sólo fue posible calcular el incremento de caudal y tener un estimado de la duración de la recesión.

Tabla 9.2

Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma del manantial LF029 (acuífero Fm Manizales)

Evento de precipitación	Fechas del evento Centroide	Total precipitación (mm)	Intensidad de la precipitación (mm/d)	Tiempo al inicio de la respuesta (IE), en días	Tiempo de concentración (PE), en días	Duración de la recesión (días)	% Incremento del caudal *
	Nov 29-Dic 18,						
E1	Dic 9.	109.6	6.45	12	19	8	15.46
	Dic 30- Ene 1						
E2	Dic 31	52.8	17.60	4	11	28	52.03
	Ene 20 hasta						
E3+E4+E5	Feb 8	64.4	6.44			≥15	35.71

Nota. El porcentaje de incremento en el caudal* se hace con base en el valor mínimo del caudal observado durante el tiempo de monitoreo.

Los cálculos indican que los tres hidrogramas individuales son efectos causados por la recarga de eventos con totales de precipitación entre 52.8 y 109 mm. El aumento temporal del caudal para los eventos E1, E2 y el acumulado de los eventos E3, E4 y E5 con respecto al mínimo medido al comienzo del monitoreo es de 15.46, 52.03 y 35.71% respectivamente.

Para los eventos E1 y E2 se observa que la duración del tiempo de concentración está relacionada a la intensidad de la precipitación y no al total de la precipitación caída:

a mayor intensidad menor el tiempo que el hidrograma tarda en alcanzar el máximo. En la Tabla 9.2 se observa que la intensidad de la precipitación del E2 es casi tres veces mayor que la de E1, aunque el total de la precipitación es mayor en E1.

En cuanto a la duración de la recesión se observa que esta está relacionada a la magnitud del cambio en el caudal: entre mayor es el incremento del caudal, más tiempo el acuífero se tarda en drenar el agua. El evento E2 tuvo el mayor aumento de caudal (52.03% de incremento respecto al mínimo) y tuvo el periodo de recesión más largo.

Finalmente, estos tres eventos además de causar recarga temporal, causan un incremento en el almacenamiento: en los hidrogramas individuales de la Figura 9.2 se observa que el caudal medido al final de la respuesta es mayor al caudal medido al inicio del evento.

9.1.2 Análisis Multitemporal de la Conductividad Eléctrica (CE) y la Temperatura (T)

Los resultados de las mediciones de estos dos parámetros en el manantial LF029 se presentan en la Figura 9.3 (b y c, respectivamente). La CE (Figura 9.3.b) inicia el 2 de diciembre con un valor de 304 uS/cm. Se observa una tendencia ascendente hasta el 27 de diciembre alcanzando un máximo de 393 uS/cm. De diciembre 27 a enero 23 la CE decrece hasta alcanzar un mínimo de 264.3 uS/cm. Desde enero 23 a febrero 27 la CE vuelve a tener una tendencia ascendente alcanzando un valor final de 354.78 uS/cm.

Comparando la serie multitemporal de la CE con el hidrograma se observa que las tendencias ascendentes de diciembre y febrero son correlacionables con el incremento en el almacenamiento en el área del acuífero que alimenta el manantial. Los efectos por la recarga de los eventos de precipitación E1 y E2 son observados como un incremento de la CE durante el tiempo de concentración, y una disminución durante la recesión. El efecto neto es una disminución de la CE. Para el evento E2 la reducción es

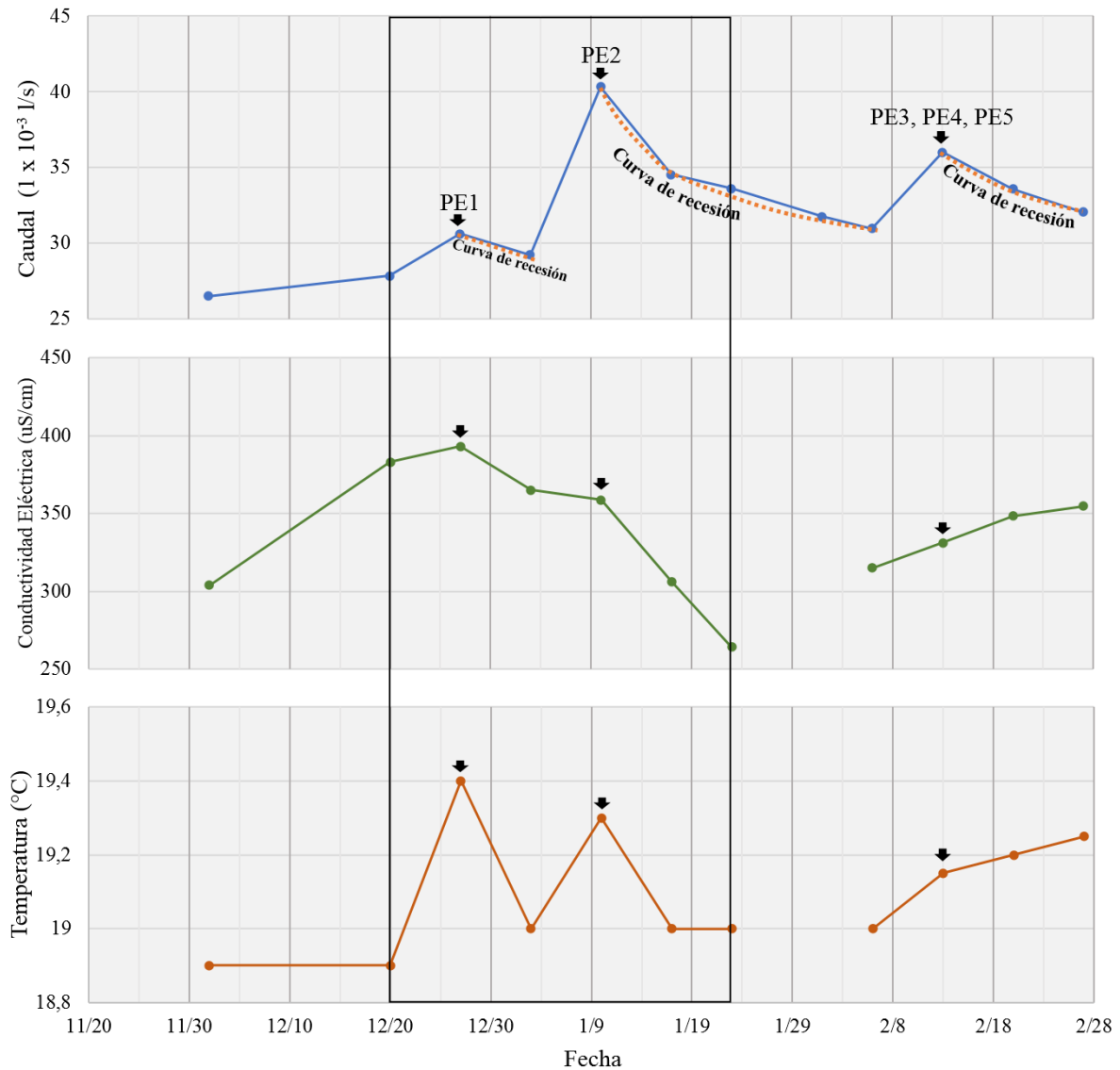
significativa, ya que causa que la CE llegue al valor mínimo medido durante el monitoreo (264.3 uS/cm). La entrada de un gran volumen de agua nueva (que tiene menor CE) por estos dos eventos causa disolución al mezclarse con el agua del acuífero.

En cuanto a la temperatura (Figura 9.3.c) se observa que esta presenta también una tendencia general ascendente durante el monitoreo (de 18.9 a 19.25 °C) con dos máximos de 19.4 y 19.3 °C en diciembre 27 y enero 10. Esta tendencia ascendente es correlacionable con el incremento en el almacenamiento. La respuesta a los eventos de precipitación E1 y E2 es observable en la temperatura (T): en cada uno de ellos se observa un incremento inicial de la T durante el tiempo de concentración, y una disminución durante la recesión. El efecto neto en la temperatura es un incremento de esta: la temperatura antes de los eventos era 18.9 °C y después de los eventos es 19.0 °C

Analizando la tendencia general y los eventos de recarga temporal, se puede decir que por un lado la CE aumenta cuando el almacenamiento aumenta mientras que disminuye por los eventos de precipitación temporal. En cuanto a la temperatura, esta responde inmediatamente a los cambios de flujo base y a la recarga temporal. El efecto de ambos es el incremento de la T del agua del acuífero.

Figura 9.3

Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF029 (acuífero Fm Manizales).



Nota. La respuesta a los eventos de precipitación se indica de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1. El recuadro indica las fechas para los dos episodios de recarga temporal descritos en el texto.

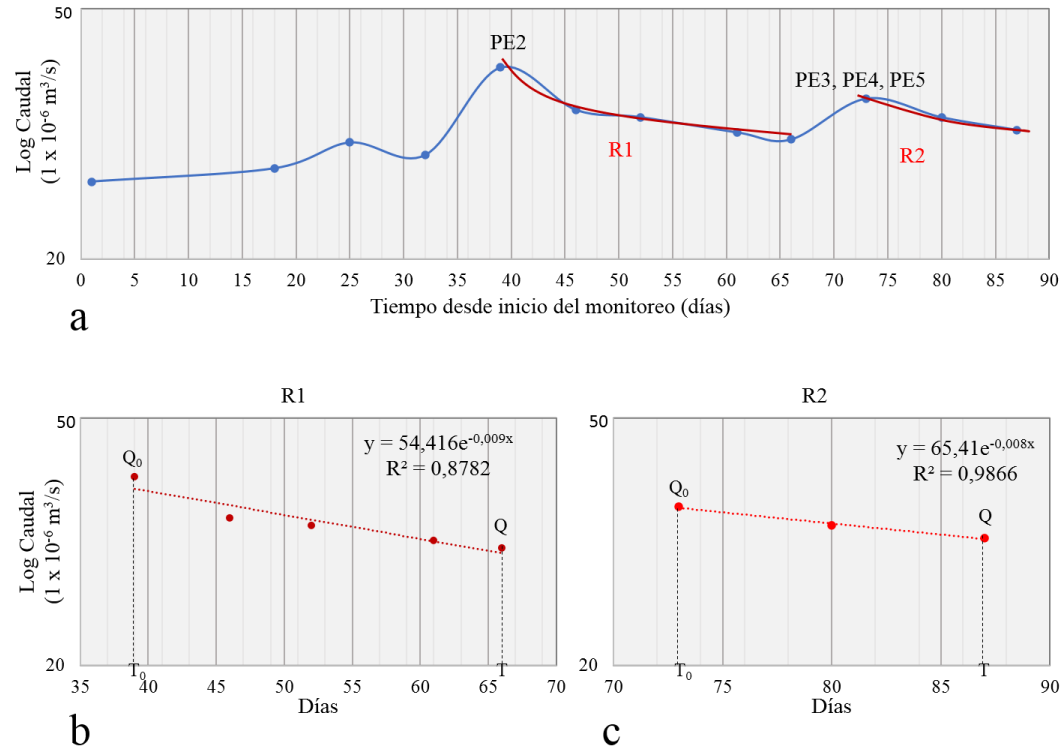
9.1.3 Análisis de la Curva de Recesión y Propiedades Hidráulicas

Del hidrograma de monitoreo se seleccionaron dos eventos de recesión (R1 que corresponde al E2 y R2 que corresponde al acumulado de los eventos E3, E4, E5) que

claramente indican un comportamiento exponencial y a los cuales se les puede ajustar la ecuación de Maillet descrita en Kresic y Bonacci (2010) , y analizada a detalle en el capítulo 4 Metodología. Los episodios de recesión se indican en la Figura 9.4 junto a los cálculos para cada segmento. El valor del coeficiente α fue calculado usando la regresión exponencial en Microsoft Excel, el cual arroja además el coeficiente de correlación.

Figura 9.4

Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para dos periodos de recesión para el manantial LF029 (acuífero Fm. Manizales)



Nota. (a) Curva semilogarítmica del hidrograma. PE2 y PE3, PE4, PE5 indican el pico de los eventos de precipitación, R1 y R2 indican las curvas de recesión correspondientes. (b, c) muestran los resultados de cada regresión, los valores de α y el coeficiente de correlación (R^2).

El valor del coeficiente α obtenido para ambas curvas es similar (0.0091/día para R1 y 0.0081/día para R2) y el valor de C es de 111 y 125 días, respectivamente. Los coeficientes de correlación obtenidos (R^2), de 0.88 para R1 y 0.99 para R2 indican que los segmentos seleccionados se ajustan a una curva exponencial y son válidos para calcular α . Los valores de C indican que el área del acuífero que alimenta este manantial tiene una capacidad media a alta de regulación, comparada con las otras unidades acuíferas de la zona.

9.1.4 Cálculo del Volumen Almacenado en el Acuífero al Comienzo de la Recesión

El volumen almacenado por encima del nivel (topográfico) del manantial, al comienzo de la recesión, se determina considerando una relación inversa entre este volumen y el coeficiente de recesión α :

$$V = \Delta Q / \alpha.$$

Donde ΔQ ($m^3/día$) es la diferencia de caudal inicial (Q_0) y final (Q) de la recesión, α es el coeficiente de recesión calculado y V es el volumen (m^3).

Los resultados obtenidos para el manantial LF029 se presentan en la Tabla 9.3. Los valores obtenidos para E2 y el evento acumulado E3, E4, E5 son de 82.66 y 41.12 m^3 respectivamente. Estos valores son altos junto al manantial LF077 (Depósitos de caída Piroclástica) respecto a los valores de volumen almacenado al comienzo de la recesión en otros manantiales, de las otras unidades acuíferas de la microcuenca, como se discutirá en el capítulo siguiente.

Tabla 9.3

Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizadas para el manantial LF029 (acuífero Fm. Manizales)

Parámetro	R1	R2
Qo (m ³ /día)	3.4836	3.1095
Q (m ³ /día)	2.6749	2.7708
Delta Q (m ³ /día)	0.8087	0.3386
α (1/día)	0.0098	0.0082
Vt (m ³)	82.66	41.12

Nota. Qo: caudal inicial, Q: caudal a un tiempo determinado, Delta Q: diferencia entre Qo y Q, α : coeficiente de recesión, Vt: volumen total.

9.2 Acuífero Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande (AQG)

Para este acuífero se seleccionaron los manantiales LF017 y LF094, ambos clasificados como manantiales de fractura. El manantial LF017 se encuentra a una altitud de 1971.3 msnm en la parte media/baja de la microcuenca, cercano a la desembocadura de las aguas al Río Chinchiná. El manantial LF094 se encuentra ubicado en la parte alta de la microcuenca, en la zona de influencia de la zona de la Falla El Perro, a una altitud de 2195.6 msnm (Figura 9.1).

9.2.1 Descripción General del Hidrograma y Respuesta a la Precipitación

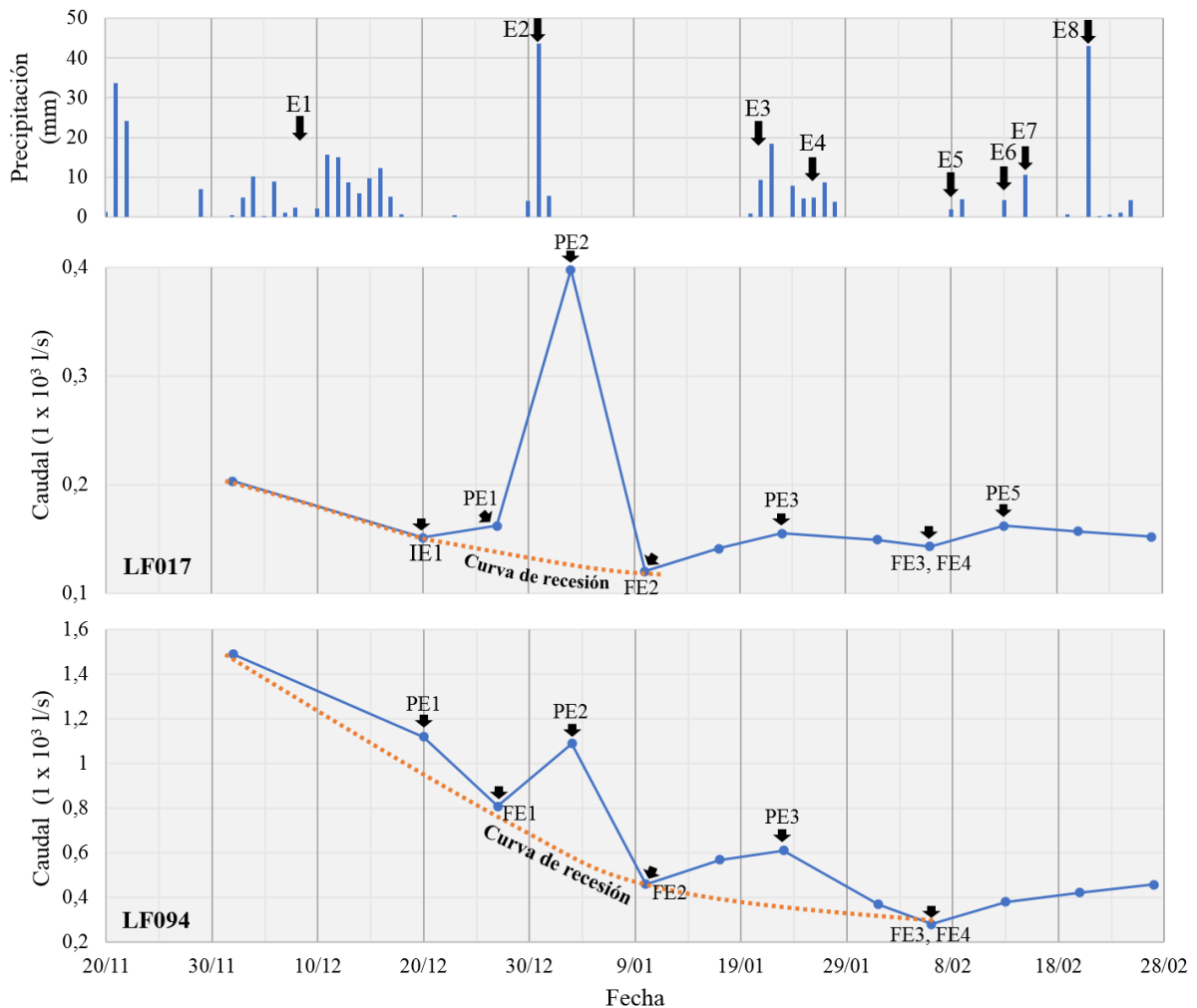
El caudal medido en el manantial LF017 durante el monitoreo se encuentra entre 0.12×10^{-3} y 0.39×10^{-3} l/s, mientras que para el manantial LF094 varía entre 0.28×10^{-3} y 1.49×10^{-3} l/s. Los resultados de las mediciones para todas las campañas de monitoreo se encuentran en el Anexo F. El valor del caudal del manantial LF094 es

casi tres veces más alto que el del LF017, y probablemente este valor está influenciado por su localización en la zona de falla.

Los hidrogramas obtenidos para ambos manantiales se presentan en la Figura 9.5. En esta se observa que, pese a la diferencia en los rangos de caudales, el comportamiento en ellos durante el monitoreo es similar.

Figura 9.5

Hietograma de la estación Niza (a) e hidrogramas para manantial LF017 (b) y manantial LF094 (c) del acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande



Nota. E1 a E8 indican los eventos de precipitación en el hietograma. La respuesta a cada evento se indica en el hidrograma de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

Los dos hidrogramas (Figura 9.5 b y c) presentan una tendencia decreciente del flujo base desde el comienzo del monitoreo (con caudales iniciales de 0.20×10^{-3} l/s para el LF017 y 1.49×10^{-3} l/s para el LF094). Esta tendencia se extiende hasta el 10 de enero y el 6 de febrero respectivamente, alcanzando mínimos de 0.12×10^{-3} y 0.28×10^{-3} l/s respectivamente. A partir de estas fechas se observa una recuperación del flujo base, alcanzando valores de 0.15×10^{-3} y 0.46×10^{-3} al final del monitoreo. En ambos manantiales se observan tres picos de caudal los cuales se dan como respuestas a los eventos de precipitación E1, E2, E3. En el manantial LF017 se observa un pico de caudal más debido al evento E5. Para el caso del E4, este no presenta un pico de caudal observable, sino que hace parte de la curva de recesión del E3. Los efectos de los eventos E6, E7 y E8 no fueron observados durante el periodo de monitoreo.

En general se puede decir que para estos manantiales se observa una pérdida del almacenamiento de agua desde y durante el mes de diciembre hasta los primeros diez días de enero (LF017) y hasta los primeros seis días de febrero (LF094), con una leve recuperación en el resto del tiempo del monitoreo.

En la Figura 9.5 se observa que los eventos E2, E3 y E5 generaron hidrogramas individuales en el manantial LF017 mientras que los eventos E1, E2 y E3 generaron hidrogramas en el LF094. Los efectos de los eventos E6, E7 y E8 no fueron observados durante el periodo de monitoreo en ninguno de estos manantiales. Los tiempos de inicio de la respuesta a cada evento de precipitación (IE), al pico del evento (PE), llamado tiempo de concentración y el final de la respuesta (FE), llamado tiempo de recesión, fueron medidos y tabulados como se indica en la Figura 9.5 y en la Tabla 9.4.

Los eventos de precipitación sucedidos durante el tiempo de recesión general causaron recarga temporal ya que se generan picos e hidrogramas individuales, aunque

no causaron incremento neto del almacenamiento del acuífero: en la Figura 9.5 se puede observar que el caudal al inicio de la respuesta (IE) a los eventos de precipitación es menor que el caudal al finalizar los mismos (FE). Considerando la larga duración de la recesión inicial y al compararla con el hidrograma modelado de la Quebrada El Perro, se interpreta que esta está reflejando la salida del agua recargada durante el segundo periodo de lluvias entre los meses de agosto y noviembre.

Tabla 9.4

Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma de los manantiales LF017 y LF094 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)

Manantial LF017							
Evento de precipitación	Fechas del evento Centroeide	Total precipitación (mm)	Intensidad de la precipitación (mm/d)	Tiempo al inicio de la respuesta (IE), en días	Tiempo de concentración (PE), en días	Duración de la recesión (días)	% Incremento del caudal *
	Nov 29-Dic 18,						
E1	Dic 9.	109.6	6.45	12	19	**	35.00
	Dic 30- Ene 1,						
E2	Dic 31.	52.8	17.60		4	8	231.66
	Ene 20-22,						
E3	Ene 21.	28.6	9.53		3	15	29.17
	Ene 24-28,						
E4	Ene 26.	29.6	5.92				
	Feb 8-9,						
E5	Feb 8.	6.2	3.10		6	≥15	35.00
Manantial LF094							

Evento de precipitación	Fechas del evento Centroide	Total precipitación (mm)	Intensidad de la precipitación (mm/d)	Tiempo al inicio de la respuesta (IE), en días	Tiempo de concentración (PE), en días	Duración de la recesión (días)	% Incremento del caudal *
E1	Nov 29-Dic 18, Dic 9.	109.6	6.45		12	8	300.00
E2	Dic 30- Ene 1, Dic 31.	52.8	17.60		4	8	289.28
E3	Ene 20-22, Ene 21.	28.6	9.53		3	15	117.85

Nota: El porcentaje de incremento en el caudal* se hace con base en el valor mínimo obtenido durante el tiempo de monitoreo. El símbolo ** significa que no se evidencia la duración de la recesión para este evento en específico.

Los cálculos indican que los tres hidrogramas individuales son efectos causados por la recarga de eventos con totales de precipitación entre 6.2 y 109 m. El aumento temporal del caudal con respecto al mínimo medido durante el monitoreo es entre 29.17 a 231.66% para LF017 y entre 117.85 a 300% para LF094. Para los hidrogramas comunes en los dos manantiales (respuesta a los eventos E2 y E3) La duración de los tiempos de concentración y de recesión son iguales.

Con la información identificada en estos hidrogramas la relación entre la magnitud e intensidad de la precipitación con los valores de los máximos y la duración de las curvas de recesión no es claramente identificada. El evento de mayor intensidad (E2) causó los mayores incrementos en caudal en los dos manantiales (231.66% para el LF017 y 289.28% para el LF094), sin embargo, la duración de la recesión es más corta (8 días)

que para el hidrograma del evento E3 (15 días), el cual tiene un pico de caudal de menor magnitud que el asociado a E2.

9.2.2 Análisis Multitemporal de la Conductividad Eléctrica (CE) y Temperatura (T)

Los resultados de las mediciones de estos dos parámetros en los manantiales LF017 y LF094 se presentan en las Figuras 9.6 (b y c) y 9.7 (b y c), respectivamente.

Manantial LF017: Al comienzo del monitoreo, la CE presenta el valor más bajo (56 uS/cm) y sigue una tendencia ascendente hasta enero 3 donde alcanza un máximo de 260 uS/cm. Desde esta fecha y hasta febrero 6 se observa un descenso hasta alcanzar un valor mínimo de 230 uS/cm. De febrero 6 a febrero 27 la CE tiene una tendencia ascendente hasta tener un valor de 259 uS/cm.

Comparando la serie multitemporal de CE con el hidrograma (Figura 9.6.b) se observa que la tendencia ascendente de diciembre sucede cuando el acuífero está perdiendo almacenamiento, mientras que la tendencia ascendente de febrero sucede cuando el acuífero está ganando en almacenamiento. El periodo de decrecimiento de la CE sucede durante la recesión del evento E2 y durante toda la respuesta al evento E3. Estas respuestas indican que la mineralización del acuífero no responde de manera inmediata a los cambios en el almacenamiento general, o a la recarga temporal.

Una explicación a este comportamiento es que la tendencia ascendente durante diciembre refleja la remoción paulatina del agua recargada durante el segundo periodo (agosto a noviembre) de precipitación en la microcuenca y que el agua que se está descargando proviene de áreas de mayor tiempo de circulación (mayor CE). Los eventos E2 y E3 causan una disminución de la CE por la recarga de agua “nueva” (menor CE), este efecto dura hasta febrero 6. El incremento en la CE a partir de ese momento se debe a que el manantial empieza a drenar agua “vieja” otra vez. Finalmente, aunque el evento

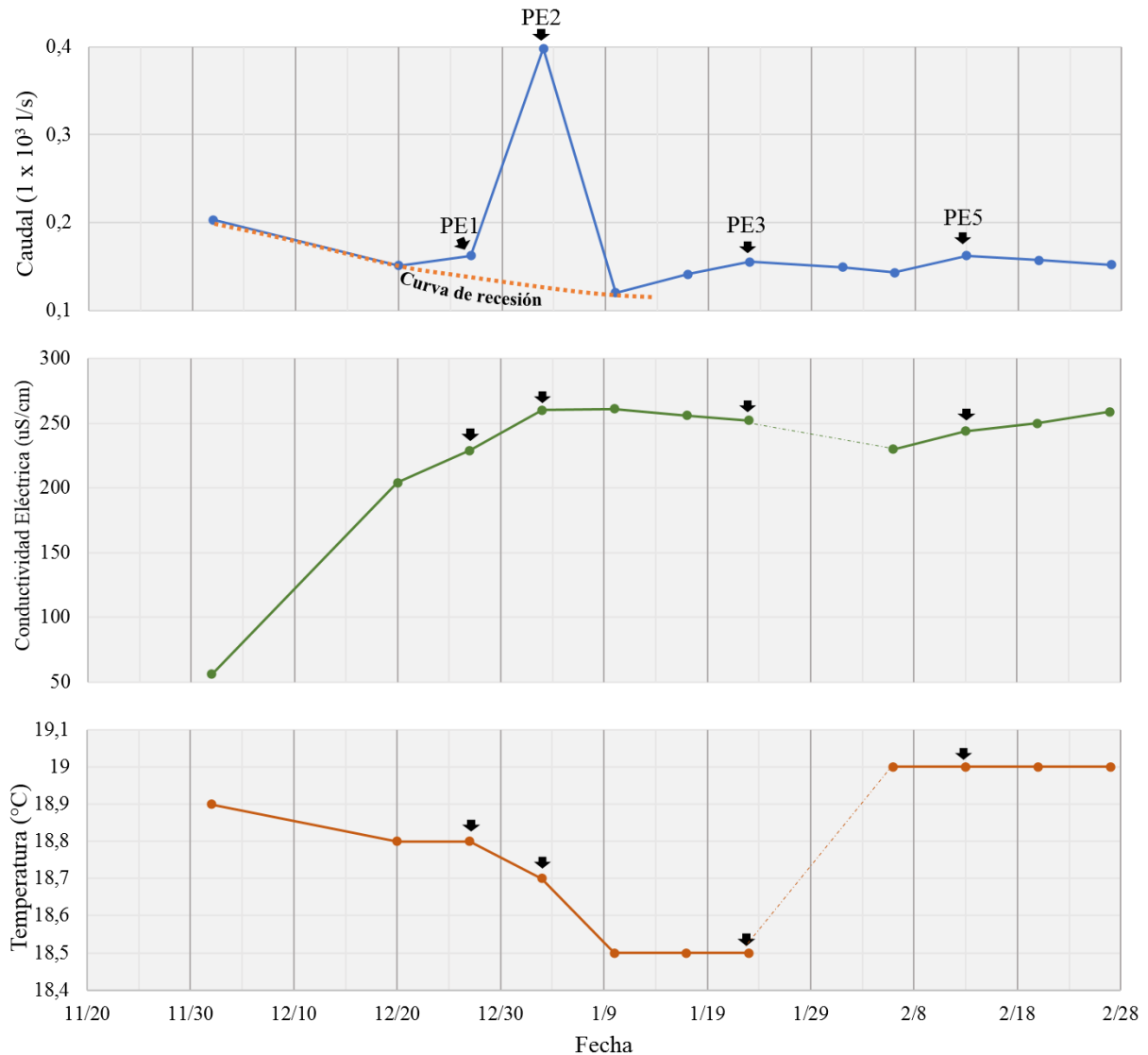
E5 genera un hidrograma, el aumento de caudal es muy pequeño, por lo que se esperaría que la cantidad de agua recargada no sea suficiente para causar una disolución significativa y, por consiguiente, disminuir la CE.

En cuanto a la temperatura, en la Figura 9.6.c se observa que contrario a la CE, esta presenta una tendencia decreciente desde diciembre 2 (18.9 °C) hasta enero 10 (18.5 °C). Desde enero 10 a enero 23 la T se estabilizó en 18.5 °C. De enero 23 a febrero 6 el valor se incrementa a 19 °C, el cual se mantiene estable hasta el fin del monitoreo.

La respuesta a los eventos de recarga temporal por los eventos E1 y E2 es observable en la temperatura: en cada uno de ellos se observa un incremento inicial durante el tiempo de concentración, y una disminución durante la recesión, reflejados como cambios en la pendiente de la curva. El efecto neto de la recarga por estos dos eventos es la disminución en la temperatura. El aumento en el almacenamiento del acuífero desde enero 10 hasta finales de febrero en general es representado por un incremento de 0.5 °C en la temperatura (enero 23 a febrero 6), fecha a partir de la cual la T permanece constante. De esto se puede decir que los cambios rápidos en la temperatura suceden cuando hay recarga por eventos de alta intensidad.

Figura 9.6

Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF017 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)



Nota. La respuesta a los eventos de precipitación se indica de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

Manantial LF094: La CE medida para este manantial se encuentra en el rango de agua salobre (>2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). La localización en la zona de influencia de la Falla El Perro puede ser una de las causas para esto, ya que el manantial puede ser la salida de

aguas de circulación muy profunda, aunque no se descarta la posibilidad de que esté afectado por contaminación antrópica.

Los datos de la CE y temperatura se presentan en la Figura 9.7 (b y c). Las mediciones de CE comienzan con un valor constante de 3999 hasta diciembre 20. Entre diciembre 20 hasta el fin del monitoreo la CE oscila casi semanalmente entre 3999 y 3500 y regresa al valor de 3999 uS/cm al finalizar el monitoreo. Al analizar las características del instrumento se encontró que 3999 uS/cm es el límite de detección superior. Por ello, las medidas que se registran como 3999 uS/cm deben ser en realidad más altas.

Con estas consideraciones y al comparar la gráfica multitemporal de la CE con el hidrograma (Figura 9.7.b) se estima que la CE tiene una tendencia decreciente durante la recesión general (pérdida del almacenamiento de agua) y una tendencia ascendente durante el periodo de incremento en el almacenamiento en febrero.

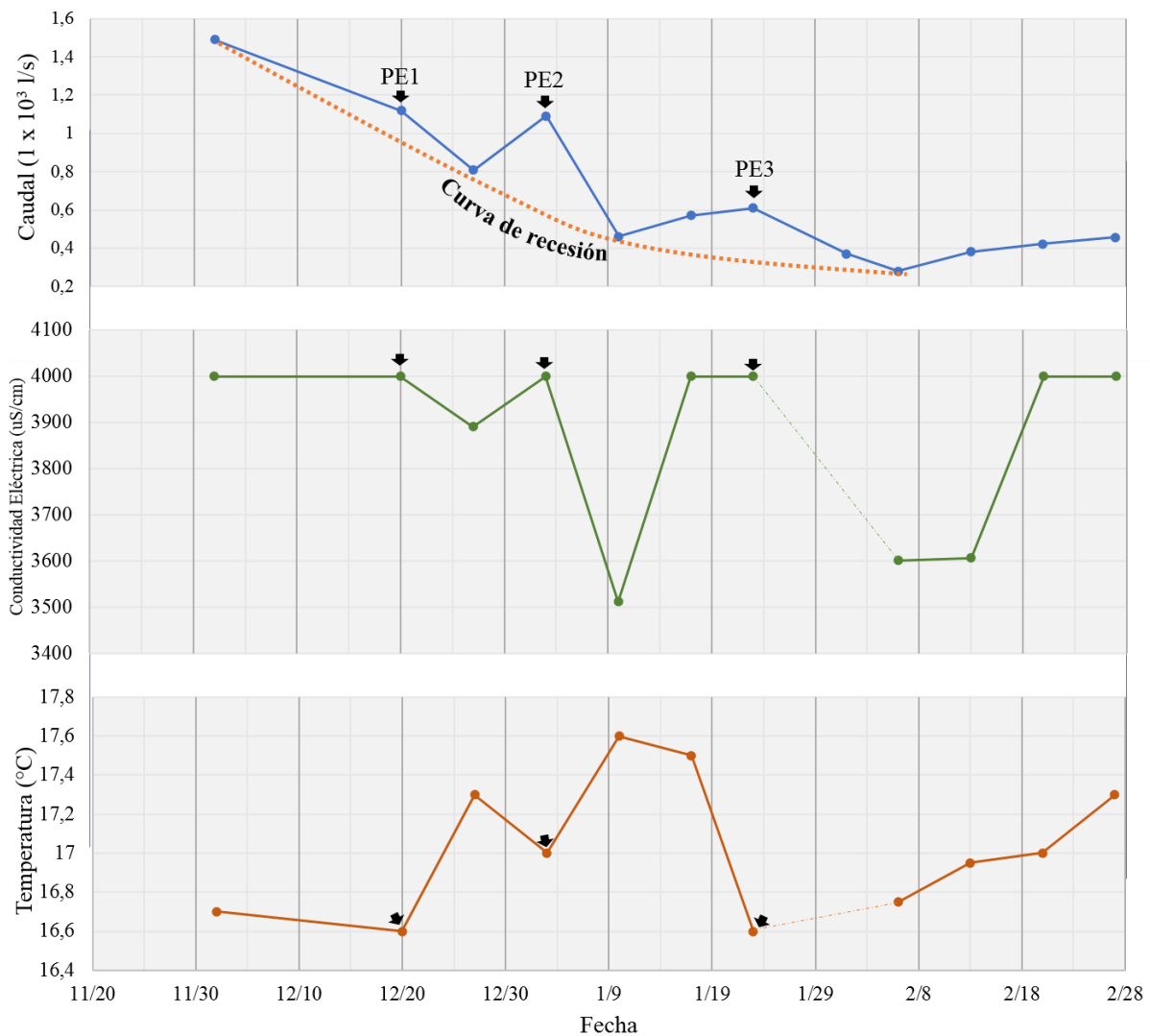
En cuanto a la temperatura, en la Figura 9.7.c se observa que el monitoreo inicia con un valor 16.7 °C siguiendo una tendencia descendente hasta diciembre 20 llegando a 16.6 °C. De diciembre 20 a enero 23 se observan dos picos (diciembre 27 de 17.3 °C y en enero 10 de 17.6 °C). De enero a 23 a febrero 27 la tendencia de la temperatura es ascendente, alcanzando un valor máximo de 17.3 °C). Al comparar estos datos con el hidrograma se observa que la tendencia decreciente de la temperatura se correlaciona con el tiempo de recesión general (perdida de almacenamiento) y la tendencia ascendente con el incremento del flujo base.

Los efectos de recarga temporal por la precipitación son observables para los eventos E1 y E2. Estos causan un incremento en la temperatura mucho más significativo, comparado con el manantial LF017. En este caso, aunque estos dos eventos aumentan de manera temporal la temperatura del agua, esta regresa posteriormente a la tendencia

general decreciente. Los picos de temperatura se registraron una semana después a los picos del hidrograma.

Figura 9.7

Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF094 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)



Nota. La respuesta a los eventos de precipitación se indica de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

9.2.3 Comparación de Resultados de Caudal y Propiedades Hidroquímicas entre los Manantiales

El caudal del LF094 es casi dos veces el valor en LF017. La CE del LF094 es casi diez veces mayor que la del LF017. Estas diferencias pueden ser el resultado de la localización del LF094 en la zona de la Falla El Perro, la cual puede estar incrementando la permeabilidad del acuífero (que permite una circulación más rápida del agua y un decrecimiento de la temperatura debido a esto) y la calidad química del agua.

A pesar de estas diferencias, la tendencia de la CE es similar para ambos manantiales ya que presentan valores decrecientes con la recesión general y valores crecientes con la recarga temporal (ver periodos de diciembre 2 a enero 10 y de enero 10 a febrero 27 para el manantial LF017, diciembre 2 a febrero 6 y febrero 6-27 para el manantial LF094). La temperatura en el LF017 se estabilizó en dos periodos de mediciones durante el monitoreo, hasta el momento no se encuentra una explicación clara para ello.

9.2.4 Análisis de la Curva de Recesión y Propiedades Hidráulicas

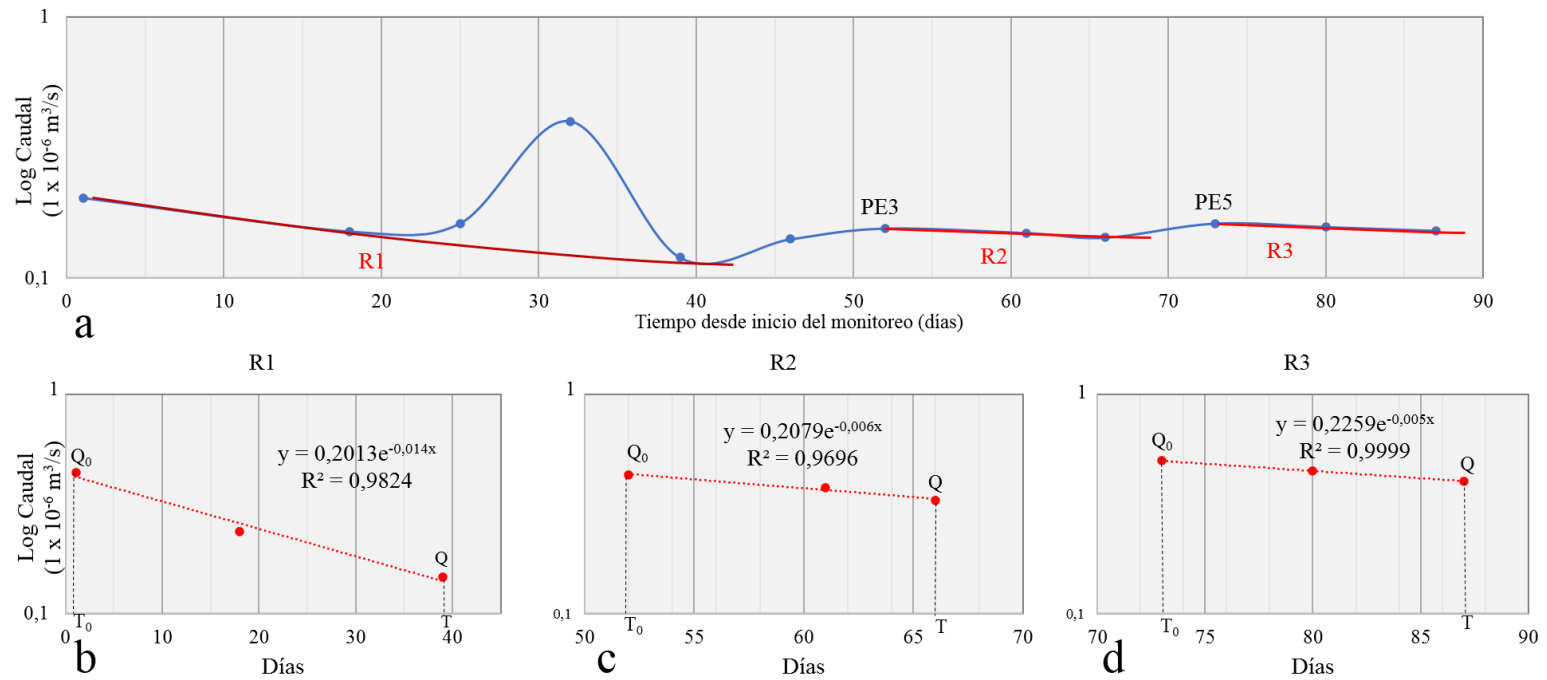
Manantial LF017: Para este se analizaron 3 curvas de recesión, las cuales se indican en la Figura 9.7, con sus respectivos resultados. La curva R1 representa la recesión general y refleja la pérdida del agua almacenada después de la temporada de lluvias entre agosto y noviembre. El valor de α obtenido es 0.014/día y de C es 71.4 días.

Las curvas R2 y R3 indican la recesión sucedida después de los eventos de precipitación E3 y E5, los valores de α obtenidos para las curvas de recesión R2 y R3 (0.006/día y 0.005/día) son similares entre ellos, pero un orden de magnitud más pequeños que el valor de R1. Los valores de C son 166.7 días y 200 días respectivamente.

La diferencia entre el valor obtenido para la curva de recesión general y la recesión por eventos de recarga temporal pueden estar indicando que el coeficiente está midiendo aspectos diferentes del acuífero. El coeficiente C de la recesión general es representativo de la capacidad de regulación del acuífero, el cual depende de la porosidad efectiva y la conductividad hidráulica. El coeficiente C de los eventos de recarga temporal está reflejando más la capacidad de circulación del agua en el acuífero.

Figura 9.8

Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para tres periodos de recesión para el manantial LF017 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)

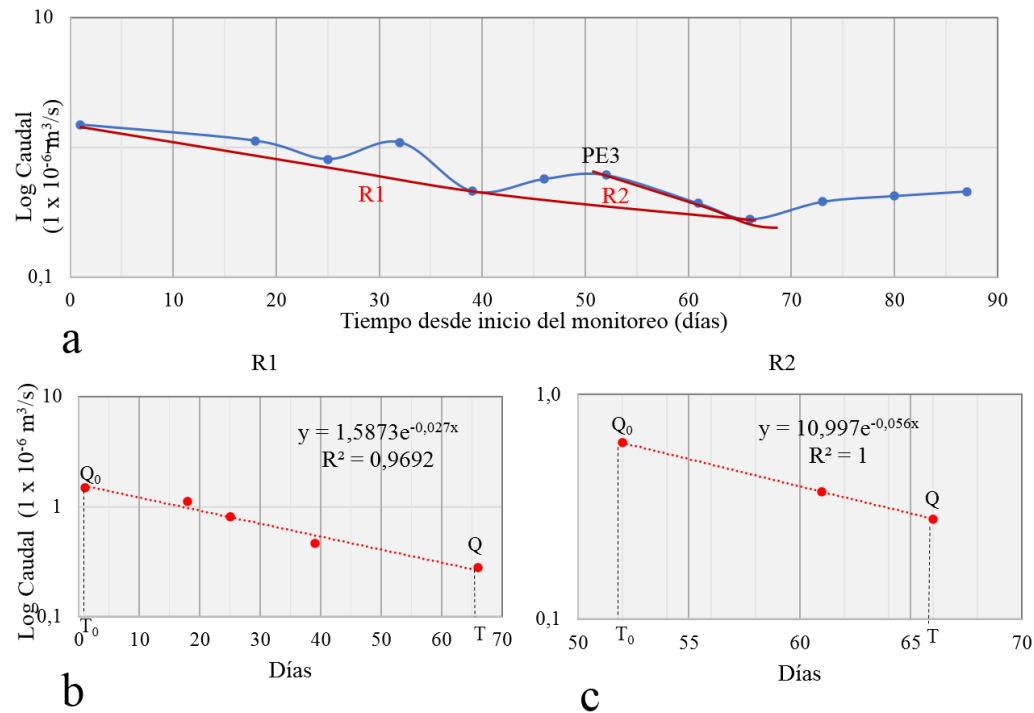


Nota. (a) Curva semilogarítmica del hidrograma. PE3 y PE5 indican el pico de los eventos de precipitación, R2 y R3 indican las curvas de recesión correspondientes. R1 representa la curva de recesión general. Las gráficas (b, c, d) indican los resultados de la regresión, los valores de α y el coeficiente de correlación (R^2).

Manantial LF094: Del hidrograma se seleccionaron 2 curvas de recesión las cuales se indican en la Figura 9.9, con sus respectivos resultados. La curva R1, como en LF017 representa la recesión general debida a la perdida de agua almacenada durante el segundo periodo de lluvias en la zona. La curva R2 indica la recesión que sucede después de la recarga temporal por el evento de precipitación E3. El valor de α obtenido para ambas curvas es 0.027/día y 0.056/día, y el valor de C es de 37 y 17.8 días. Estos valores indican capacidad de regulación muy baja, comparado con LF017 y los manantiales de las demás unidades acuíferas.

Figura 9.9

Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para dos periodos de recesión para el manantial LF094 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)



Nota. (a) Curva semilogarítmica del hidrograma. PE3 indica el pico del evento de precipitación, R2 indica la curva de recesión correspondiente. R1 representa la curva de recesión general. Las gráficas (b, c) indican los resultados de la regresión, los valores de α y el coeficiente de correlación (R^2).

9.2.4.1 Resumen de los Valores de C Obtenidos para el Acuífero Miembro Sedimentario del Complejo Quebradagrande. La Tabla 9.5 presenta el compilado de la capacidad de regulación (C) obtenido para los dos manantiales del acuífero miembro sedimentario de Complejo Quebradagrande, agrupados por respuesta a eventos similares.

Tabla 9.5

Compilado de las capacidades de regulación (C) para los manantiales del acuífero miembro sedimentario de Complejo Quebradagrande

Manantial	RG (días)	E1	E2	E3 (días)	E4	E5 (días)
LF017	71.4			166.7		200
LF094*	37			17.8		

Nota. El símbolo * indica que este manantial se encuentra localizado en la zona de la Falla El Perro. RG representa la recesión larga (o general) debida a la pérdida de agua almacenada durante el segundo periodo de lluvias en la zona. E1, E2, E3, E4, E5 indica eventos de precipitación.

De la tabla se observa que los valores de C para los dos manantiales de este acuífero, son muy diferentes. Por un lado, los valores para el manantial LF094 son bajos mientras que los valores para el manantial LF017 son altos. No es posible realizar una comparación entre estos dos manantiales para caracterizar la homogeneidad o heterogeneidad y capacidad de regulación del acuífero, debido a que uno de ellos (LF094) se encuentra ubicado en la zona de falla.

El manantial en la zona de falla indica una capacidad de regulación más baja. Esto indicaría que la falla está afectando tanto la porosidad efectiva como la permeabilidad.

9.2.5 Cálculo del Volumen Almacenado en el Acuífero al Comienzo de la Recesión

En el manantial LF017, los valores obtenidos para la curva de recesión general y los eventos E3 y E5 son de 0.53, 0.18 y 0.19 m³ respectivamente (ver Tabla 9.6). Estos valores son los más bajos respecto a los valores de volumen almacenado al comienzo de la recesión en otros manantiales, de las otras unidades acuíferas de la microcuenca, como se discutirá en el capítulo siguiente.

Tabla 9.6

Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de curvas de recesión analizadas para el manantial LF017 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)

Parámetro	R1	R2	R3
Qo (m ³ /día)	0.0175	0.0133	0.0139
Q (m ³ /día)	0.0103	0.0123	0.0131
Delta Q (m ³ /día)	0.0071	0.0010	0.0008
α (1/día)	0.0135	0.0058	0.0046
Vt (m ³)	0.53	0.18	0.19

Nota. Qo: caudal inicial, Q: caudal a un tiempo determinado, Delta Q: diferencia entre Qo y Q, α: coeficiente de recesión, Vt: volumen total.

En el manantial LF094, los valores obtenidos para la curva de recesión general y el evento E3 son de 4.13 y 0.51 m³ respectivamente (ver Tabla 9.7). Estos valores son bajos respecto a los valores de volumen almacenado al comienzo de la recesión en otros manantiales, de las otras unidades acuíferas de la microcuenca, como se discutirá en el capítulo siguiente.

Tabla 9.7

Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizadas para el manantial LF094 (acuífero miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande)

Parámetro	R1	R2
Qo (m ³ /día)	0.1287	0.0527
Q (m ³ /día)	0.0241	0.0241
Delta Q (m ³ /día)	0.1045	0.0285
α (1/día)	0.0253	0.0556
V (m ³)	4.13	0.51

Nota. Qo: caudal inicial, Q: caudal a un tiempo determinado, Delta Q: diferencia entre Qo y Q, α : coeficiente de recesión, Vt: volumen total.

Debido a que los valores de volumen de agua almacenado al inicio de la curva de recesión para ambos manantiales de esta unidad son de bajos a muy bajos con respecto a los manantiales de las otras unidades acuíferas, esto podría indicar que el acuífero del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande tiene una baja capacidad de almacenamiento y baja conductividad hidráulica.

9.3 Acuífero Depósitos de Caída Piroclástica, Parte Superior

Para este acuífero se monitorearon 4 manantiales (LF003, LF063, LF077 y LF110), todos clasificados como manantiales de contacto. El manantial LF077 se encuentra ubicado en el nacimiento de un tributario a una altura de 2335.4 msnm, el LF063 se encuentra a una altitud de 2119.7 msnm, mientras que el LF003 se encuentra en la parte media de la microcuenca a una altura de 2073.4 msnm. el LF110 se

encuentra en la parte alta de la microcuenca, en la zona de influencia de la Falla El Perro, a una altitud de 2178.2 msnm (ver Figura 9.1)

9.3.1 Descripción General del Hidrograma y Respuesta a la Precipitación

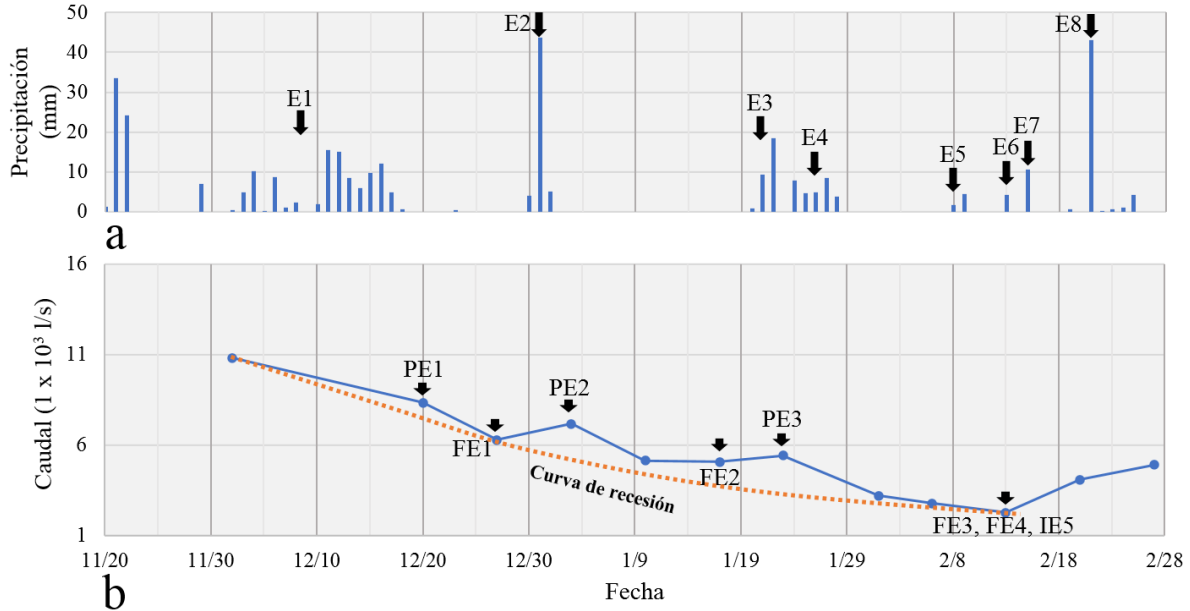
El rango de caudal es variable para los manantiales monitoreados en este acuífero: El manantial LF003 presenta valores entre 2.27×10^{-3} y 10.81×10^{-3} l/s. El manantial LF063 presenta los valores de caudal más pequeños (0.77×10^{-3} y 4.72×10^{-3} l/s) de los cuatro manantiales pertenecientes a esta unidad. Y el manantial LF077 tiene valores de 24.30×10^{-3} y 36.92×10^{-3} l/s, para el manantial LF110 se midieron caudales entre 352.73×10^{-3} y 427.35×10^{-3} l/s considerados los valores más altos de todos los manantiales monitoreados, los cuales pueden estar influenciados por su localización en la zona de falla. Los resultados de todas las mediciones se encuentran en el Anexo F.

A continuación, se describen cada uno de los manantiales.

Manantial LF003: El hidrograma obtenido para este manantial se presenta en la Figura 9.10, este comienza con un valor alto de caudal 10.81×10^{-3} l/s el cual sigue una tendencia descendente hasta el 13 de febrero, alcanzando un mínimo de 2.27×10^{-3} l/s. A partir de esta fecha se observa la recuperación en el caudal alcanzando un valor de 4.92×10^{-3} l/s al final del monitoreo. Además, se observan tres picos de caudal en diciembre 20 de 8.35×10^{-3} l/s, enero 3 de 7.18×10^{-3} l/s. y enero 23 de 5.43×10^{-3} l/s.

Figura 9.10

Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF003 (b) del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica



Nota. E1 a E8 indican los eventos de precipitación en el hietograma. La respuesta a cada evento se indica en el hidrograma de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

En cuanto a la influencia de la precipitación en el hidrograma de este manantial, se observa que, aunque los eventos E1, E2 y E3 está causando un pico, no se puede identificar exactamente el inicio de estas respuestas. No se observa respuesta del acuífero a los eventos E4 y E5. Los efectos de los eventos E6, E7 y E8 se reflejan como recuperación gradual del almacenamiento. Los tiempos de respuesta del caudal a los eventos E1 y E2 se presentan en la Tabla 9.8 y la Figura 9.10.

Tabla 9.8

Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma del manantial LF003 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)

Evento de precipitación	Fechas del evento <hr/> Centroide	Total precipitación (mm)	Intensidad de la precipitación (mm/d)	Tiempo al inicio de la respuesta (IE) en días	Tiempo de concentración (PE), en días	Duración de la recesión (días)	% Incremento del caudal *
E1	Nov 29-Dic 18, Dic 9.	109.6	6.45		12	8	267.84
E2	Dic 30- Ene 1, Dic 31.	52.8	17.60		4	18	216.29
E3	Ene 20-22, Ene 21.	28.6	9.53		3	22	139.20

Nota. El porcentaje de incremento en el caudal* se hace con base en el valor mínimo obtenido durante el tiempo de monitoreo.

Los cálculos indican que los tres picos de caudal son efectos causados por la recarga de eventos con totales de precipitación entre 28.6 y 109.6 mm. El aumento temporal del caudal con respecto al mínimo medido durante el monitoreo es de 139.20, 216.29 y 267.84%. A pesar de tener una cantidad total menor de precipitación, el evento E2 que es de mayor intensidad causó la respuesta más rápida (4 días de tiempo de concentración), un menor incremento del caudal (216.29%) que E1 y la curva de recesión más larga (18 días).

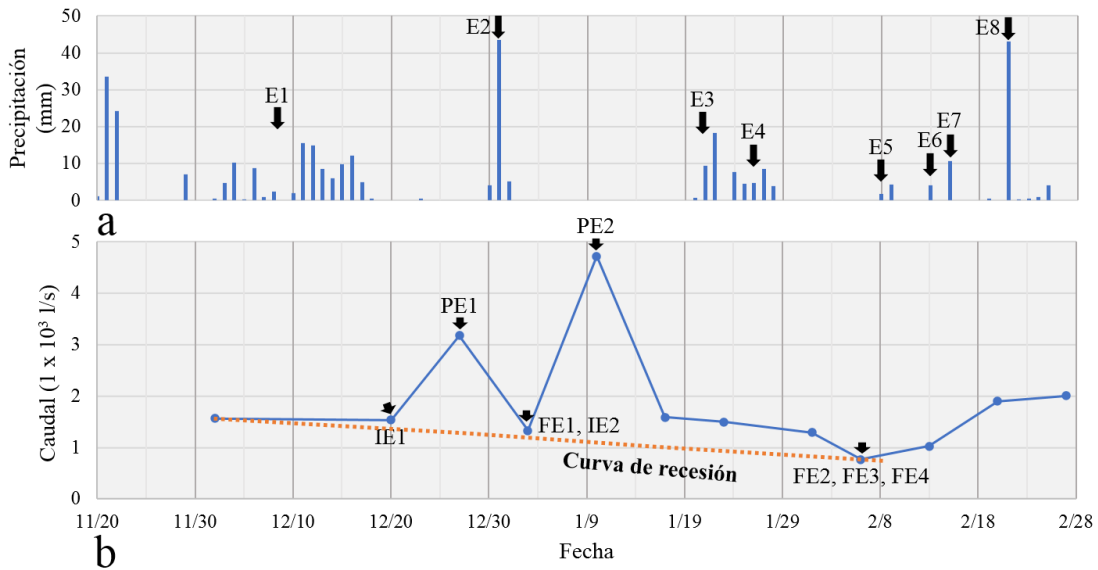
De forma general, al comparar los datos de los hidrogramas con el hietograma en la Figura 9.9 se observa que este periodo representa el periodo de recesión que resulta del drenaje del agua que fue recargada al acuífero durante el segundo periodo de lluvias

(agosto a noviembre) en la microcuenca. Esta curva es afectada temporalmente por recarga temporal, debida a los eventos de precipitación E1, E2 y E3.

Manantial LF063: El hidrograma obtenido para este manantial se presenta en la Figura 9.11, este comienza el monitoreo con un valor de caudal 1.57×10^{-3} l/s el cual sigue una tendencia descendente que dura hasta el 6 de febrero, donde se alcanza un mínimo de 0.77×10^{-3} l/s. A partir de esta fecha se observa una recuperación en el caudal alcanzando un valor de 2×10^{-3} l/s al final del monitoreo. Además, se observan dos picos de caudal en diciembre 27 de 3.18×10^{-3} l/s y enero 10 de 4.72×10^{-3} l/s.

Figura 9.11

Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma del manantial LF063 (b) del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica



Nota. E1 a E8 indican los eventos de precipitación en el hietograma. La respuesta a cada evento se indica en el hidrograma de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

En cuanto a la influencia de la precipitación en el hidrograma se observa que los eventos E1 y E2 generaron hidrogramas individuales, causando recarga temporal. Los efectos de los eventos E3, E4 no logran observarse en el hidrograma y a partir del E5 se presenta un incremento constante en el flujo base. Los tiempos de respuesta del caudal a los eventos E1 y E2 se presentan en la Tabla 9.9 y la Figura 9.11

Tabla 9.9

Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma del manantial LF063 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)

Evento de precipitación	Fechas del evento Centroide	Total precipitación (mm)	Intensidad de la precipitación (mm/d)	Tiempo al inicio de la respuesta (IE), en días	Tiempo de concentración (PE), en días	Duración de la recesión (días)	% Incremento del caudal *
E1	Nov 29-Dic 18, Dic 9.	109.6	6.45	12	19	8	312.98
E2	Dic 30- Ene 1, Dic 31.	52.8	17.60	4	11	38	454.54

Nota. El porcentaje de incremento en el caudal* se hace con base en el valor mínimo obtenido durante el tiempo de monitoreo.

En la Tabla 9.9 se observa que la recarga temporal de eventos con totales de precipitación entre 52.8 y 109.6 mm causa el desarrollo de hidrogramas individuales. El aumento del caudal por estos eventos (con respecto al mínimo medido durante el monitoreo) es entre 312.98 y 454.54%. A pesar de tener una cantidad total menor de precipitación, el evento E2 que es de mayor intensidad causó la respuesta más rápida (11

días de tiempo de concentración), mayor incremento de caudal (454.54%) y la curva de recesión más larga (38 días).

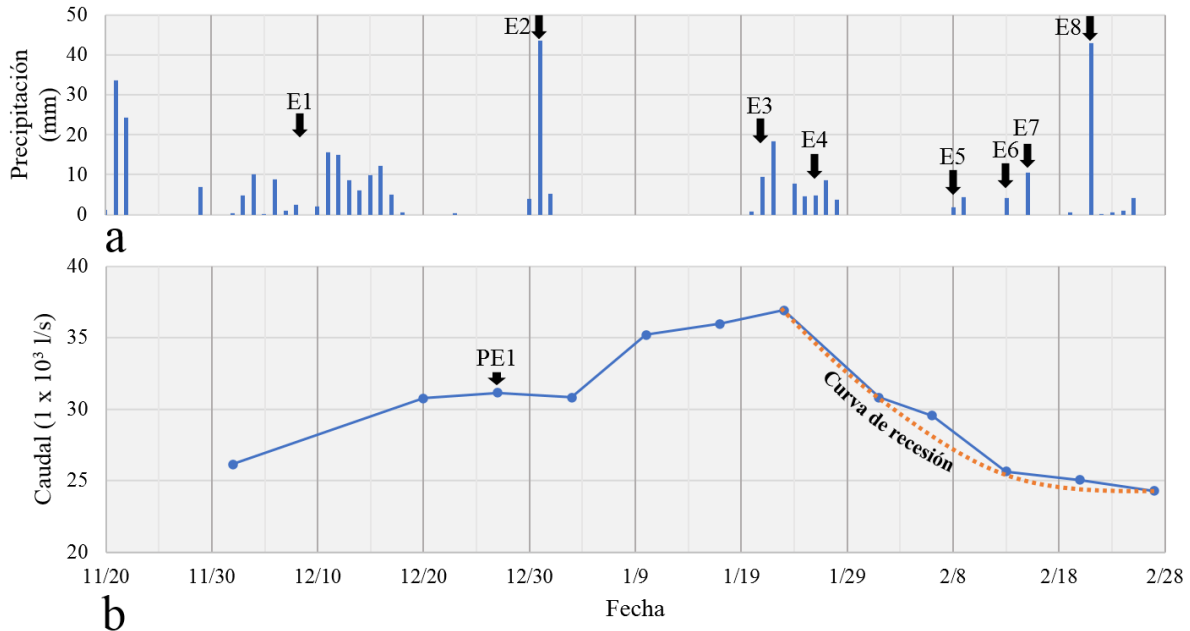
En general se puede decir que para este manantial se observa una pérdida del almacenamiento de agua desde el inicio del monitoreo hasta febrero 6, reflejada como la curva de recesión. El almacenamiento se incrementa de manera gradual en las tres últimas semanas de febrero. Considerando la larga duración de la recesión inicial y al compararla con el hidrograma modelado de la Quebrada El Perro, se interpreta que la recesión en este manantial de manera similar al LF003, está reflejando la salida del agua recargada durante el segundo periodo de lluvias entre los meses de agosto y noviembre. Los eventos E1 y E2 generan recarga temporal, sin incremento neto en el almacenamiento.

Manantial LF077: Este manantial presenta el rango más alto caudal medido en esta unidad acuífera (excluyendo el manantial LF110 que se encuentra sobre la zona de falla).

El hidrograma obtenido para este manantial se presenta en la Figura 9.12, este comienza el monitoreo con un valor de 26.14×10^{-3} l/s el cual sigue una tendencia ascendente hasta el 23 de enero, donde alcanza un valor máximo de 36.92×10^{-3} l/s. A partir de esta fecha se observa una tendencia descendente hasta alcanzar un valor mínimo de 24.30×10^{-3} l/s al final del monitoreo. Además, se observa solo un pico de caudal en enero 23 de 36.92×10^{-3} l/s.

Figura 9.12

Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF077 (b) del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica



Nota. E1 a E8 indican los eventos de precipitación en el hietograma. La respuesta a cada evento se indica en el hidrograma de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

Los efectos de los eventos de precipitación E1, E2 y E3 se observan como cambios progresivos en el caudal, sin que se generen picos significativos o hidrogramas individuales, a diferencia de lo observado en los manantiales LF003 y LF063. De forma general, el efecto de estos tres eventos es una recarga temporal sin incremento neto en el almacenamiento como se observa en la Figura 9.12, el valor de caudal al final de la curva de recesión tiene un valor menor que el que tenía al comienzo del monitoreo. Los efectos de los eventos E4 a E8 no son observables.

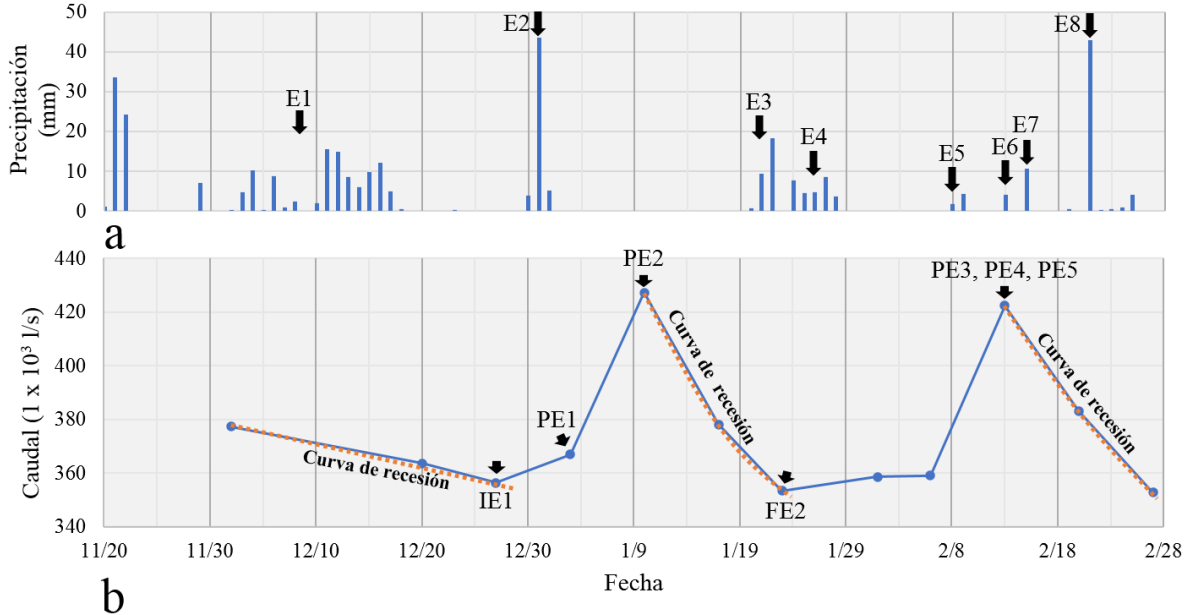
Debido al comportamiento progresivo de caudal, no fue posible describir las relaciones entre este y los eventos de precipitación individuales que sucedieron durante el monitoreo. El análisis de la curva de recesión se realizará en la sección siguiente.

Manantial LF110: Este manantial tiene el caudal más alto de los medidos toda la zona de estudio, afectado probablemente por su localización en la zona de falla.

El hidrograma obtenido para este manantial se presenta en la Figura 9.13, este comienza el monitoreo con un valor de caudal 377.36×10^{-3} l/s el cual va disminuyendo alcanzando un valor de 353.36×10^{-3} l/s en enero 23. Desde esta fecha hasta febrero 13 se observa una tendencia ascendente alcanzando un valor de 422.38×10^{-3} l/s. Desde esta fecha hasta el final del monitoreo el 27 de febrero se observa una tendencia descendente alcanzando un valor de 352.73×10^{-3} l/s. Además, en el hidrograma se observan dos picos de caudal en enero 10 de 427.35×10^{-3} l/s y febrero 13 de 422.38×10^{-3} l/s.

Figura 9.13

Hietograma de la estación Niza (a) e hidrograma para el manantial LF110 (b) del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica



Nota. E1 a E8 indican los eventos de precipitación en el hietograma. La respuesta a cada evento se indica en el hidrograma de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

Al comparar los datos de los hidrogramas con el hietograma en la Figura 9.13 se observa que, de manera similar a los manantiales LF063 y LF003, el periodo de diciembre 2 a enero 23 indica condiciones de recesión que resulta del drenaje del agua almacenada en el acuífero durante el segundo periodo de lluvias (agosto a noviembre) en la microcuenca. Esta curva es afectada por recarga temporal, debida a los eventos de precipitación E1, E2 E3, E4 y E5. Los efectos de los eventos E6, E7 y E8 no son observados durante el periodo del monitoreo.

El evento E2 y el acumulado de los eventos E3, E4 y E5 causaron picos cuya respuesta a la precipitación se puede analizar, como hidrogramas individuales. Aunque el evento E1 causó un incremento en el caudal, no generó un hidrograma individual que se

pueda analizar. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 9.13 y la Tabla 9.10.

Tabla 9.10

Relación entre los eventos de precipitación y los tiempos de respuesta en el hidrograma del manantial LF110 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)

Evento de precipitación	Fechas del evento <hr/> Centroide	Total precipitación (mm)	Intensidad de la precipitación (mm/d)	Tiempo al inicio de la respuesta (IE), en días	Tiempo de concentración (PE), en días	Duración de la recesión (días)	% Incremento del caudal *
	Nov 29-Dic 18,						
E1	Dic 9.	109.6	6.45	19	26	**	4.03
	Dic 30- Ene 1,						
E2	Dic 31.	52.8	17.60		11	14	21.15
E3+E4+E5		64.4	6.44			≥15	19.74

Nota. El porcentaje de incremento en el caudal* se hace con base en el valor mínimo obtenido durante el tiempo de monitoreo. El símbolo ** significa que no se evidencia la duración de la recesión para este evento en específico.

Los cálculos indican que los dos hidrogramas individuales son efectos causados por la recarga de eventos con totales de precipitación entre 52.8 y 64.4 mm. El aumento temporal del caudal con respecto al mínimo medido durante el monitoreo es de 21.15 y 19.74%. Considerando que estos hidrogramas son el resultado de acumulados de varios eventos de precipitación, solo fue posible medir algunos parámetros de la respuesta del acuífero a estos eventos, como se presenta en al Tabla 9.10.

9.3.1.1 Resumen de la Respuesta del Acuífero Depósitos de Caída

Piroclástica (parte superior) a los Eventos de Precipitación. Los cálculos de la respuesta a los eventos de precipitación que fueron observados para un mismo evento de precipitación en varios manantiales son sintetizados en las Tablas 9.11 y 9.12. El manantial LF077 tiene una respuesta única, por lo que no es incluido.

Tabla 9.11

Tiempos de concentración de los eventos E1 y E2 para los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica

Manantial	Tiempo de concentración (días)	
	E1	E2
LF003	12	4
LF063	19	11
LF110*		11

Nota. El símbolo * indica que este manantial se encuentra en la zona de la Falla El Perro.

Estos resultados indican que las áreas del acuífero que alimentan el manantial LF003 tienen respuestas más rápidas a los eventos de recarga que los manantiales LF063 y el LF110 (localizado en la zona de la Falla El Perro). Como se ha mencionado anteriormente, la intensidad y no el total de la precipitación es el factor determinante en cuanto a los tiempos de respuesta. El evento E2 tuvo menor volumen total pero mayor intensidad y es el que genera las respuestas más rápidas.

Tabla 9.12

Duración de la recesión de los eventos E1 y E2 para los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica

Manantial	Duración de la recesión (días)		
	2da temporada de lluvias (Recesión General)	E1	E2
LF003	73	12	4
LF063	66	19	11
LF110*	25		11

Nota. El símbolo * indica que este manantial se encuentra en la zona de la Falla El perro.

Los datos de la tabla indican que las zonas del acuífero que alimentan estos manantiales tienen propiedades hidráulicas diferentes, ya que para un mismo evento cada manantial muestra una capacidad de regulación diferente (en cuanto a la facilidad de soltar agua del almacenamiento y velocidad del agua). La respuesta a la recesión general es diferente a la respuesta por los eventos de recarga temporal. En la recesión general el manantial LF063 es el que tarda más tiempo para soltar el agua almacenada producto de la recarga por el segundo periodo de lluvias, mientras que el manantial en la zona de falla (LF110) es el que tarda menos tiempo. En cuanto a la recesión debida a eventos de recarga temporal, se observa que el LF003 remueve esta agua de manera más rápida que el LF063 y el LF110. En las secciones siguientes se explicarán las razones de esto.

9.3.2 Análisis Multitemporal de la Conductividad Eléctrica (CE) y Temperatura (T)

Los resultados de las mediciones de estos dos parámetros en los manantiales LF003, LF063, LF077 y LF0110 se presentan en las Figuras 9.14 (b y c), 9.15 (b y c), 9.16 (b y c) y 9.17 (b y c) respectivamente.

Manantial LF003: En la Figura 9.14 (b y c) se presentan los datos medidos para este punto de agua, comparado con su hidrograma. Al comienzo del monitoreo, la CE presenta un valor de 161 uS/cm y sigue una tendencia ascendente hasta diciembre 27 donde alcanza un máximo de 185 uS/cm, desde esta fecha hasta el 23 de enero la CE desciende progresivamente al valor mínimo de 135.3 uS/cm y finalmente vuelve a ascender hasta el final del monitoreo con un valor de 186.6 uS/cm.

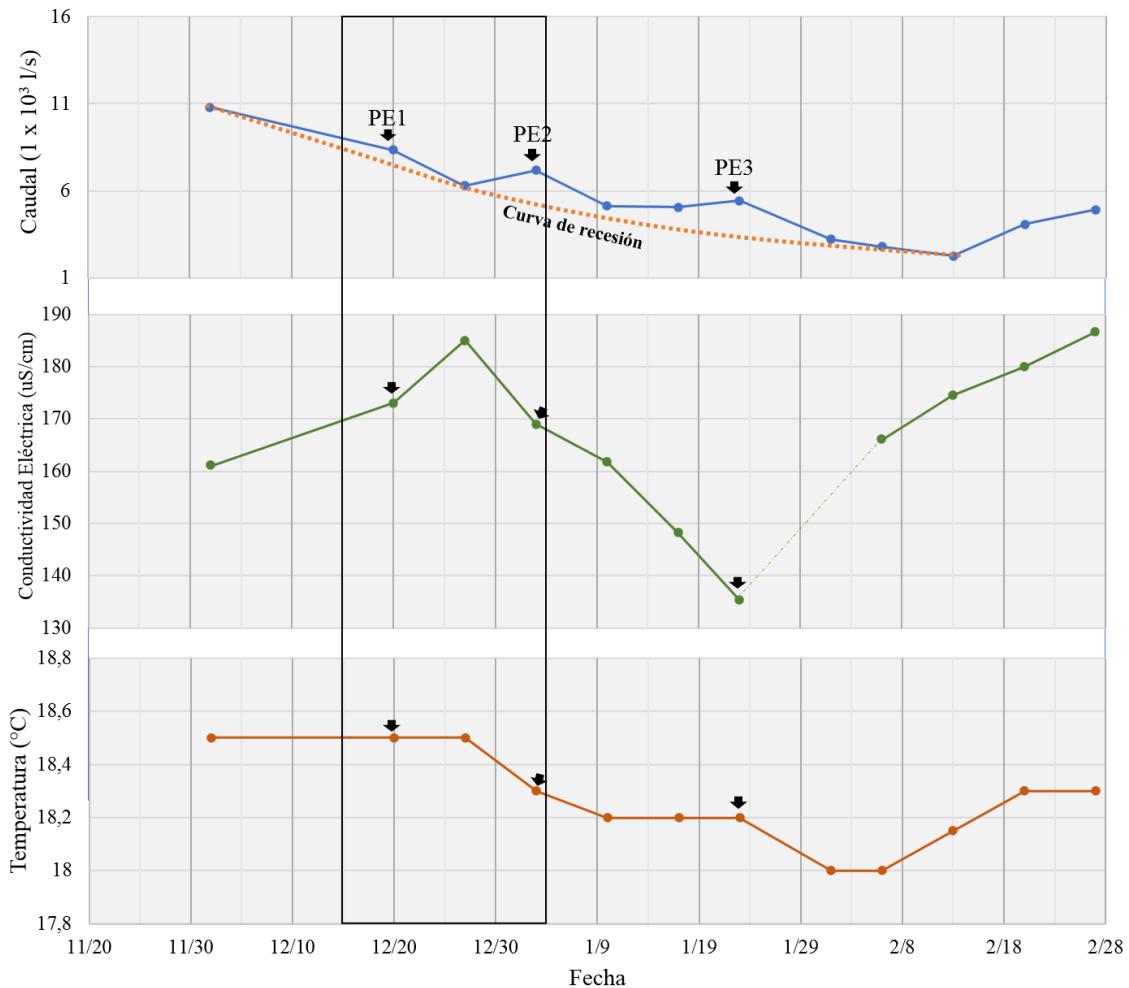
La curva multitemporal de la CE no puede correlacionarse directamente a los cambios en el almacenamiento general del acuífero. Como se mencionó anteriormente, en general la CE tiene un cambio neto positivo durante el tiempo del monitoreo. Esta tendencia es interrumpida durante el periodo de diciembre 27 a enero 23 donde se observan un decrecimiento de la CE, causado posiblemente por disolución, debido a los efectos de la entrada de agua nueva por la recarga temporal causada por los eventos E1, E2 y posiblemente E3.

Para el caso de la temperatura, en la Figura 9.14.c se observa que el monitoreo inicia con un valor de temperatura de 18.5 °C el cual se mantiene constante hasta el 27 de diciembre. Desde diciembre 27 a febrero 6 se da una tendencia decreciente, alcanzando un mínimo de 18 °C. Desde febrero 6 hasta febrero 20 la temperatura vuelve a incrementarse hasta alcanzar un valor de 18.3 °C que se mantiene hasta el final del monitoreo.

Al comparar tendencia de la temperatura con el hidrograma se observa que la temperatura está afectada principalmente por el agua de recarga de los eventos de precipitación E2 y E3, los cuales causan un decrecimiento temporal y a mediano plazo de esta en el acuífero. Como sucede con la CE, no se observa una relación entre los cambios generales en el almacenamiento y la temperatura.

Figura 9.14

Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF003 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)



Nota. La respuesta a los eventos de precipitación se indica de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1.

Manantial LF063: Este manantial tiene la CE más baja de todos los puntos monitoreados. Al comienzo del monitoreo, la CE presenta un valor de 67 uS/cm y sigue una tendencia ascendente hasta el 27 de diciembre alcanzando un valor de 103 uS/cm, luego desciende hasta el 3 de enero a un valor de 77 uS/cm, desde esta fecha hasta enero 10 vuelve a ascender alcanzando un máximo de 122 uS/cm, posteriormente hasta febrero 27 se observa un descenso hasta alcanzar un valor de 79 uS/cm.

Comparando la serie multitemporal de CE con el hidrograma (Figura 9.15.b) se observa que la tendencia ascendente de diciembre corresponde al tiempo de la recesión general donde el acuífero está perdiendo almacenamiento, mientras que la tendencia descendente de febrero 13 al 27 corresponde al tiempo que el acuífero está incrementando su almacenamiento. La recarga causada por los eventos E1 y E2 causan aumentos adicionales de la CE durante el tiempo de concentración, y una disminución durante la recesión respectiva. El efecto neto de esta recarga es incremento en la CE. Esto podría indicar que el agua nueva que ha entrado al acuífero no es suficiente para causar en efecto de disolución significativa en el agua vieja.

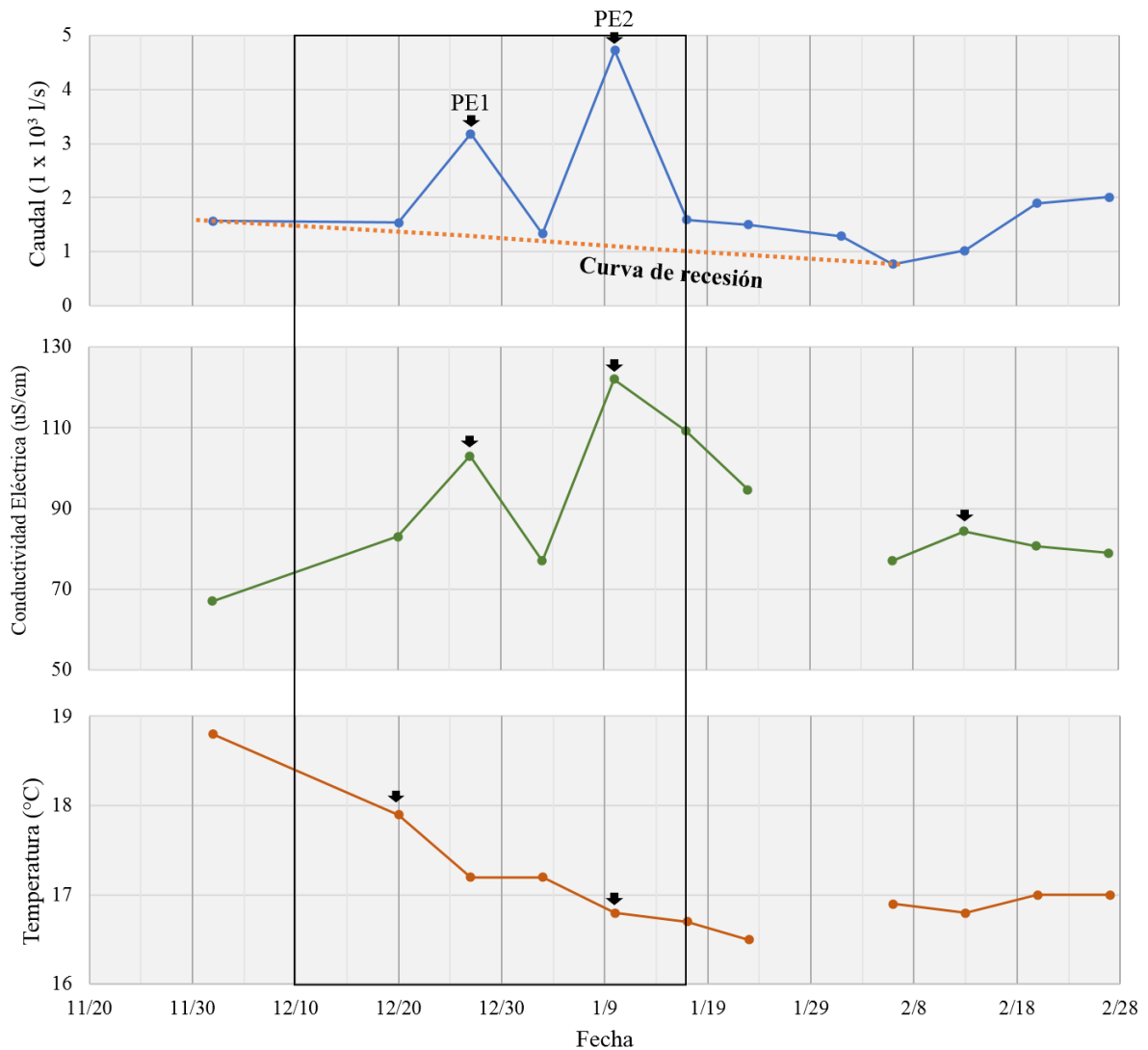
Para el caso de la temperatura, en la Figura 9.15.c se observa que el monitoreo en este manantial inicia con un valor de 18.8 °C y termina con un valor de 17 °C. La temperatura tiene una tendencia decreciente hasta enero 23 donde alcanza un valor de 16.5 °C, desde esta fecha se inicia un incremento de la temperatura hasta el final del monitoreo alcanzando un valor de 17 °C.

Al comparar la tendencia de la temperatura con el hidrograma se observa una relación directa con los cambios en el almacenamiento: Los efectos de la recarga temporal (por eventos E1 y E2) se evidencian como una disminución “adicional” de la temperatura durante el tiempo de concentración y un incremento durante el tiempo de recesión

(observables como cambios en la pendiente de la curva), como se indica en el recuadro de la Figura 9.15. Esto se interpreta como que el agua “nueva” (de recarga temporal) es más fría que la que se encuentra almacenada (agua vieja).

Figura 9.15

Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF063 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)



Nota. La respuesta a los eventos de precipitación se indica de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1. El cuadro interior indica los efectos de la recarga temporal por el evento E1 en la CE y la Temperatura.

Manantial LF077: En la Figura 9.16 (a y b) se presentan los datos medidos para este punto de agua, comparado con su hidrograma. La CE inicia con un valor de 105 uS/cm y termina con un valor de 110.33 uS/cm al final del monitoreo. En diciembre 27 alcanza un máximo de 152 uS/cm.

La CE tiene una tendencia ascendente hasta diciembre 27, a partir de esta fecha la CE disminuye progresivamente hasta alcanzar un mínimo de 78 uS/cm en enero 10. Desde de esta fecha y hasta el fin del monitoreo, la CE vuelve a tener una tendencia ascendente. Estas tendencias no son correlacionables con las tendencias generales del flujo base.

En cuanto a los efectos de los eventos de precipitación sucedidos durante el tiempo de monitoreo, se observa que para el evento E1, el cual causó un incremento pequeño en el caudal, la CE aumenta durante el tiempo de concentración y disminuye drásticamente durante la recesión, lo que hace que se alcance el valor mínimo de CE durante el monitoreo (ver recuadro en la Figura 9.16).

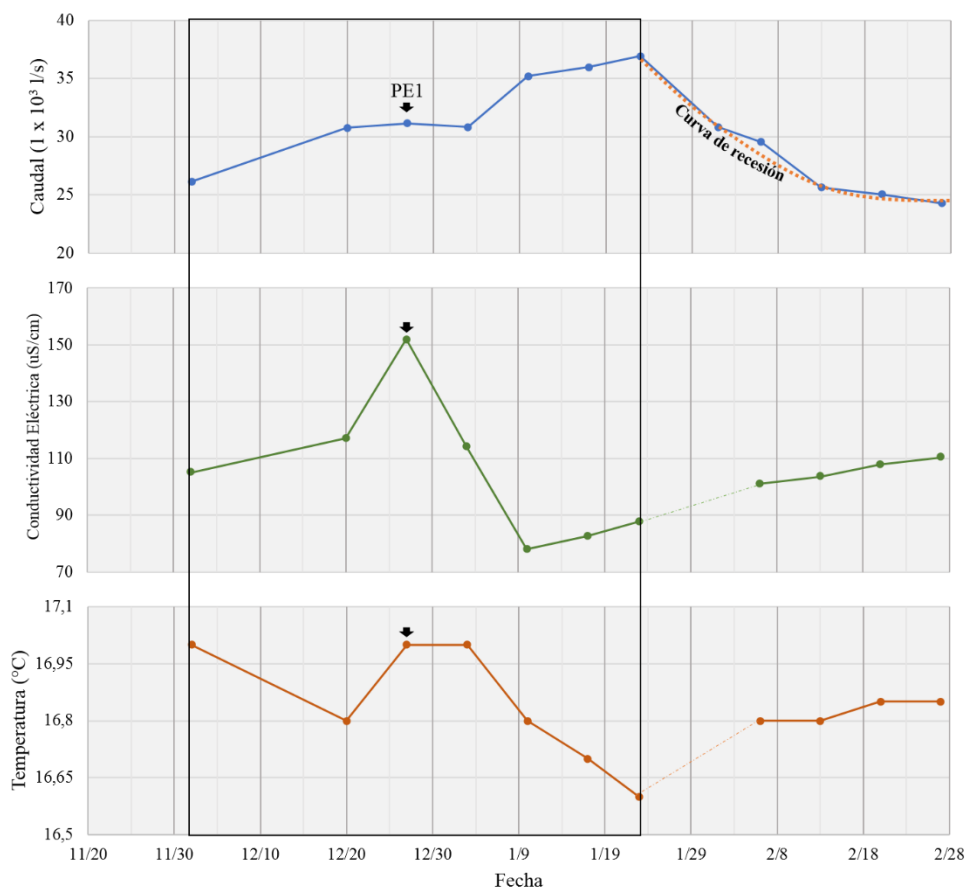
Para el caso de la temperatura, en la Figura 9.16.c se observa que el monitoreo en este manantial inicia con un valor de 17 °C el cual muestran una tendencia descendente hasta enero 23, alcanzando el valor mínimo de todo el monitoreo (16.6 °C), desde esta fecha hasta el fin del monitoreo se observa una tendencia ascendente hasta 16.85 °C. A diferencia de la CE, la variación en Temperatura se puede correlacionar con los cambios en flujo base. Durante el tiempo de incremento del flujo base (incremento del almacenamiento) la tendencia de la Temperatura es negativa, mientras que, durante la recesión, se observa una tendencia positiva. Una razón posible para esto es que el agua del acuífero tiene temperaturas más altas que el agua recargada (temporalmente) durante el tiempo del monitoreo. Cuando se da esta recarga temporal, la temperatura en el acuífero

baja, pero al drenarse esta agua, el acuífero vuelve a su temperatura normal. Se necesitan sin embargo estudios detallados para confirmar esto y verificar otras posibles explicaciones.

En cuanto al efecto de los eventos individuales en la temperatura, se observa que el evento E1 causó incremento en la temperatura durante la entrada de la recarga y disminución en la recesión. No se saben las razones del porqué el acuífero responde solo a este evento individual.

Figura 9.16

Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF077 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)



Nota. La respuesta a los eventos de precipitación se indica de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1. El cuadro interior indica los efectos de la recarga temporal por el evento E1 en la CE y la Temperatura.

Manantial LF110: En la Figura 9.17 (b y c) se presentan los datos medidos para este punto de agua, comparado con su hidrograma. La CE inicia con un valor de 386 uS/cm y termina con un valor de 446 uS/cm al final del monitoreo. En diciembre 27 alcanza un máximo de 505 uS/cm.

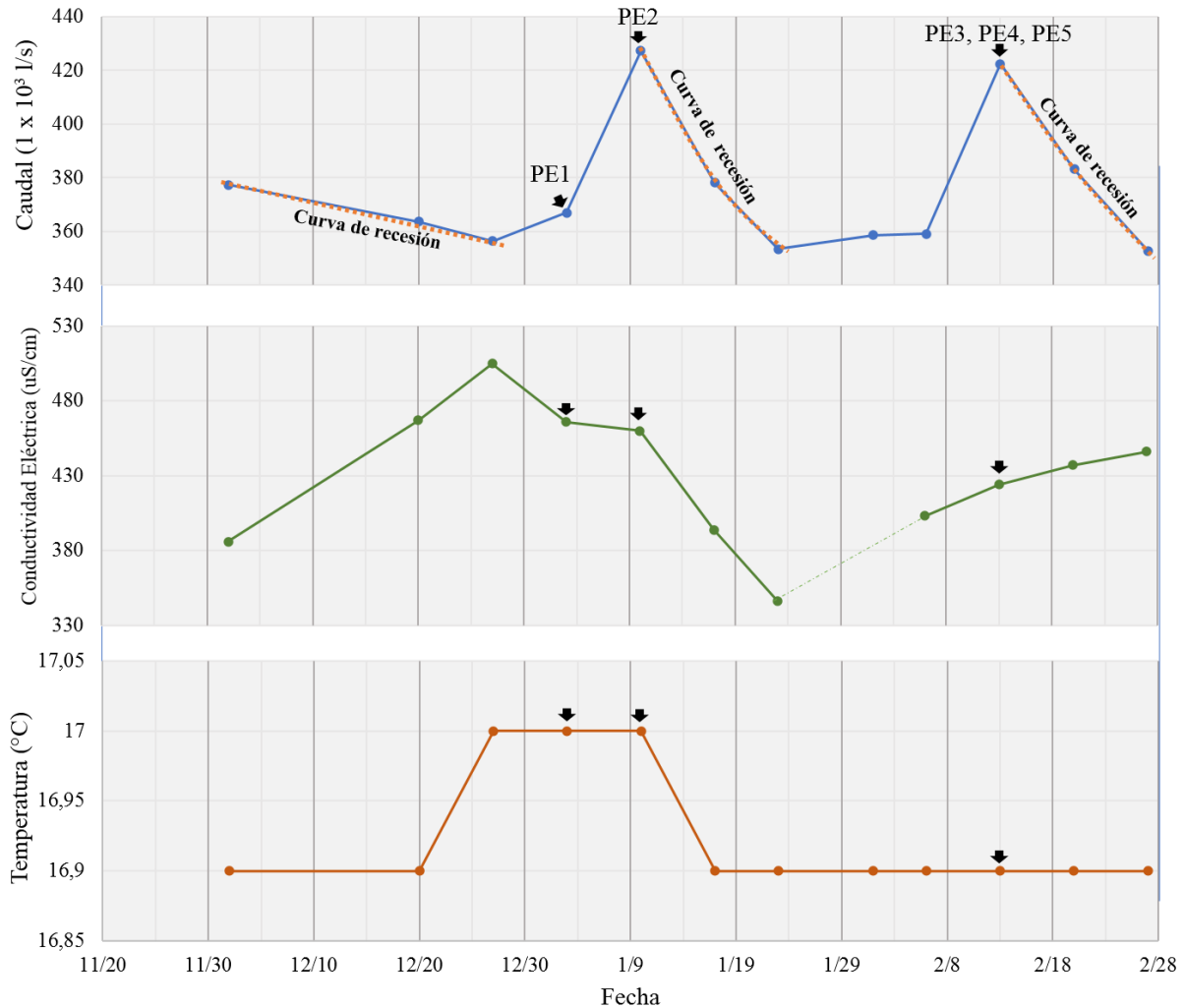
La CE tiene una tendencia ascendente hasta diciembre 27, a partir de esta fecha la CE disminuye progresivamente hasta alcanzar un mínimo de 346.33 uS/cm en enero 23. Desde esta fecha y hasta el fin del monitoreo, la CE vuelve a tener una tendencia ascendente.

La curva multitemporal de la CE no puede correlacionarse directamente a los cambios en el almacenamiento general del acuífero. Como se mencionó anteriormente, en general la CE tiene un cambio neto positivo durante el tiempo del monitoreo. Esta tendencia es interrumpida durante el periodo de diciembre 27 a enero 23 donde se observan un decrecimiento de la CE, causado posiblemente por disolución, debido a los efectos de la entrada de agua nueva por la recarga temporal causada por los eventos E1, E2 y posiblemente E3.

Los cambios en la temperatura durante el monitoreo son presentados en la Figura 9.17.c. La temperatura de este manantial permanece casi constante durante todo el monitoreo (16.9 °C), en el periodo de diciembre 20 a enero 17 hay un incremento a 17 °C, el cual se puede deber al efecto de la recarga temporal sucedida por los eventos E1 y E2.

Figura 9.17

Comparación del comportamiento de la Conductividad Eléctrica y la Temperatura con los cambios en el hidrograma del manantial LF110 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)



Nota. La respuesta a los eventos de precipitación se indica de la siguiente manera IE1: Inicio de la respuesta al evento 1, PE1: Pico del evento 1, FE1: Fin de la respuesta del evento 1. El cuadro interior indica los efectos de la recarga temporal por el evento E1 en la CE y la Temperatura.

9.3.3 Análisis de la Curva de Recesión y Propiedades Hidráulicas

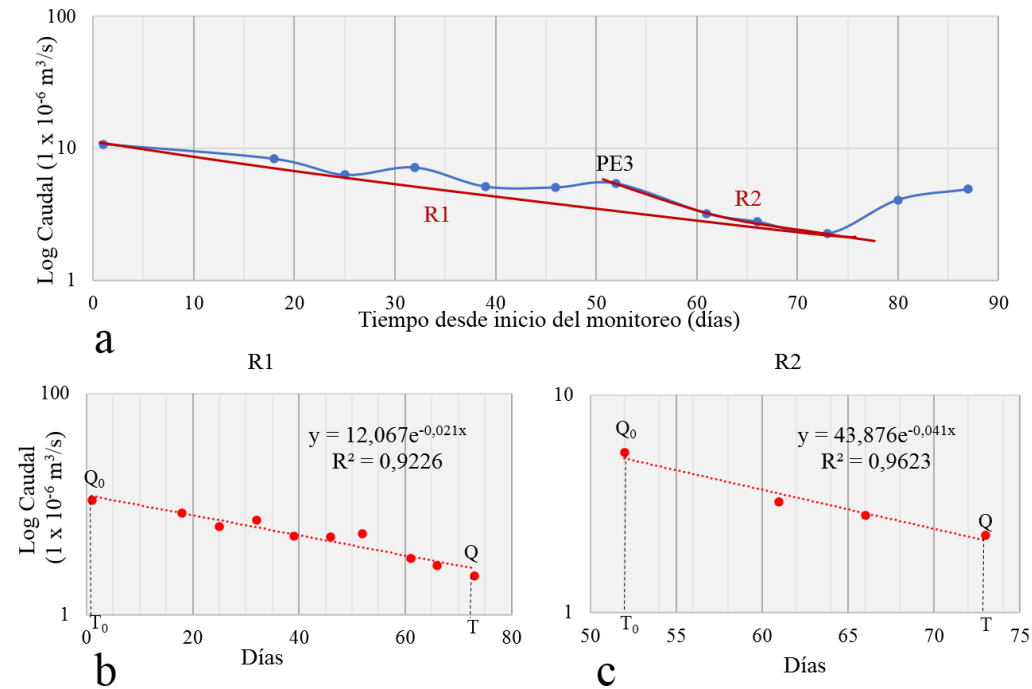
Manantial LF003: Para este punto se seleccionaron dos curvas de recesión las cuales se indican en la Figura 9.18, con los valores del coeficiente de correlación (α) y el

coeficiente de la regresión (R^2). La curva R1, representa la recesión larga (o general) debida a la pérdida de agua almacenada durante el segundo periodo de lluvias en la zona. La curva R2 indica la recesión producto de la recarga temporal sucedida por el evento de precipitación E3.

El valor de α obtenido para R1 es de 0.021/día y C: 47.6 días, la cual se considera muy baja, indicando baja capacidad de regulación del acuífero, asociada a la porosidad específica. El coeficiente obtenido para R2 es de 0.041/día y C: 24.3 días, representa circulación de corto tiempo en el acuífero e indica alta permeabilidad.

Figura 9.18

Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para dos periodos de recesión del manantial LF003 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)



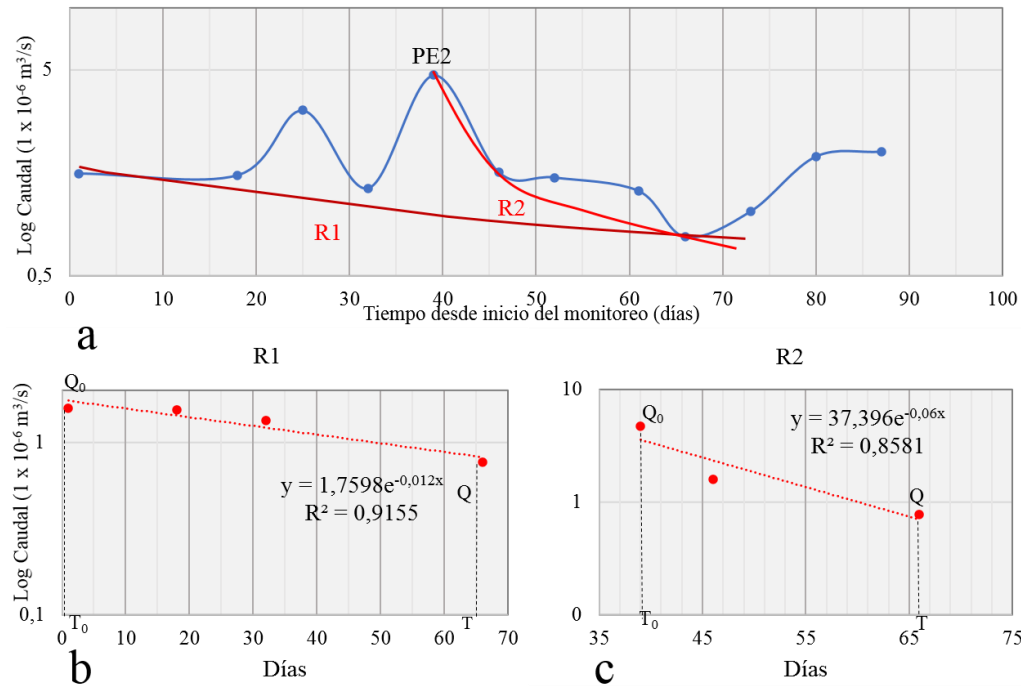
Nota. (a) Curva semilogarítmica del hidrograma. PE3 indican el pico del evento de precipitación, R2 indica la curva de recesión correspondiente. R1 representa la curva de recesión general. Las gráficas (b, c) indican los resultados de la regresión, los valores de α y el coeficiente de correlación (R^2).

Manantial LF063: Para este punto se seleccionaron 2 curvas de recesión las cuales se indican en la Figura 9.19 con sus respectivos resultados: los valores del coeficiente de correlación (α) y el coeficiente de la regresión (R^2). La curva R1, representa la recesión general debida a la perdida de agua almacenada durante el segundo periodo de lluvias en la zona (agosto a septiembre). La curva R2 indica la recesión producto de la recarga temporal sucedida por el evento de precipitación E2.

El valor de α obtenido para R1 es de 0.012/día y el valor de C es de 83 días, El coeficiente obtenido para R2 es de 0.067/día y el valor de C es 14.9 días. La capacidad de regulación obtenida con R1 (83 días) está controlada tanto por la porosidad efectiva como por la permeabilidad del acuífero. Este valor es bajo comparado con los datos obtenidos para los otros acuíferos. El valor de C obtenido para R2 (14.9 días) al ser de una recarga temporal representa más la circulación del agua en el acuífero, la cual es controlada más por la permeabilidad. Como se ve, este valor al ser mucho más bajo, indica alta permeabilidad.

Figura 9.19

Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para dos periodos de recesión del manantial LF063 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)

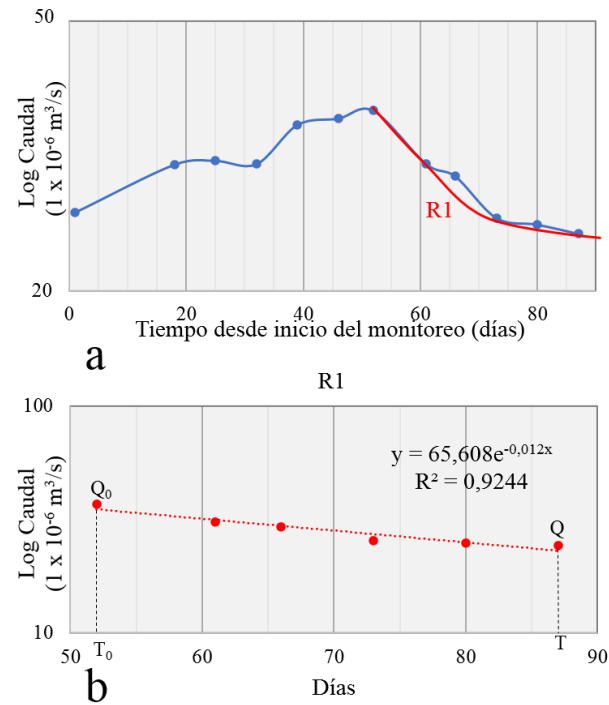


Nota. (a) Curva semilogarítmica del hidrograma. PE2 indica el pico del evento de precipitación, R2 indican la curva de recesión correspondiente. R1 corresponde a la curva de recesión general. Las gráficas (b, c) indican los resultados de la regresión, los valores de α y el coeficiente de correlación (R^2).

Manantial LF077: Para este punto se analizó la curva de recesión (R1) que se da por el acumulado de las lluvias hasta el 23 de enero, las cuales se indican en la Figura 9.20 y que incluye los valores del coeficiente de correlación (α) y el coeficiente de la regresión (R^2). El valor de α obtenido para R1 es de 0.012/día y C:83 días el cual se considera bajo. Este valor indicaría que el área del acuífero que alimenta el manantial tiene una capacidad de regulación baja.

Figura 9.20

Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para un periodo de recesión del manantial LF077 (*acuifero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica*)



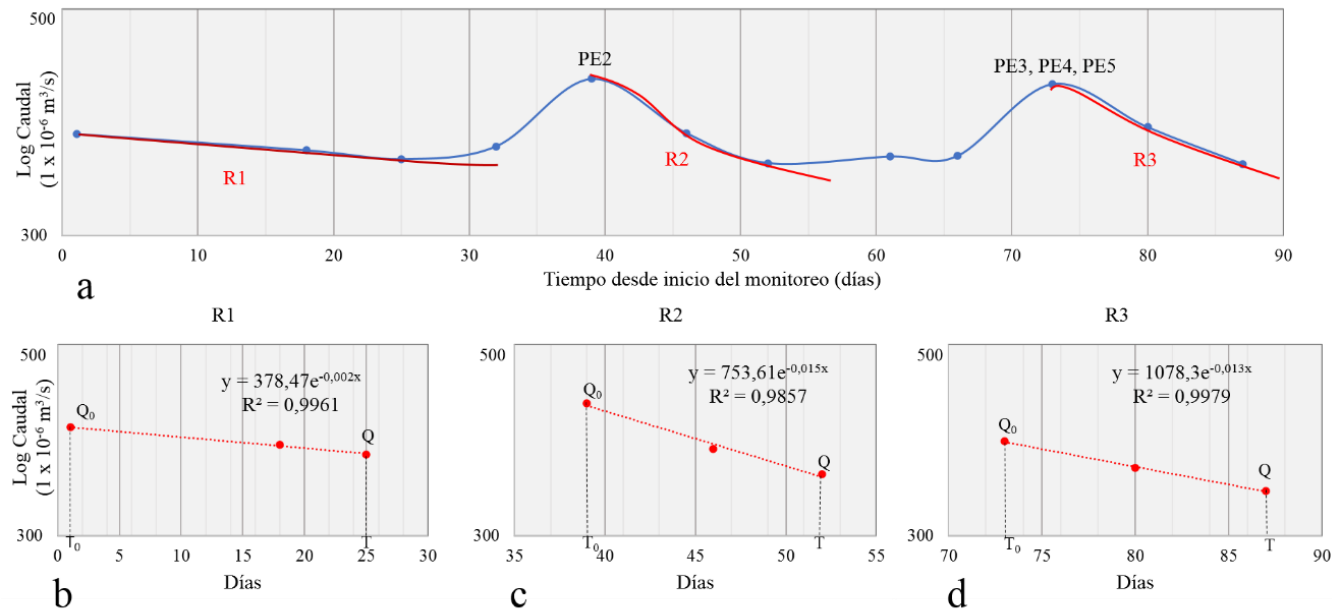
Nota. (a) Curva semilogarítmica del hidrograma. R1 indica la curva de recesión correspondiente. La gráfica (b) indica los resultados de la regresión, los valores de α y el coeficiente de correlación (R^2).

Manantial LF110: Para este punto se seleccionaron tres curvas de recesión las cuales se indican en la Figura 9.21, con los valores del coeficiente de correlación (α) y el coeficiente de la regresión (R^2). La curva R1, representa la recesión larga (o general) debida a la perdida de agua almacenada durante el segundo periodo de lluvias en la zona. La curva R2 indica la recesión producto de la recarga temporal sucedida por el evento de precipitación E2. La curva R3 indica la recesión producto de la recarga temporal sucedida por el acumulado de los eventos de precipitación E3, E4 y E5.

El valor de α obtenido para R1 es de 0.002/día y C: 500 días el cual se considera muy alto. Este valor de C indicaría que el área del acuífero que alimenta el manantial tiene una capacidad de regulación muy alta. El coeficiente obtenido para R2 es de 0.015/día, C: 66.6 días y el de R3 es de 0.013/día, C: 77 días. Para ambas curvas se obtienen valores de C similares que se consideran bajos. Este valor representa más la circulación de corto tiempo en el acuífero y es un buen indicativo de la permeabilidad. La gran diferencia de α entre la curva de recesión general y las de recesión corta podría indicar que la curva de recesión del evento general está representando agua que proviene del almacenamiento, controlada por la porosidad efectiva, mientras que las curvas asociadas a los eventos individuales reflejan más el movimiento del agua.

Figura 9.21

Hidrogramas y resultados de los cálculos del coeficiente α para tres periodos de recesión para el manantial LF110 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)



Nota. En la parte superior: Curva semilogarítmica del hidrograma. PE2, PE3, PE4 y PE5 indican los picos de los eventos de precipitación, R1, R2 y R3 indican las curvas de recesión correspondientes. Las gráficas inferiores indican los resultados de la regresión, los valores de α y el coeficiente de correlación (R^2).

9.3.3.1 Resumen de los Valores de C Obtenidos para el Acuífero Depósitos de Caída Piroclástica (parte superior). La Tabla 9.13 presenta el compilado de la capacidad de regulación obtenido para los cuatro manantiales del acuífero Depósitos de caída piroclástica, agrupados por respuesta a eventos similares.

Tabla 9.13

Compilado de la capacidad de regulación (C) para los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica

Manantial	Capacidad de regulación en días						
	RG	E1	E2	E3	E4	E3,4,5	Otra
LF003	47.6			24.4			
LF063	83.3		14.9				
LF110*	500		66.7			77.9	
LF077							83.3

Nota. El símbolo * indica que este manantial se encuentra localizado en la zona de la Falla El Perro. RG representa la recesión larga (o general) debida a la pérdida de agua almacenada durante el segundo periodo de lluvias en la zona. E1, E2, E3, E4 indica eventos de precipitación. E3, E4 y E5 representa un evento de precipitación acumulado. Otra se refiere a un evento que no se relaciona en ningún otro manantial.

De la tabla se observa que los valores de C para la recesión general en LF003 y LF063 son bajos, de igual manera que el obtenido para el LF077. Estos valores indicarían que el acuífero tiene en general baja capacidad de regulación (por porosidad efectiva y conductividad hidráulica). El acuífero es heterogéneo y la capacidad de regulación es mejor para las áreas del acuífero que alimentan los manantiales LF077 y LF063, que el área que alimenta el manantial LF003. El manantial en la zona de falla indica una

capacidad de regulación muchísimo más alta. Esto indicaría que la falla está afectando tanto la porosidad efectiva como la permeabilidad.

En cuanto a la comparación de los valores de C para el evento E2 de recarga temporal, se observa que el manantial LF110 tiene un valor mayor de C, lo cual indicaría que la permeabilidad es mayor.

9.3.4 Cálculo del Volumen Almacenado en el Acuífero al Comienzo de la Recesión

En el manantial LF003, los valores obtenidos para la curva de recesión general y el evento E3 son de 34.51 y 6.57 m³ respectivamente (ver Tabla 9.14). Estos valores intermedios respecto a los valores de volumen almacenado al comienzo de la recesión en otros manantiales, de las otras unidades acuíferas de la microcuenca, como se discutirá en el capítulo siguiente.

Tabla 9.14

Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de curvas de recesión analizadas para el manantial LF003 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)

Parámetro	R1	R2
Qo (m ³ /día)	0.9339	0.4691
Q (m ³ /día)	0.1961	0.1961
Delta Q	0.7378	0.2730
α 1 (1/día)	0.0213	0.0415
Vt (m ³)	34.51	6.57

Nota. Qo: caudal inicial, Q: caudal a un tiempo determinado, Delta Q: diferencia entre Qo y Q, α : coeficiente de recesión, Vt: volumen total.

En el manantial LF063, los valores obtenidos para la curva de recesión general y el evento E2 son de 1.72 y 5.08 m³ respectivamente (ver Tabla 9.15). Estos valores son intermedios respecto a los valores de volumen almacenado al comienzo de la recesión en otros manantiales, de las otras unidades acuíferas de la microcuenca, como se discutirá en el capítulo siguiente.

Tabla 9.15

Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizadas para el manantial LF063 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)

LF063	R1	R2
Qo (m ³ /día)	0.1356	0.4078
Q (m ³ /día)	0.1149	0.0665
Delta Q	0.0207	0.3412
α 1 (1/día)	0.012	0.0671
Vt (m ³)	1.72	5.08

Nota. Qo: caudal inicial, Q: caudal a un tiempo determinado, Delta Q: diferencia entre Qo y Q, α : coeficiente de recesión, Vt: volumen total.

En el manantial LF077, el valor obtenido para la curva de recesión general es 91.24 m³ (ver Tabla 9.16). Este valor es el más alto respecto a los valores de volumen almacenado al comienzo de la recesión en otros manantiales, de las otras unidades acuíferas de la microcuenca, como se discutirá en el capítulo siguiente.

Tabla 9.16

Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizadas para el manantial LF077 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)

LF077	R1
Qo (m ³ /día)	3.1898
Q (m ³ /día)	2.0995
Delta Q	1.0903
α 1 (1/día)	0.0119
Vt (m ³)	91.24

Nota. Qo: caudal inicial, Q: caudal a un tiempo determinado, Delta Q: diferencia entre Qo y Q, α : coeficiente de recesión, Vt: volumen total.

En el manantial LF110, los valores obtenidos para la curva de recesión general, el evento E2 y el acumulado E3, E4, E5 son 792.36, 437.13 y 467.53 m³ respectivamente (ver Tabla 9.17). Aunque estos valores son los más altos respecto a los valores de volumen almacenado al comienzo de la recesión en otros manantiales, de las otras unidades acuíferas de la microcuenca, no se tendrán en cuenta en la discusión del capítulo siguiente.

Tabla 9.17

Valores de Alpha y volúmenes de agua almacenados al inicio de las curvas de recesión analizadas para el manantial LF110 (acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica)

LF110	R1	R2	R3
Qo (m ³ /día)	32.6039	36.9230	36.4936
Q (m ³ /día)	30.8016	30.5303	30.4758
Delta Q	1.8023	6.3927	6.0177
α l (1/día)	0.0023	0.0146	0.0129
Vt (m ³)	792.36	437.13	467.53

Nota. Qo: caudal inicial, Q: caudal a un tiempo determinado, Delta Q: diferencia entre Qo y Q, α : coeficiente de recesión, Vt: volumen total.

9.3.4.1 Resumen de los Volúmenes Almacenados al Inicio de la Curva de Recesión Obtenidos para el Acuífero Depósitos de Caída Piroclástica (parte superior). La Tabla 9.18 presenta el compilado de los volúmenes almacenados al inicio de la curva de recesión obtenidos para los cuatro manantiales del acuífero Depósitos de caída piroclástica, agrupados por respuesta a eventos similares.

Tabla 9.18

Compilado de los volúmenes almacenados al inicio de la curva de recesión para los manantiales del acuífero parte superior de los Depósitos de caída piroclástica

Manantial	Volúmenes (m³/día)						
	RG	E1	E2	E3	E4	E3,4,5	Otra
LF003	34.51			6.57			
LF063	1.72		5.08				

LF077			91.24
LF110*	792.36	437.13	467.53

Nota. El símbolo * indica que este manantial se encuentra localizado en la zona de la Falla El Perro. RG representa la recesión larga (o general) debida a la perdida de agua almacenada durante el segundo periodo de lluvias en la zona. E1, E2, E3, E4 indica eventos de precipitación. E3, E4 y E5 representa un evento de precipitación acumulado. Otra se refiere a un evento que no se relaciona en ningún otro manantial.

De la tabla se observa que hay variabilidad en los valores de volumen almacenado al inicio de la curva de recesión para esta unidad acuífero. Es así como al no observarse resultados similares en ninguna de las variables, se caracteriza este acuífero como heterogéneo. Los factores que posiblemente están generando estas diferencias son la pendiente y la extensión de las áreas de recarga.

Además, al igual que con los valores de C, la zona de falla en el manantial LF110 está causando una mayor capacidad de absorción y circulación del agua, lo cual puede indicar que esta zona se satura mucho más rápido.

10. Síntesis de Resultados

En el presente capítulo se consolidan los resultados del monitoreo, apoyados con los datos del inventario de puntos de agua (Anexo E), para crear una descripción general de las características más importantes de las unidades acuíferas de la zona de estudio. Estas características se dividieron en dos aspectos: el primero es productividad y propiedades hidráulicas y el segundo son las propiedades hidroquímicas básicas. Para los efectos de la descripción en este capítulo se usarán las siguientes abreviaturas: Acuífero Depósitos vulcanosedimentarios (AVS), Acuífero Formación Manizales (AFM), Acuífero del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande (AQG) y Acuífero Depósitos de Caída Piroclástica -parte superior (ADCS).

10.1 Productividad y Propiedades Hidráulicas de los Acuíferos

10.1.1 Caudales

La comparación de los promedios del caudal entre las unidades indica que la unidad con los caudales de descarga más bajos es el AQG y la unidad con los más altos es el ADCS. Las unidades AFM y ADCS son las que presentan mayor variabilidad en caudales de descarga, como se presentan en la Tabla 10.1. Es de esperarse que el acuífero por porosidad secundaria (AQG) presente la menor descarga.

Es importante tener en cuenta que, como se mencionó en el capítulo del Potencial Hidrogeológico, muchos manantiales tienen caudales de descarga muy baja que no pueden ser medidos usando el método volumétrico. Los valores presentados y analizados aquí deben tomarse como referencia y los valores comparados deben enfocarse más hacia el límite superior.

Tabla 10.1*Comparación de los caudales de descarga medidos para las unidades acuíferas*

Unidad Acuífera	Rango de caudales	Promedio	Observaciones
Tipo porosidad	(1×10^{-3} l/s)	(1×10^{-3} l/s)	
AQG (Porosidad secundaria)	0.20 – 5.29	2.33	Cuatro puntos. Tres sólo con goteo.
AVS (Porosidad primaria)	1.35 -9.21	5.28	Tres puntos. Dos de goteo.
AFM (Doble porosidad)	1.52 – 26.53	14.02	Tres puntos. La variación en valor se debe a la litología de la capa drenada.
ADCS (Porosidad primaria)	1.57 – 43.48	15.21	Se midió un valor extremo de 377.36. Localizado en la zona de influencia de la Falla El Perro.

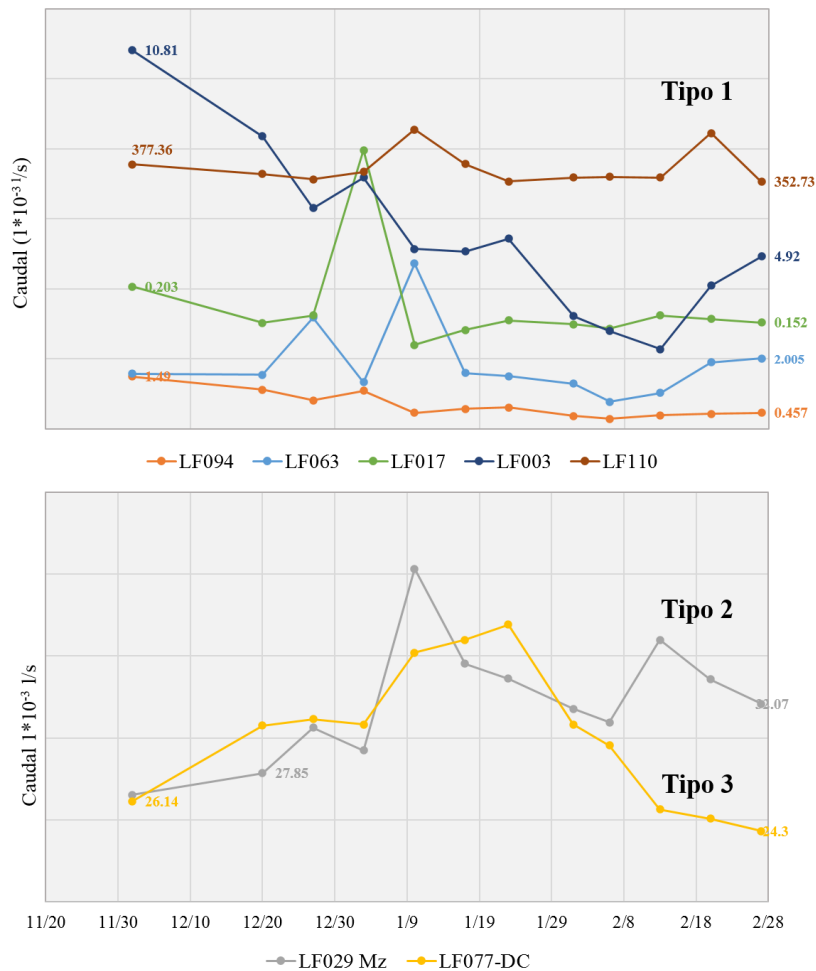
10.1.2 Hidrogramas

Para efectos de comparación del comportamiento, los hidrogramas fueron agrupados por unidad acuífera, debido a la diferencia de rangos y para analizar tendencias generales del caudal. Los hidrogramas se clasificaron en tres tipos, como se indica en la Figura 10.1: el primer tipo presenta una tendencia de recesión general que

se extiende hasta enero, seguido de una recuperación en el caudal. Esta recesión posiblemente refleja la pérdida del almacenamiento que se ganó por recarga durante la segunda temporada de lluvia en la zona. El segundo tipo indica un incremento progresivo del flujo base durante todo el tiempo del monitoreo. El tercer tipo indica un incremento progresivo del almacenamiento hasta el mes de enero, seguido de recesión. Los tipos de tendencias se indican en la Figura 10.1.

Figura 10.1

Hidrogramas consolidados para los manantiales monitoreados en tres de los acuíferos de la zona



Nota. Las escalas para cada curva se indican con valores de caudal (Q) en cada hidrograma.

ADCS: Se observan dos tipos de comportamientos. El hidrograma tipo 1 se observa en los manantiales con caudales bajos (LF003, LF063) y en el localizado en la zona de falla (LF110). En estos hidrogramas, la recesión general refleja la pérdida del agua recargada en la primera mitad de la segunda temporada de lluvias del año hidrológico (especialmente la de los meses de septiembre y octubre, ya que el segundo mes tiene el máximo valor de precipitación). Los eventos de precipitación ocurridos durante el monitoreo generan recarga temporal, pero sin incremento neto en el almacenamiento del acuífero ya que toda el agua de recarga es drenada fuera del acuífero.

El manantial LF077 tiene los caudales de descarga más altos de esta unidad (sin contar el LF110) y su hidrograma es del tipo 3. Se observa un incremento paulatino en el flujo base hasta enero seguido por recesión hasta febrero. Esta curva de recesión retorna a los valores del flujo base con los que inició en diciembre. Una posible explicación para el comportamiento del caudal en este manantial es que el área del acuífero que lo alimenta tiene una respuesta más demorada y acumulada a la recarga producto de los eventos de precipitación sucedidos antes (primera mitad de la segunda temporada de lluvias del año hidrológico) y durante el monitoreo, sin embargo, como sucede con los otros manantiales, no hay incremento neto en el almacenamiento debido a estos eventos.

AQG: Los dos manantiales (LF017 y LF094) presentan hidrogramas tipo 1. Los eventos de precipitación sucedidos durante el monitoreo, de igual manera que en ADCS, causan recarga temporal, ya que no incrementan el flujo base.

AFM: El hidrograma del manantial LF029 es de tipo 2 y presenta flujo base ascendente, indicando incremento en el almacenamiento durante el tiempo del

monitoreo. Este manantial responde a todos los eventos de precipitación y todos tienen efecto positivo en el almacenamiento ya que sólo una parte del agua de recarga es drenada fuera del acuífero.

10.1.3 Capacidad de Regulación (C)

Los valores calculados para C de todas las curvas de recesión, se promediaron inicialmente por manantial y luego se sintetizaron en rangos por unidades acuíferas. Los valores obtenidos para los dos manantiales ubicados en la zona de falla se analizan de manera individual para analizar el efecto de la falla en ellos, como se muestra en la Tabla 10.2. En esta tabla se muestra que la capacidad de regulación (C) es alta para AQG, intermedia para AFM y baja para ADCS. En cuanto a cómo afecta la zona de falla en el registro de dichos valores de C para los dos manantiales ubicados en esta zona, en ambos casos, se presentan cambios respecto a los demás valores de las unidades acuíferas a las que pertenecen, por ejemplo, hay una disminución en el manantial LF0094 del AQG, mientras que el valor de C para el manantial LF110 del ADCS es mucho más alto que los otros manantiales de esta unidad. Las interpretaciones de estos cambios y de la afectación de la falla no se logran evidenciar sólo a partir del estudio de este parámetro C, sino que se hace necesario realizar una integración de varios factores como caudal, la duración de las recesiones, entre otros para llegar a una conclusión.

Tabla 10.2

Comparación de las capacidades de regulación (C) entre las unidades acuíferas y para los manantiales de la zona de falla

Unidad Acuífera	Rango de valor del coeficiente (C) días	Promedio en días	Manantial en zona de falla
------------------------	--	-------------------------	-----------------------------------

AFM	111-125	118		
AQG	71.4-200	146	LF094	27.4
ADCS	14.9-83.33	50.7	LF110	214.8

10.1.4 Duración de Curvas de Recesión

Para comparar las curvas de recesión, inicialmente se generaron rangos y promedios por unidades acuíferas sin tener en cuenta los valores obtenidos para los dos manantiales ubicados en la zona de falla. Los resultados indican (como se muestra en la Tabla 10.3) que el acuífero con recesión más larga es ADCS, seguido por AQG. El AFM es el acuífero con recesión más corta.

Para el caso de cómo afecta la zona de falla en el registro de dichos valores de duración para los dos manantiales ubicados en esta zona, se obtiene que la recesión es más corta en el manantial LF110 del ADCS, lo que indicaría disminución en la capacidad del almacenamiento. La recesión en el manantial LF094 del AQG es más larga lo que indicaría aumento en la capacidad de almacenamiento.

Tabla 10.3

Consolidado de la duración de las curvas de recesión de las unidades acuíferas y los manantiales ubicados en la zona de falla

Unidad acuífera	Rangos de duración (días)	Promedio en días	Manantial en zona de falla	
AFM	8 -28	17		
AQG	8-40	19.5	LF094	24.5

10.1.5 Volúmenes Almacenados al Inicio de la Curva de Recesión

Teniendo en cuenta que no todos los manantiales responden a los mismos eventos de precipitación y los volúmenes son tan variables, para este cálculo se seleccionaron cuatro eventos: segunda temporada de precipitación, E2, E3 y el acumulado de E3, E4 y E5. Para ellos se compararon las respuestas individuales de cada manantial, como se muestra en la Tabla 10.4.

Los resultados indican que para la segunda temporada de precipitación los volúmenes almacenados a principios de diciembre son más altos en el ADCS que en el AQQ. Los dos manantiales en la zona de falla almacenan más agua que los manantiales fuera de ella. En el evento E2, el manantial del AFM almacena más agua que el manantial de ADCS, nuevamente, en la zona de falla, el volumen almacenado es muchísimo más alto. Para el evento E3, el manantial de ADCS almacena más agua que el AQQ.

En resumen, se puede decir que el AFM presenta mayor capacidad de almacenar agua que el ADCS. El acuífero de menor capacidad es el AQQ. La zona de falla incrementa esta capacidad en ambos acuíferos: ADC y AQQ.

Tabla 10.4

Resultados comparativos de los volúmenes almacenados al inicio de la curva de recesión después de eventos de precipitación

Manantial-Unidad Acuífera	Volumen (m ³ /día)			
	2da Temporada	E2	E3	E3+E4+E5

LF029-AFM		82.7	41.11
LF003-ADCS	34.51		6.57
LF063-ADCS	1.72	5.08	
LF077-ADCS			
LF110-ADCS*	792.36	437.14	467.53
LF017-AQG	0.53		0.18
LF094-AQG*	4.13		0.51

Nota. El símbolo * indica aquellos manantiales localizados en la zona de la Falla El Perro.

10.1.6 Productividad Relativa de las Unidades Acuíferas de la Zona

Basado en la información anterior, las unidades acuíferas de la zona se pueden clasificar de la siguiente manera:

AQG: Es el acuífero de más baja productividad. Esto se concluye por el bajo valor promedio de caudales, bajos incrementos de volúmenes después de eventos de precipitación, menor tiempo de duración en la curva de recesión, altos valores de capacidad de regulación C.

ADVS: Se considera un acuífero de baja productividad debido al caudal. Es necesario realizar monitoreos para confirmar esta clasificación.

ADCS: Se considera un acuífero de intermedia productividad. Los caudales son variables, se dan incrementos intermedios de volumen en eventos de precipitación, la capacidad de regulación C baja indicaría una permeabilidad mayor que en AFM.

AFM: Alta productividad en las capas de arenas: Esta clasificación se da basada en el alto caudal, alto incremento de volumen por eventos de precipitación. La

capacidad de regulación C intermedia a alta indicaría una permeabilidad menor que en ADCS. Será necesario detallar la extensión de estas capas y hacer más monitoreo para confirmar esta clasificación.

10.2 Parámetros Hidroquímicos

Con el fin de comparar las propiedades hidroquímicas básicas entre las unidades acuíferas, fueron calculados los promedios de temperatura, pH y conductividad eléctrica (CE) con los datos del inventario como se presentan en la Tabla 10.5.

De la tabla se observa que el agua con mayor grado de mineralización se encuentra en el AFM, seguido por el AQG y el ADCS. El agua de menor salinidad se encuentra en AVS, por fuera de la zona de falla. Estos resultados indicarían que los mayores tiempos de circulación e interacción del agua con el acuífero se dan en el AFM y los menores se dan en el AVS. Los manantiales en la zona de falla tienen mayor mineralización que los otros. En cuanto a la temperatura, se observa que el AFM es del promedio más alto, seguido por el ADCS, AQG y AVS. Para el caso de los promedios y considerando que para la mayoría de los manantiales no se observan cambios en los gradientes con la topografía, por lo cual la temperatura se puede considerar también como un indicador de los tiempos de circulación del agua en el acuífero (a mayor tiempo de circulación, mayor temperatura).

En cuanto al pH, todas las unidades tienen aguas casi neutras. Se observa que el AQG es el de aguas más ácidas y el AVS tiene las aguas más neutras. Se requieren estudios detallados de hidroquímica para explicar las pequeñas diferencias entre estos acuíferos.

Tabla 10.5*Comparación de las propiedades hidráulicas básicas para las unidades acuíferas*

Unidad Acuífera	CE (uS/cm)	pH	Temperatura (°C)	Litología	Observaciones
AQG	194	6.03	17.17	Lodolitas fracturadas	Se midió un valor extremo de CE de 3999 uS/cm y un valor anómalo de pH de 2.17 en la zona de influencia de la Falla El Perro
AVS	126.7	6.82	16.67	Grava y arenas. Matriz ceniza	
AFM	276.33	6.46	18	Inferior: Conglomerados matriz arcillosa Superior: arenitas diaclasadas	
ADCS	134.5	6.27	17.46	Lapilli, bien seleccionado	

10.2.1 Respuesta Multitemporal de Parámetros hidroquímicos

Estas respuestas están basadas en los datos del monitoreo.

10.2.1.1 Temperatura. Se encontró que la temperatura es la variable que responde de manera inmediata a los cambios de caudal, como se observa en la Figura 10.2.

ADCS: Los diagramas indican patrones de variaciones similares a los hidrogramas: cuando hay pérdida en almacenamiento la temperatura disminuye, cuando

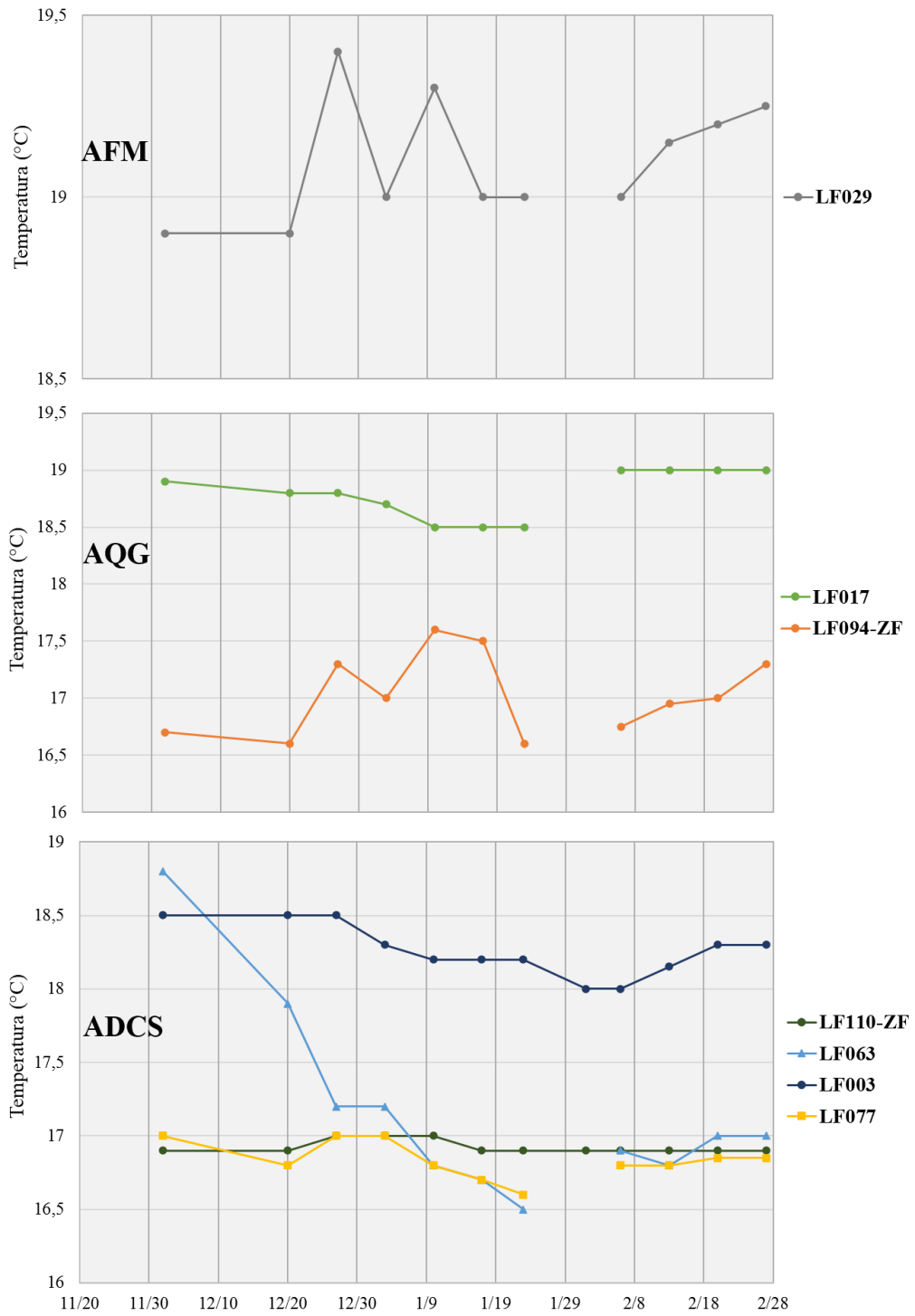
hay ganancia, la temperatura aumenta. Los eventos de recarga temporal generan un incremento de temperatura del agua durante el tiempo de concentración y una disminución durante la recesión. Para el manantial en la zona de falla la variación de la temperatura es mínima. Se observa un incremento de ella en la precipitación de diciembre.

AQG: Los dos manantiales responden de manera distinta. LF017 sigue tendencia similar al hidrograma, cuando hay disminución en almacenamiento se observa disminución en la temperatura y viceversa. En cuanto a la recarga temporal, esta incrementa ligeramente T. El manantial LF094, que se encuentra en la zona de falla exhibe una tendencia general similar al hidrograma, aunque la recarga temporal de diciembre y enero incrementa significativamente la temperatura.

AFM: El diagrama indica que el patrón de variación es similar al hidrograma: incremento de temperatura con incremento en el almacenamiento. Los eventos de recarga temporal generan un incremento de la temperatura del agua durante el tiempo de concentración y una disminución durante la recesión.

Figura 10.2

Comparación de la variación multitemporal de la temperatura entre los acuíferos monitoreados



Nota. Las letras ZF indican que el manantial se encuentra en la zona de falla.

10.2.1.2 Conductividad Eléctrica (CE). El análisis conjunto de las series indica que los cambios en la CE no se dan como respuesta inmediata a los cambios de caudal. Esto indica que la variación en la mineralización del agua en estos acuíferos no es respuesta directa a los episodios de recarga temporal o subsecuente descarga como se muestra en la Figura 10.3.

ADCS: Los cambios en CE son graduales, se observa un aumento progresivo de la mineralización desde el comienzo del monitoreo hasta diciembre 27. A partir de esta fecha la CE decrece hasta finales de enero, en donde vuelve a iniciar una tendencia al incremento. En cuanto al efecto de la recarga temporal se observa un leve incremento en CE, excepto en el manantial LF063 donde el incremento es tan significativo que altera la tendencia decreciente.

Para el caso del manantial LF110 ubicado en la zona de falla, los valores de CE son el doble del valor de los otros manantiales.

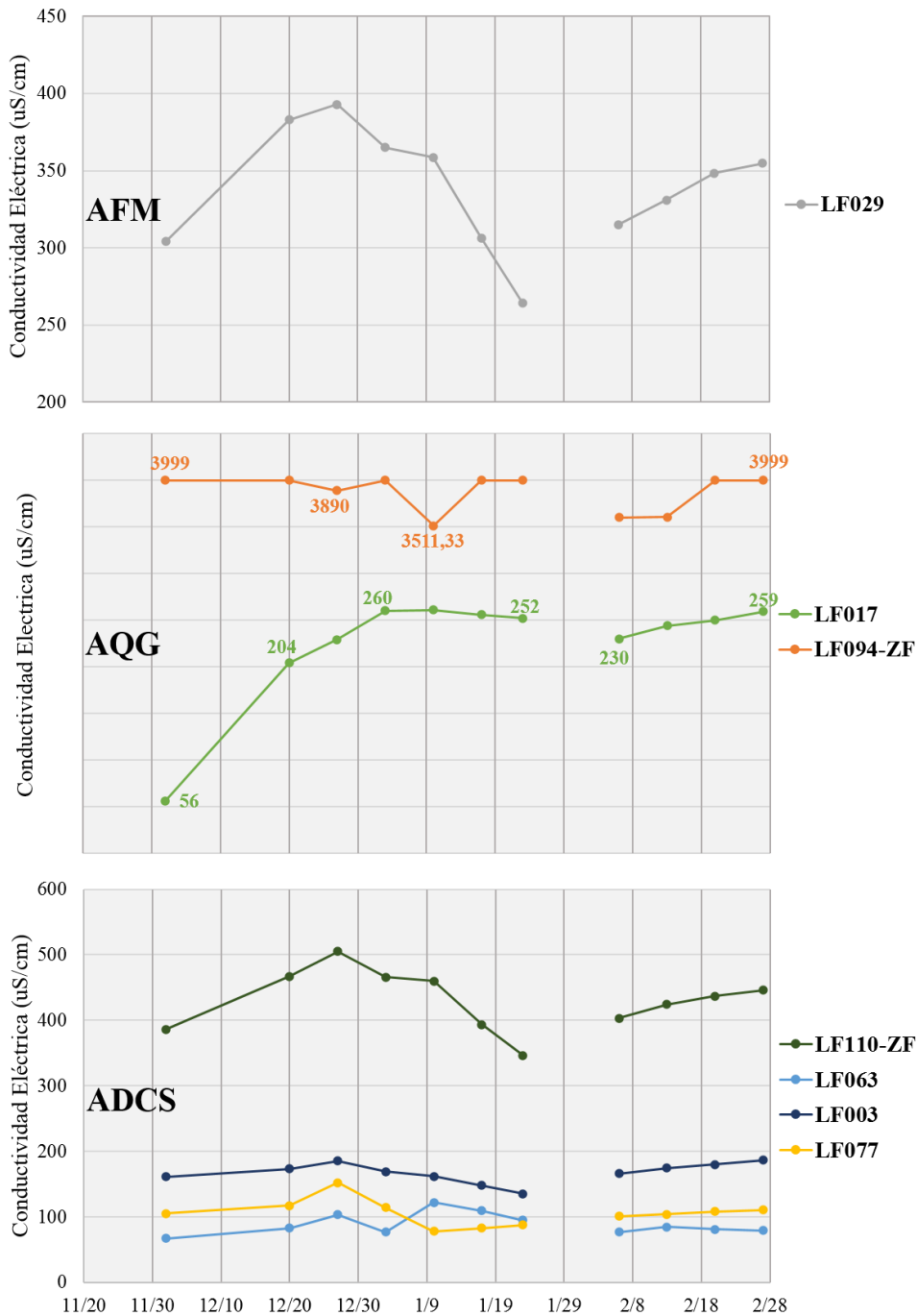
AQG: Se observan dos series con comportamientos diferentes: En el manantial LF017 hay grandes variaciones en CE, cuya tendencia es similar al acuífero ADCS, aunque con tiempos de respuesta diferentes: incrementa fuertemente en diciembre, decrece levemente hasta enero y se recupera levemente en febrero. No se evidencian efectos significativos en la mineralización por los eventos de recarga temporal. Para el manantial LF094 ubicado en la zona de falla, la mineralización es mucho más alta, se observa una tendencia decreciente de la mineralización hasta febrero con una recuperación hasta el final de monitoreo. La recarga temporal en este caso causa disminución de la CE.

AFM: Los cambios en CE son graduales, se observa un aumento progresivo de la mineralización hasta diciembre 27. A partir de esa fecha la CE decrece hasta finales

de enero, y finalmente vuelve a iniciar la tendencia al incremento. En cuanto al efecto de recarga temporal se observa un leve incremento en CE.

Figura 10.3

Comparación de la variación multitemporal de la conductividad eléctrica entre las unidades acuíferas monitoreadas



Nota. Los manantiales con las letras ZF al final indican que están en la zona de falla.

11. Conclusiones

En el área de estudio se cartografiaron seis unidades geológicas: miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande, Formación Manizales, Formación Casabianca, Depósitos cuaternarios (Depósitos de caída piroclástica, Depósitos vulcanosedimentarios y Depósitos aluviales).

En la zona fueron mapeadas 2 Fallas y 38 lineamientos. Los lineamientos se encuentran distribuidos a lo largo de toda la microcuenca, con mayor concentración en la parte norte. La falla de mayor longitud es la Falla El Perro la cual cruza toda la zona de estudio con una longitud de 1401 m y orientación N27E. Esta afecta principalmente a las lodolitas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande hacia la parte noreste de la microcuenca donde se observaron áreas de deformación. En la parte central en dirección sur, el trazo de la falla se hace según evidencia de elementos geomorfológicos como silletas y hombreras de falla, pero no se logra identificar en esta zona a qué unidades afecta. La segunda falla, nombrada como Falla 2 en este estudio, no ha sido reportada en estudios anteriores, esta tiene una longitud de 904.58 m y orientación N62W, afecta principalmente a las lodolitas del miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande hacia la parte noroeste de la microcuenca, en sectores asociados a la zona de falla, donde las lodolitas presentan verticalización de sus estratos y deformación evidenciada mediante textura augen y mini pliegues.

En cuanto al potencial hidrogeológico, la mayoría de las unidades geológicas de la zona de estudio se clasificaron como acuíferos y solo una como acuitardo. La parte inferior de los Depósitos de caída piroclástica es la unidad que se clasifico como acuitardo considerando el tamaño de grano (ceniza) y la presencia de matriz arcillosa lo cual hace que presente menor capacidad de absorción y transmisión de agua.

El miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande (AQG) es un acuífero de porosidad secundaria. La descarga natural se da a través de manantiales de fractura, con los más bajos caudales de descarga medidos (0.20 a 5.29×10^{-3} l/s) en la zona. El agua es dulce (CE 194 uS/cm), con pH ácido (6.03) y temperatura promedio de 17.7 °C. Este acuífero tiene el agua con la segunda más alta mineralización e intermedia temperatura entre los valores para los acuíferos de la microcuenca.

La Formación Manizales (AFM) es un acuífero de doble porosidad (porosidad secundaria por fracturamiento). La descarga natural se da a través de manantiales de fractura, con los segundos más altos caudales de descarga medidos (1.52 a 26.53×10^{-3} l/s) en la zona. El agua es dulce (CE 276.33 uS/cm), con pH ácido (6.46) y temperatura promedio de 18 °C. Este acuífero tiene el agua con la más alta mineralización y la más alta temperatura dentro de la microcuenca.

La parte superior de los Depósitos de caída piroclástica (ADCS) es un acuífero de alta porosidad primaria. La descarga natural se da por manantiales de contacto y de depresión, con los más altos caudales de descarga medidos (1.57 a 43.48×10^{-3} l/s) en la zona. El agua es dulce (CE 134.5 uS/cm), con pH ácido (6.27) y temperatura promedio de 17.46 °C. La mineralización del agua y la temperatura se consideran intermedias, comparadas con los datos de otras unidades acuíferas.

Los Depósitos vulcanosedimentarios (AVS) son un acuífero de alta porosidad primaria. La descarga natural se da a través de manantiales tipo artesiano, con intermedios caudales de descarga (1.35 a 9.21×10^{-3} l/s). El agua dulce (CE 126.7 uS/cm), con pH ácido a neutro (6.82) y temperatura promedio de 16.67 °C. La mineralización y la temperatura se consideran los más bajos comparadas con los datos de otras unidades acuíferas.

Los Depósitos aluviales se clasifican como una unidad con potencial acuífero debido a su porosidad primaria, sin embargo, en ella no se encontró evidencia de descargas de agua subterránea a través de manantiales.

Los datos de caudal, conductividad eléctrica y temperatura medidos en los siete manantiales seleccionados mostraron diferentes tipos de comportamiento durante el monitoreo. Las tendencias de estas variables indicaron que la variación multitemporal se da como respuesta a la recarga que se da por precipitación.

En los hidrogramas generados para los siete manantiales monitoreados se observaron cambios en el almacenamiento de los acuíferos debido a la recarga general que se da durante segunda temporada de lluvia en la zona (agosto-enero) y a la recarga temporal que se da por eventos de lluvia individuales sucedidos dentro del periodo entre noviembre, 2019 y febrero, 2020.

Algunos eventos de precipitación ocurridos durante el tiempo del monitoreo generaron picos de caudal e hidrogramas individuales asociados a ellos. Estos hidrogramas fueron usados para determinar la respuesta de los acuíferos a estos eventos.

Los datos indican que la magnitud del incremento máximo de caudal (pico) y el tiempo que se demora el manantial en alcanzar el mismo (tiempo de concentración) están determinados por la intensidad y no el total de la precipitación caída.

En cuanto a los factores determinantes en la duración del tiempo de recesión (el tiempo que el acuífero se demora para soltar parte o la totalidad del agua recargada) estos son el volumen de caudal incrementado y las propiedades hidráulicas del acuífero.

Para realizar comparaciones entre unidades acuíferas según tiempos de concentración (días para alcanzar pico en el hidrograma) como respuesta a los eventos de precipitación, solo se consideraron los eventos E1 y E2 ya que son los únicos eventos

a los cuales todos los manantiales están respondiendo. Además, teniendo en cuenta que incluso los manantiales de una misma unidad no responden a un mismo evento con iguales tiempos de respuesta, la comparación entre unidades acuíferas se hace según rangos de estos tiempos de concentración. Así, la unidad ADCS tiene el rango más amplio de respuesta (4 a 26 días), la unidad AQG tiene un rango intermedio de respuesta (4 a 19 días) y la unidad AFM tiene el rango más corto de respuesta (11 a 19 días).

En este estudio se demuestra la relación entre la precipitación y los caudales de descarga. Así, los hidrogramas generados con los datos del monitoreo para la zona de estudio de pueden dividir en tres tipos, basados en su respuesta a la precipitación.

El primer tipo presenta una tendencia de recesión general seguida por una recuperación leve de los caudales. La recesión general refleja la pérdida del agua recargada en la primera mitad de la segunda temporada de lluvias del año hidrológico (especialmente la de los meses de septiembre y octubre, ya que el segundo mes tiene el máximo valor de precipitación). Los eventos de precipitación ocurridos durante el monitoreo generan recarga temporal, pero sin incremento neto en el almacenamiento del acuífero ya que parte de esta recarga se pierde rápidamente. Este tipo de hidrograma es similar al hidrograma generado con modelación para la Quebrada El Perro, en el estudio realizado por Corpocaldas (2014). Los hidrogramas de los manantiales LF017 y LF094 del AQG y los manantiales LF003, LF063 y LF110 de la unidad ADCS exhiben este tipo de comportamiento.

El segundo tipo de hidrograma presenta una tendencia ascendente del caudal durante todo el tiempo del monitoreo, que se interpreta como un aumento progresivo en el almacenamiento del agua del acuífero por recarga proveniente de la primera mitad de

la segunda temporada de lluvias (septiembre y octubre). Además, aunque en ellos se observa incrementos de caudal como respuesta a la precipitación caída durante el monitoreo (diciembre a febrero), sólo una parte de esta agua tiene efectos positivos en el almacenamiento ya que otra parte de esta recarga es drenada fuera del acuífero. El hidrograma del manantial LF029 (AFM) exhibe este comportamiento.

El tercer tipo de hidrograma presenta una tendencia ascendente del caudal desde diciembre hasta enero, seguida de un periodo de recesión que se observa hasta el final del monitoreo. A diferencia de los otros dos tipos de hidrogramas, en este los eventos de precipitación que sucedieron durante el monitoreo no generan picos ni hidrogramas individuales. El hidrograma del manantial LF077 de la unidad ADCS exhibe este comportamiento.

Los datos del monitoreo indican que la variación multitemporal de la temperatura sigue una tendencia similar al caudal. Esto podría indicar que la temperatura presenta una respuesta inmediata a los procesos de recarga y recesión del agua en los acuíferos y por lo tanto podría usarse como una alternativa al caudal para monitorear procesos de recarga y descarga.

En el caso de la conductividad eléctrica, no se observó variación de este parámetro como respuesta inmediata a los periodos de recarga o pérdida de almacenamiento. Esto podría indicar que los cambios en la mineralización de estos acuíferos se dan con tiempos de duración diferentes a las variaciones en el almacenamiento, por consiguiente, la conductividad eléctrica no sería de utilidad en estudios similares a este como indicador de recarga ya que no presenta respuesta inmediata a la precipitación.

El análisis de las curvas de recesión permitió obtener datos de parámetros hidráulicos de las unidades acuíferas monitoreadas. Los parámetros obtenidos fueron el coeficiente de recesión (Alpha) y su inverso, la capacidad de regulación (C). Este último relacionado a los procesos de almacenamiento y drenaje del agua dentro del acuífero, los cuales se asocian a la porosidad específica y el coeficiente de almacenamiento.

Los datos indican que la mayor capacidad de regulación (C) se presenta en las unidades AQQ (146 días) y AFM (118 días). Estos valores indican que estos acuíferos tardan más en soltar el agua que han recibido por recarga. La unidad ADCS al tener los valores más bajos de C (50.7 días), posee menor capacidad de regulación indicando que el agua es descargada en un menor periodo de tiempo.

Al analizar de manera conjunta la productividad de los acuíferos, considerando los valores de caudal de descarga, comportamiento general del hidrograma y los valores de C se puede decir que la unidad AFM tiene la más alta productividad. Las capas acuíferas conformadas por arenas (en la parte superior de la formación) presentan los mayores caudales de descarga, un alto incremento de volumen por eventos de precipitación y una intermedia a alta capacidad de regulación C. Por el contrario, la unidad AQQ es la de menor productividad, esta tiene los más bajos valores de caudales de descarga, bajos incrementos de volúmenes por eventos de precipitación, menores tiempos de duración en la curva de recesión y altos valores de capacidad de regulación C.

En cuanto al carácter homogéneo o heterogéneo según las características hidroquímicas e hidráulicas de las unidades acuíferas y cómo se comportan frente a los eventos de recarga por precipitación, la unidad ADCS presenta un carácter heterogéneo ya que los manantiales pertenecientes a esta unidad varían entre ellos en la mayoría de

los parámetros evaluados (caudal, capacidad de regulación, coeficiente Alpha y volúmenes almacenados al inicio de las curvas de recesión). Para el caso de las unidades AQG y AFM al sólo tener un manantial de monitoreo, no se logra analizar qué carácter presentan.

Existen indicaciones de que la zona de la Falla El Perro está afectando las propiedades fisicoquímicas de las unidades AQG y ADCS. El caudal medido en los dos manantiales que se encuentran en la zona de falla muestra incremento, por un lado, un incremento de 2480% en el manantial LF110 respecto al valor promedio de caudal en el ADCS y un incremento de 385% en el manantial LF094 respecto al promedio de caudal en el AQG.

La conductividad eléctrica también indica importantes variaciones en la zona de la Falla El Perro. El manantial LF094 presenta un aumento en CE de 2061% y una disminución del pH de un 64%, comparado con el promedio para la unidad acuífera a la que pertenece (AQG).

Los valores de capacidad de regulación C en los manantiales ubicados en la zona de falla muestran ha zona. El manantial LF094 disminuye en C 81% respecto al valor promedio de la unidad AQG y el manantial LF110 aumenta en C 423% respecto al valor promedio de la unidad ADCS. Esto junto al aumento de volúmenes de agua almacenada al inicio de las recesiones y el aumento de caudales de descarga de dichos manantiales, indican que la falla genera incrementos en la permeabilidad y la capacidad de regulación de las unidades acuíferas a las cuales pertenecen estos manantiales.

12. Limitaciones y Recomendaciones

El número de manantiales monitoreados no fue el mismo para todas las unidades acuíferas, por ejemplo, para las unidades AFM y AQG se contó con datos de sólo uno y un par de manantiales respectivamente lo cual no permitió realizar conclusiones en cuanto a características hidráulicas propias, ni hacer comparaciones entre ellas.

Para mejorar esta caracterización es necesario realizar un monitoreo de las propiedades fisicoquímicas de mayor cantidad de manantiales en un largo periodo de tiempo con muestreos al menos semanales para lograr observar variaciones de estos parámetros y por consiguiente evaluar las características hidráulicas de estas unidades acuíferas.

Las propiedades fisicoquímicas e hidráulicas y los tiempos de respuesta analizados mediante los hidrogramas para el tiempo de monitoreo son la primera descripción que se obtiene para estos acuíferos y deben considerarse indicativas, ya que solo están reflejando la respuesta del acuífero a una parte del año hidrológico. Se recomienda extender el monitoreo a varios años completos con el fin de observar la respuesta de los acuíferos a las variaciones anuales de recarga y obtener curvas de recesión más extensas y más numerosas.

Teniendo en cuenta que los datos de precipitación analizados fueron diarios mientras que el monitoreo fue semanal, los tiempos de respuesta de los acuíferos pueden ser un poco más cortos o largos, comparado a los medidos en los hidrogramas. Sin embargo, ya que las mediciones de caudales se hicieron todas al mismo tiempo no se espera que las comparaciones entre las diferentes unidades varíen.

Las propiedades hidráulicas de las unidades AQG y AFM se obtuvieron con datos de un solo manantial. Para confirmar sus características en cuanto a capacidades

de regulación y almacenamiento y caracteres de homogeneidad o heterogeneidad es necesario incrementar la densidad de manantiales a monitorear de cada unidad.

El 69% de los manantiales inventariados presentan caudales muy bajos, que no pueden ser medidos con el método volumétrico y no permiten tomar muestras representativas para hacer mediciones de parámetros hidroquímicos. Es necesario buscar métodos alternativos para hacer mediciones de caudales mínimos y aumentar el número de muestras con datos de parámetros hidroquímicos.

Es necesario hacer estudios hidroquímicos detallados para caracterizar los cambios en la calidad química del agua durante la recarga y los eventos de recesión. Se debe poner especial atención a la zona de falla y determinar el origen de la alta conductividad eléctrica de los manantiales ubicados en ella.

Aún con la información obtenida en la cartografía geológica, no se logró definir el rumbo y buzamiento de la Falla El Perro y la Falla 2. Se requiere un estudio estructural detallado de estas con el fin de determinar sus comportamientos (componente en rumbo y buzamiento).

Se sugieren estudios geofísicos para zonas de montaña como estudios de electromagnetismo para definir espesores y características de confinamiento de las unidades acuíferas, además, obtener mayor detalle respecto a la afectación de la falla en las propiedades hidráulicas de las unidades acuíferas.

13. Referencias

- Aguas de Manizales. (2018). *Evaluación integral de prestadores empresa Aguas de Manizales* S.A. E.S.P.
<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Acueducto%2C%20alcantarillado%20y%20aseo/Acueducto%20y%20Alcantarillado/2018/Sep/ev.integralmanizales20-12-2014.pdf>
- Aguirre, F., Ballesteros, H., Gutiérrez, J., y Montoya, M. (1993). *Modelo tridimensional de las formaciones superficiales en Manizales*. (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Álvarez, A. (1983). *Geología de la Cordillera Central y el Occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Mesocenozóicos*. (Vol. 26, 1983. No. 2, pp. 1-175). Boletín Geológico.
- Amit, H., Lyakhovsky, V., Katz, A., Starinsky, A., y Burg, A. (2002). *Interpretation of spring recession curves*. (Vol. 40, 2002. No. 5, pp. 543-551). Groundwater.
- Anton, D. (1993). *Thirsty Cities, urban environments and water supply in Latin America*. IDRC, The International Development Research Centre, Canada.
- Baena, C., Andreo, B., Mudry, J., y Cantos, F. (2009). *Groundwater temperature and electrical conductivity as tools to characterize flow patterns in carbonate aquifers: The Sierra de las Nieves karst aquifer, southern Spain*. (Vol. 17, 2009. No. 4, pp. 843-853). Hydrogeology Journal.
- Bedoya, A. (2013). *Evaluación diagnóstica integral y sistemática de la cuenca hidrográfica de la Quebrada el Perro, del municipio de Manizales (Caldas-Colombia)*. (Tesis de maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.

- Betancourth, G., Buitrago Y., Buitrago, j., Cadavid, L., Corrales, J., Gallego, L., Montoya, N., Navarrete, W., y Quiroz, O. (1998). *Contribución a la evaluación hidrogeológica, susceptibilidad a fenómenos volcánicos, caracterización de áreas fuente de sedimentos y morfotectónica de las fallas probablemente activas de la cuenca del río Chinchiná (Caldas)* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Betancur, T., Martínez, C., García, E., y Escobar-Martínez, J. (2017). *Identification and characterization of regional water flows contributing to the recharge of an unconfined aquifer*. (No. 85, pp. 70-85). Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia.
- Boroschek, R., y Domb, F. (2007). *Información para la gestión de riesgo de desastres*. Estudio de caso de cinco países: Chile.
- Borrero, C., y Naranjo, J. (1990). *Formación Casabianca: Un ejemplo colombiano de Agradación inducida por volcanismo en una cuenca fluvial*. (pp. 1-41). Journal of Volcanology and Geothermal Research.
- Botero, G. (1963). *Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia*. (Vol. 57, 1963, pp. 57-101). Annals of the Mine Faculty, National University of Colombia.
- Botero, G. A., y González, H. (1983). *Algunas localidades fosilíferas cretáceas de la Cordillera Central, Antioquia y Caldas, Colombia*. (No. 7, pp. 15-28). Geología Norandina.
- Bryan, K. (1919). *Classification of springs*. (Vol. 27, No. 7, 1919, pp. 522-561). The Journal of Geology. The University of Chicago press Journals.

- Cascini, L., Calvello, M., y Grimaldi, G. M. (2010). *Groundwater modeling for the analysis of active slow-moving landslides*. (Vol. 136, 2010. No. 9, pp. 1220-1230). Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Centamore, E., Ciccacci, S., Del Monte, M., Fredi, P., y Palmieri, E. (1996). *Morphological and morphometric approach to the study of the structural arrangement of northeastern Abruzzo (central Italy)*. (Vol. 16, 1996. No. 2, pp.127-137). Geomorphology. Elsevier.
- Cervi, F., Ronchetti, F., Martinelli, G., Bogaard, T., y Corsini, A. (2012). *Origin and assessment of deep groundwater inflow in the Ca'Lita landslide using hydrochemistry and in situ monitoring*. (Vol. 16, 2012. No. 11, pp. 4205-4221) Hydrology and Earth System Sciences.
- Corpocaldas. (2014). *Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Chinchiná en el Departamento de Caldas - Colombia*. http://www.corpocaldas.gov.co/dynamic_page.aspx?p=1508
- Corpocaldas. (2015). *Plan de ordenamiento territorial del Municipio de Manizales 2015-2027*. <http://www.manizales.gov.co/RecursosAlcaldia/201507281628084766.pdf>
- Cortés, A. (2003). *Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una ciudad de media montaña andina. Caso de estudio: Manizales* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- Custodio, E., y LLamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea*. (2ª ed., Tomo I, pp. 259, 263, 385-386). Omega.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application...* Victor Dalmont.

- Dewandel, B., Lachassagne, P., Bakalowicz, M., Weng, PH y Al-Malki, A. (2003). *Evaluación del espesor del acuífero mediante el análisis de hidrogramas de recesión. Aplicación al acuífero de roca dura ofiolítica de Omán*. (Vol. 274, 2003. No. 1-4, pp. 248-269). Revista de hidrología.
- Echavarría, J., Hoyos, J., López, M., y Peña, L. (1991). *Geología de la cuenca del río Chinchiná: sector Manizales-Chinchiná* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- El Tiempo. (2011). *Manizales sin agua*. Archivo digital de noticias de Colombia. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-4927019>
- Escobar, J., y Patiño, I. (2003). *Zonificación de la estabilidad de la ladera nor-occidental de la Quebrada El Perro* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Etayo, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., y Galvis N. (1983). *Mapa de terrenos geológicos de Colombia*. (No. 14, pp. 1-235). INGEOMINAS: Publicaciones Geológicas.
- Fetter, C. (2018). *Applied Hydrogeology*. (4ª ed., pp. 76, 83-84) Waveland Press.
- Figueredo, J. (2019). *Metodología para determinar zonas de recarga hídrica en municipios o comunidades con recursos financieros limitados*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Fitts, C. (2002). *Groundwater science*. (2ª ed., pp. 346-347). Elsevier.
- Flórez, A. (1986). *Geomorfología del área Manizales, Chinchiná, Cordillera Central, Colombia*. (Vol. 9, pp. 1-158). Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Instituto

Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Investigación y Divulgación Geográfica.

Freeze, R., y Cherry, J. (1979). *Groundwater (Cap. 3 y 7)*. Englewood Cliffs.

Gómez, A. (1990). *Aporte al conocimiento de las sedimentitas aflorantes al este de Manizales - Colombia* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

González, H. (1980). *Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina)*. (Vol. 23, 1980. No. 1, pp. 1-174). Boletín Geológico.

González, H. (2001). *Geología de las planchas 206 Manizales 225 Nevado del Ruiz. Escala 1:100.000* Ingeominas. Ministerio de minas y energía.

Grosse, E. (1926). *Estudio geológico del terciario carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera central de Colombia: entre el río Arma y Sacaojal*. (pp. 1-361). Dietrich Reimer.

Guggenmos, M., Daughney, C., Jackson, B., y Morgenstern, U. (2011). *Regional-scale identification of groundwater-surface water interaction using hydrochemistry and multivariate statistical methods, Wairarapa Valley, New Zealand*. (Vol. 15, 2011. No. 11, pp. 3383-3398). Hydrology and Earth System Sciences.

Guzmán, J. (1991). *Evidencias de actividad neotectónica en el Área de Manizales-Colombia* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

Hatipoglu-Bagci, Z., y Sazan, M. S. (2014). *Characteristics of karst springs in Aydıncık (Mersin, Turkey), based on recession curves and hydrochemical and isotopic parameters*. (Vol. 47, 2014. No. 1). Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.

- Heath, R. (1983). *Basic ground-water hydrology*. (1ª ed., pp. 26 y 28). U.S. Geological Survey Water-Supply.
- Hernández, Y., Ramírez, H. (2016). *Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca Cay, Ibagué, Tolima, Colombia*. (Vol. 26, 2016. No. 2, pp. 111-128). Ciencia e Ingeniería Neogranadina. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1800>
- Herrera, J., y López, S. (2003). *Estratigrafía de la Formación Manizales y Propuesta de un modelo de depósito* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- INGESAM. (2005). *Estudio de factibilidad para la recuperación y mantenimiento de la calidad de la cuenca del Río Chinchiná - Fase I*. Aguas de Manizales.
- Jiang, Y., Cao, M., Yuan, D., Zhang, Y., y He, Q. (2018). *Hydrogeological characterization and environmental effects of the deteriorating urban karst groundwater in a karst trough valley: Nanshan, SW China*. (Vol. 26, 2018. No. 5). Hydrogeology Journal.
- Kresic, N. (2010). *Types and classifications of springs*. En N. Kresic y Z. Stevanovic (Eds.), *Groundwater hydrology of springs* (pp. 31-85). Butterworth-Heinemann.
- Kresic, N., y Bonacci, O. (2010). *Spring discharge hydrograph*. En N. Kresic y Z. Stevanovic (Eds.), *Groundwater hydrology of springs* (pp. 129, 134-136). Butterworth-Heinemann.
- Lozano, H., Pérez, H., y Vesga, C. J. (1984). *Prospección geoquímica y génesis del mercurio en el flanco occidental de la cordillera Central de Colombia: municipios*

- de Aránzazu, Salamina y Pacora, Departamento de Caldas.* (Vol. 27, 1983. No. 1, pp. 77-169). Boletín Geológico.
- Machuca, D. (2012). *Separación de flujo base en la cuenca alta del Río de Oro utilizando algoritmos numéricos* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Manga, M. (2001). *Uso de manantiales para estudiar el flujo de agua subterránea y los procesos geológicos activos.* (Vol. 29, 2001, pp. 201-228). Revisión anual de Ciencias de la Tierra y Planetarias.
- Manga, M., y Kirchner, J. (2004). *Interpreting the temperature of water at cold springs and the importance of gravitational potential energy.* (Vol. 40, p.1). Water resources research.
- Meinzer, O. (1923). *The occurrence of ground water in the United States with a discussion of principles.* (Vol. 50, 1923. No. 846). University of Chicago.
- Miller, D., y Sias, J. (1998). *Deciphering large landslides: linking hydrological, groundwater and slope stability models through GIS.* (Vol. 12, 1998. No. 6, pp, 923-941). Hydrological Processes.
- Montaña, J., y Morales, J. (2000). *Estudio geológico-estructural de la Falla el Perro al este de la ciudad de Manizales departamento de Caldas* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Moreno, M., Pardo, A., y Gómez, A. (1993). *Evidencias paleontológicas de emersión parcial del basamento oceánico del Valle del Río Cauca durante el Campaniano-Mastrichtiano.* En VI. Congreso Colombiano de Geología.

- Naranjo, J., y Ríos, P. (1989). *Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos*. (Vol. 10, 1989. Nos. 1-3, pp. 18, 22 y 33). Revista Universidad de Caldas.
- Peñuela, L., y Carrillo, J. (2013). *Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México*. (Vol. 81, pp. 18-32). Investigaciones geográficas.
- Pérez, J., Ávila, J., y Israde, I. (2018). *Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán*. (Vol. 70, 2018.No.3, pp.675-688). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- Ramos, A., Trujillo, M., y Prada, L. (2015). *Niveles umbrales de lluvia que generan deslizamientos: Una revisión crítica*. (Vol. 25, 2015. No. 2, pp. 61 – 80). Ciencia e Ingeniería Neogranadina. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1432>.
- Restrepo, J., y Toussaint, J. (1982). *Metamorfismos superpuestos en la Cordillera Central de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ríos, J., y Sánchez, R. (1996). *Fallas activas entre el sistema de fallas de Romeral y el occidente del sistema de fallas de Palestina en el departamento de Caldas* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Ríos-Sánchez, M. (2012). *Aplicación de sensores remotos para la caracterización de la hidrogeología de áreas de montaña, aplicación al sistema acuífero de Quito (saq), Ecuador* (Tesis doctoral). Michigan Technological University.
- Rodríguez, M., Fernández, A., Hayashi, M., y Moral, F. (2018). *Using water temperature, electrical conductivity, and pH to Characterize surface–groundwater relations in*

- a shallow ponds system (Doñana National Park, SW Spain)*. (Vol. 10, 2018. No. 10, p. 2). Water.
- Sánchez, M. (1992). *Catálogo de dataciones isotópicas en Colombia*. (Vol. 32 No. 1-3, pp. 127-187). Boletín Geológico.
- Sánchez, F. (2017). *Conceptos fundamentales de hidrogeología*. Universidad de Salamanca.
- Sánchez, M. (1992). *Catálogo de dataciones isotópicas en Colombia*. (Vol. 32 No. 1-3, pp. 127-187). Boletín Geológico.
- Servicio Geológico Colombiano. (2004). *Atlas de aguas subterráneas de Colombia en escala 1:500.000*.
- Singhal, B., y Gupta, R. (2010). *Hidrogeología aplicada de rocas fracturadas*. Springer Science & Business Media.
- Somers, L., y McKenzie, J. (2020). *A review of groundwater in high mountain environments*. (Vol. 7, 2020. No. 6). Wiley Interdisciplinary Reviews: Water.
- Springer, A., Stevens, L., Anderson, D., Parnell, R., Kreamer, D., Levin, L., y Flora, S. (2008). A comprehensive springs classification system. *Aridland springs in North America: ecology and conservation*. University of Arizona Press and Arizona–Sonora Desert Museum, Tucson (pp. 49-75).
- Trček, B., y Zojer, H. (2010). *Recharge of springs*. En N. Kresic y Z. Stevanovic (Eds.), *Groundwater hydrology of springs* (p. 114). Butterworth-Heinemann.
- Van Asch, T., Malet, J., y Bogaard, T. (2009). *The effect of groundwater fluctuations on the velocity pattern of slow-moving landslides*. (Vol. 9, 2009. No. 3, pp. 739-749). Natural Hazards and Earth System Sciences.

- Velandia, F., Cetina, M., Castellanos, E., y Gómez, S. (2016). *Análisis de fracturas y cinemática de fallas geológicas como primer aporte al modelo conceptual de aguas subterráneas en la zona de Charta, Macizo de Santander-Colombia*. (Vol. 31, 2016. No. 2, pp. 37-56). Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Industrial de Santander.
- Vélez, M., y Rhenals, R. (2008). *Determinación de la recarga con isotopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe de Antioquia*. (No. 24, pp. 37-53). Boletín de Ciencias de la Tierra.
- Vera, J., y Albarracín, A. (2017). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas*. (Vol. 27, 2017. No. 2, pp.109-136). Ciencia e Ingeniería Neogranadina. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2309>
- Vogt, T., Hoehn, E., Schneider, P., Freund, A., Schirmer, M., y Cirpka, O. (2010). *Fluctuations of electrical conductivity as a natural tracer for bank filtration in a losing stream*. (Vol. 33, 2010, pp. 1926-1308) Advances in Water Resources.
- Zektser, I., y Everett, L. (2004). *Groundwater resources of the world and their use*. Paris, UNESCO.