

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA DEL RÍO PAVAS EN LA
ZONA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO VIAL MULALÓ – LOBOGUERRERO EN EL
MUNICIPIO DE LA CUMBRE – VALLE DEL CAUCA

ING. ORLANDO CORREA BASTO

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

MAESTRÍA EN HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2020

MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA DEL RÍO PAVAS EN LA
ZONA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO VIAL MULALÓ – LOBOGUERRERO EN EL
MUNICIPIO DE LA CUMBRE – VALLE DEL CAUCA

ING. ORLANDO CORREA BASTO

Tesis de Maestría

DIRECTOR DEL TESIS DE MAESTRÍA

GEÓLOGO Ph. D. DIEGO FELIPE GÓMEZ GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

MAESTRÍA EN HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2020

Nota de aceptación:

La tesis de maestría “Modelo hidrogeológico conceptual del río Pavas en la zona de influencia del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero en el Municipio de la Cumbre – Valle del Cauca” presentado por el estudiante Orlando Correa Basto, para optar por el título de Magister en Hidrogeología Ambiental de la Universidad Antonio Nariño, cumple con todos los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Firma del director de la Tesis de Maestría.

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 21 de mayo de 2020

ABSTRACT

The objective of the present master's work is to establish the behavior of the underground water system through the elaboration of a conceptual hydrogeological model for the Río Pavas Valley Basin, which allows estimating whether the passage of the Mulaló - Loboguerrero road project can generate alterations to the hydrogeological dynamics of the area.

The research began with a bibliographic review in indexed articles, books, and specialized magazines in hydrogeology, allowing to establish a framework of theories and key concepts for the development of this work.

It was possible to determine in the theoretical framework that the elaboration of conceptual hydrogeological models should be the result of the elaboration and analysis of a geological model, a hydrological characterization, a hydraulic characterization, and a hydrogeochemical characterization, which lead to the determination of hydrogeological units and its potential aquifers, to finally establish the hydrogeological behavior and represent it through a conceptual model, using computational tools for the graphic representation of the established hydrogeological behavior.

Where isotopic analyzes can be a tool for enriching conceptual models or also a tool for validating them.

The research work was carried out in four systematic phases, the first consisted of gathering and analyzing existing information related to geology, drilling, geophysics, hydrology, precipitation in the area, water balance, the inventory of groundwater points and hydraulic tests. Based on the determination of the information collected, field activities were established to complement the information and comply with the necessary elements to develop a conceptual model. In this phase,

a monitoring network was established that involved groundwater catchments, springs, surface water, and rainwater, purging groundwater catchments, and taking samples for physicochemical and isotopic analysis.

The third phase focused on the analysis and interpretation of the existing data, as well as the data collected from the capo activities, allowing the geological model, hydrological characterization, availability of underground water resources, hydraulic characterization, and hydrogeochemical characterization to be established, the isotopic characterization, and the definition of hydrogeological units. The fourth and last phase of the investigation was the elaboration of the conceptual hydrogeological model with the estimation of possible alterations of the hydrogeological dynamics by the road project and the proposal of recommendations and possible future investigations.

Among the main results of the research is the updating of the geology for the Pavas River basin, identifying a unit of volcanic rocks composed of diabase and basalts represented by the Volcanic Formation (Kv). Residual soils as a result of intense weathering and in situ decomposition of volcanic rocks in the area and the unit of recent deposits made up of the Alluvial Cones (Qca) and the Alluvial Deposits (Qal). Structural geology influenced by the regional faults with NNE-SSW orientation such as the Mulaló, La Cumbre - Aguas Claras, and Pavas - Quebrada Seca faults are established.

The hydrological characterization allowed establishing an average rainfall of 92.2 mm/month with a potential infiltration of 35%, which can occur in areas with high recharge potential associated with the upper parts of La Cumbre and La Pinera, southern and northern slopes respectively.

As a result of the hydraulic characterization, the main hydraulic parameters for the geological units present could be established, defining a Hydraulic Conductivity for the area of greatest fracturing of $6.36E-2m$ / day and in the area of low fracturing of $3.05E-4m$ /day. The Residual Soils (Qsr)

develop an average Hydraulic Conductivity of $4.39E-3$ m / day and the Alluvial Cones (Qca) a Hydraulic Conductivity between $9.0E-1$ m / day and $6.35E-4$ m / day.

Hydrogeochemical, the Pavas River basin, is characterized by presenting calcium and/or magnesium bicarbonate facies (Ca / Mg-HCO₃), reflecting groundwater flows of local character or short residence times, with a high influence of meteoric waters, as well as the presence of minerals found in the quaternary deposits of the study area.

The isotopic abundance of the rainwater samples reflects that there is a decrease in the NE-SW direction as a result of the movement of vapor masses from sectors from lower to higher altitudes (from the Serranía de Morales to the Cresta de Gallo sector), causing an isotopic impoverishment, for its part, the samples associated with surface currents indicate that the influence of evaporation that occurs in the basin is insignificant compared to the isotopic composition of these waters. As for groundwater, three groups are differentiated; two associated with waters of meteoric origin and one that shows a possible fractionation between water and minerals.

The hydrogeological characterization allowed characterizing three hydrogeological units. The hydrogeological unit A.2., which associates the aquifers with a primary porosity, moderate production, and of a local nature, which includes the Alluvial Cones (Qca) and the Alluvial Deposits (Qal). The C.1. Hydrogeological unit groups rocks or sediments with a limited groundwater resource (aquitard), made up of Residual Soils (Qsr) and volcanic rock with a moderate degree of fracturing. The hydrogeological unit C.2., Made up of rocks or sediments without groundwater resources (aquatic), within which the Volcanic Formation (Kv) is classified, with a low to no degree of fracturing.

The conceptual hydrogeological model for the Río Pavas basin establishes that the hydrogeological behavior in the A.2 hydrogeological unit is associated with low-flow local flows with recharge zones adjacent to the location of the aquifer and that given the paleotopographic and of deposition

of the sediments a confining behavior in the eastern sector of the aquifer is presented, which allows an easy recharge against precipitation events and with the contribution of surface currents.

Taking into account the constructive characteristics of the road design of the Mulaló-Loboguerrero road project, as it passes through the Valle de Pavas and the hydrogeological characteristics of local flows, with little storage and travel time and easy recharge, as well as the distance to which it will pass. The Pavas aqueduct road project, it can be established that the road project will not have a negative influence on the natural hydrogeological behavior of the aquifer present in the Pavas Valley.

As future research, the present conceptual model can be used as the basis for numerical modeling that contemplates stationary and transitory scenarios in order to establish hydrogeological behavior with the road project. It is also recommended to carrying out the dating of groundwater to validate the transit times of the water using radiogenic isotopes (H^3) tritium.

Keywords: Conceptual hydrogeological model, Valle de Pavas, hydrogeochemistry, isotopes, hydrogeology.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de maestría es establecer el comportamiento del sistema hídrico subterráneo mediante la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual para la Cuenca del Valle del Río Pavas, que permita estimar si el paso del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero puede llegar a generar alteraciones a la dinámica hidrogeológica de la zona.

La investigación inició con una revisión bibliográfica en artículos indexados, libros y revistas especializadas en hidrogeología, permitiendo establecer un marco de teorías y conceptos claves para el desarrollo del presente trabajo.

Se pudo determinar en el marco teórico que la elaboración de modelos hidrogeológicos conceptuales, deben ser el resultado de la elaboración y análisis de un modelo geológico, una caracterización hidrológica, una caracterización hidráulica y una caracterización hidrogeoquímica, que llevan a la determinación de unidades hidrogeológicas y sus potenciales acuíferos, para finalmente establecer el comportamiento hidrogeológico y representarlo mediante un modelo conceptual, empleando herramientas computacionales para la representación gráfica del comportamiento hidrogeológico establecido. Donde los análisis isotópicos pueden ser una herramienta de enriquecimiento de los modelos conceptuales o también una herramienta para la validación de los mismos.

El trabajo de investigación se desarrolló en cuatro fases sistemáticas, la primera consistió en la recopilación y análisis de información existente relacionada con la geología, perforaciones, geofísica, hidrología, precipitación en la zona, balance hídrico, el inventario de puntos de agua subterráneo y pruebas hidráulicas. A partir de la determinación de la información recopilada se

establecieron actividades de campo encaminadas a complementar la información y cumplir con los elementos necesarios para elaborar un modelo conceptual. En esta fase se estableció una red de monitoreo que involucrara captaciones de agua subterránea, manantiales, agua superficial y agua lluvia, se realizó la purga de captaciones subterráneas y la toma de muestras para el análisis fisicoquímico e isotópico.

La tercera fase, se concentró en el análisis e interpretación de los datos existentes, así como los levantados en las actividades de campo, permitiendo establecer el modelo geológico, la caracterización hidrológica, la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo, la caracterización hidráulica, la caracterización hidrogeoquímica, la caracterización isotópica y la definición de unidades hidrogeológicas. La cuarta y última fase de la investigación fue la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual con la estimación de posibles alteraciones de la dinámica hidrogeológica por el proyecto vial y el planteamiento de recomendaciones y posibles investigaciones futuras.

Dentro de los principales resultados de la investigación se tiene la actualización de la geología para la cuenca del Río Pavas, identificando una unidad de rocas volcánicas compuesta por diabasas y basaltos representada por la Formación Volcánica (Kv). Suelos residuales producto de la meteorización intensa y descomposición *in situ* de las rocas volcánicas de la zona y la unidad de depósitos recientes conformado por los Conos Aluviales (Qca) y los Depósitos Aluviales (Qal). Se establece una geología estructural influenciada por las fallas regionales con orientación NNE-SSW como las fallas Mulalo, La Cumbre - Aguas Claras y Pavas – Quebrada Seca.

La caracterización hidrológica permitió establecer una precipitación promedio de 92.2 mm/mes con una infiltración potencial del 35%, la cual se puede dar en las zonas con potencial de recarga alta asociada a las partes altas de La Cumbre y La pinera, laderas sur y norte respectivamente.

Como resultado de la caracterización hidráulica se pudieron establecer los principales parámetros hidráulicos para las unidades geológicas presentes, definiendo una Conductividad Hidráulica para la zona de mayor fracturamiento de $6.36E-2$ m/día y en la zona de bajo fracturamiento de $3.05E-4$ m/día. Los Suelos Residuales (Qsr) desarrollan una Conductividad Hidráulica promedio de $4.39E-3$ m/día y los Conos Aluviales (Qca) una Conductividad Hidráulica entre $9.0E-1$ m/día y $6.35E-4$ m/día.

Hidrogeoquímicamente la cuenca del Río Pavas se caracteriza por presentar facies bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas (Ca/Mg-HCO₃), reflejando flujos de agua subterránea de carácter local o de cortos tiempos de residencia, con una alta influencia de aguas meteóricas, así como la presencia de minerales que se encuentran en los depósitos cuaternarios del área de estudio.

La abundancia isotópica de las muestras de agua lluvia, reflejan que se presenta una disminución en dirección NE-SW producto del movimiento de masas de vapor de sectores de menor a mayor altitud (desde la Serranía de Morales hacia el sector Cresta de Gallo), causando un empobrecimiento isotópico, por su parte las muestras asociadas a las corrientes superficiales indican que la influencia la evaporación que se presenta en la cuenca es insignificante frente a la composición isotópica de estas aguas. En cuanto a las aguas subterráneas se diferencian tres grupos; dos asociados a aguas de origen meteórico y uno que muestra un posible fraccionamiento entre agua y minerales.

La caracterización hidrogeológica permitió caracterizar tres unidades hidrogeológicas. La unidad hidrogeológica A.2., la cual asocia los acuíferos con una porosidad primaria, producción moderada y de carácter local, dentro de los cuales se incluyen los Conos Aluviales (Qca) y los Depósitos Aluviales (Qal). La unidad hidrogeológica C.1., agrupa las rocas o sedimentos con limitado recurso de agua subterránea (acuitardo), conformada por los Suelos Residuales (Qsr) y la roca volcánica con moderado grado de fracturamiento. La unidad hidrogeológica C.2., conformada por rocas o

sedimentos sin recurso de agua subterránea (acuicludo), dentro de la que se clasifica la Formación Volcánica (Kv), con bajo a nulo grado de fracturamiento.

El modelo hidrogeológico conceptual para la cuenca del Río Pavas, establece que el comportamiento hidrogeológico en la unidad hidrogeológica A.2., está asociado con flujos locales de poco tránsito con zonas de recarga adyacentes a la localización de acuífero y que dadas las condiciones paleotopográficas y de depositación de los sedimentos se presenta un comportamiento confinante en el sector oriental del acuífero, lo que permite una fácil recarga frente a eventos de precipitación y con aporte de las corrientes superficiales.

Teniendo en cuenta las características constructivas del diseño vial del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero, en su paso por el Valle de Pavas y las características hidrogeológicas de flujos locales, con poco tiempo de almacenamiento y recorrido y fácil recarga, así como la distancia a la que pasara el proyecto vial del acueducto de Pavas, se puede establecer que el proyecto vial no tendrá influencia negativa sobre el comportamiento hidrogeológico natural del acuífero presente en el Valle de Pavas.

Como investigaciones futuras se puede usar el presente modelo conceptual como base para la modelación numérica que contemple escenarios estacionario y transitorio con el fin de establecer el comportamiento hidrogeológico con el proyecto vial. Igualmente se recomienda realizar la datación del agua subterránea para validar los tiempos de tránsito del agua mediante isótopos radiogénico (H^3) tritio.

Palabras claves: Modelo hidrogeológico conceptual, Valle de Pavas, hidrogeoquímica, isótopos, hidrogeología.

TABLA DE CONTENIDO

ABSTRACT	2
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN	20
1. PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA	23
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO VIAL	23
1.2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	24
2. OBJETIVOS	26
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	26
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
3. MARCO TEÓRICO.....	28
3.1 MODELO GEOLÓGICO.....	30
3.2 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	31
3.3 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA.....	32
3.4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	35
3.5 MODELO CONCEPTUAL	38
4. MARCO METODOLÓGICO.....	42
4.1 FASE I RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	43
4.1.1 Geología en la Cuenca del Río Pavas.....	44
4.1.2 Hidrología.....	46
4.1.2.1 Precipitación	49
4.1.2.2 Temperatura.....	50
4.1.2.3 Evapotranspiración	51

4.1.3	Delimitación de las zonas potenciales de recarga	52
4.1.4	Inventario de puntos de agua subterránea	53
4.1.5	Hidráulica	54
4.1.5.1	Pruebas de Bombeo	54
4.1.5.2	Pruebas Slug	57
4.2	FASE 2 CAMPO Y COMPLEMENTO DE INFORMACIÓN EXISTENTE	61
4.2.1	Definición de Puntos de Muestreo	62
4.2.2	Purga de Captaciones Subterráneas.....	63
4.2.3	Toma de Muestras	64
4.2.3.1	Toma de Muestras en Captaciones Subterráneas (Piezómetros y Aljibes)	64
4.2.3.2	Toma de Muestras en Manantiales y Corrientes Superficiales.....	65
4.2.3.3	Toma de Muestras de Agua Lluvia.....	66
4.3	FASE 3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS	67
4.4	FASE 4 ELABORACIÓN DE REPORTE DE RESULTADOS	69
5.	RESULTADOS.....	70
5.1	MODELO GEOLÓGICO	70
5.1.1	Formación Volcánica (Kv).....	71
5.1.2	Suelos Residuales (Qsr)	72
5.1.3	Conos Aluviales (Qca)	73
5.1.4	Depósitos Aluviales (Qal).....	75
5.1.5	Geología Estructural.....	76
5.1.5.1	Falla de Mulaló.....	77
5.1.5.2	Falla Pavas – Quebrada Seca.....	77
5.1.5.3	Falla La Cumbre – Aguas Claras.....	77

5.1.6	Correlaciones Geológicas.....	79
5.2	CARACTERIZACIÓN HIDROLOGÍA.....	83
5.2.1	Determinación de la Infiltración Potencial.....	83
5.2.1.1	Precipitación	86
5.2.1.2	Temperatura.....	88
5.2.1.3	Evapotranspiración	88
5.2.1.4	Infiltración Potencial	89
5.2.2	Delimitación de Zonas Potenciales de Recarga	90
5.2.2.1	Pendientes.....	90
5.2.2.2	Suelos.....	92
5.2.2.3	Tipo de Roca.....	94
5.2.2.4	Cobertura vegetal y uso de suelo.....	96
5.3	INVENTARIO PUNTOS DE AGUA.....	99
5.4	CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA.....	103
5.5	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA	108
5.5.1	Hidrogeoquímica.....	112
5.5.2	Isotopos	114
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	116
6.1	DEFINICIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLOGICAS Y POTENCIAL ACUÍFERO	
	116	
6.1.1	Rocas y Sedimentos con Flujo Esencialmente Intergranular (A.2.)	119
6.1.2	Rocas y sedimentos con limitado recurso de agua subterránea (C.1.)	119
6.1.3	Rocas y sedimentos con limitado recurso de agua subterránea (C.2.)	120
6.1.4	Sistemas de flujo subterráneo.....	121

6.2	ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO	124
6.2.1	Caracterización Hidrogeoquímica	124
6.2.1.1	Análisis Exploratorio de los Datos	125
6.2.2	Interpretación hidrogeoquímico	127
6.2.2.1	Diagrama de Piper	127
6.2.2.2	Diagrama de Shoeller	132
6.2.2.3	Diagrama de Stiff.....	134
6.2.3	Caracterización Isotópica	138
7.	MODELO CONCEPTUAL	143
8.	CONCLUSIONES	154
9.	RECOMENDACIONES Y POSIBLES INVESTIGACIONES FUTURAS	158
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	159

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Resultados de laboratorio para análisis hidrogeoquímico.	167
Anexo B. Resultados de laboratorio para isótopos estables ambientales δD y $\delta^{18}O$	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Cuenca del río Pavas.	25
Figura 2. Desarrollo de la metodología de investigación definida.....	43
Figura 3. Flujo para el desarrollo de la fase 1.	44
Figura 4. Geología del Valle el Río Pavas (Plancha 279-Dagua).	45
Figura 5. Localización de las estaciones climáticas.....	50
Figura 6. Flujo para el desarrollo de la fase 2.	62
Figura 7. Flujo para el desarrollo de la fase 3.	68
Figura 8. Mapa geológico actualizado para el Valle del Río Pavas.....	71
Figura 9. Columna estratigráfica generalizada para el Valle del Río Pavas.	75
Figura 10. Rasgos geomorfológicos mayores y lineamientos y fallamiento geológico a nivel regional.....	76
Figura 11. Fallas identificadas en la Cuenca del Valle del Río Pavas.	78
Figura 12. Localización de las secciones geológicas.	79
Figura 13. Secciones geológicas NW-SE.....	81
Figura 14. Secciones geológicas S-N.....	82
Figura 15. Tipos de suelo en la cuenca del Valle del Río Pavas.....	83
Figura 16. Cobertura vegetal.....	84
Figura 17. Distribución de la precipitación.	87
Figura 18. Precipitación media mensual multianual para la Cuenca del Río Pavas.	87
Figura 19. Distribución de la temperatura para la cuenca del Río Pavas.....	88
Figura 20. Valores de infiltración potencial vs precipitación.	89
Figura 21 Mapa de pendientes del área de estudio.....	92

Figura 22 Distribución de texturas de suelo presentes en el área de estudio	93
Figura 23 Unidades geológicas presentes en el área de estudio.....	96
Figura 24 Mapa de coberturas y uso de suelo del área de estudio	98
Figura 25 Distribución de las principales zonas de recarga en el área de estudio	98
Figura 26. Localización inventario de puntos de agua subterránea.	103
Figura 27. Localización de los puntos a muestrear.	112
Figura 28. Mapa hidrogeológico para la cuenca del Río Pavas	121
Figura 29. Mapa de direcciones de flujo para la unidad hidrogeológica A.2.	123
Figura 30. Boxplot de las variables fisicoquímicas, microbiológicas e isotópicas analizadas de los puntos de muestreo para la primera campaña en la Valle del Río Pavas.	127
Figura 31. Diagrama de Piper para las muestras obtenidas en la primera campaña en la Valle del Río Pavas.....	130
Figura 32. Diagrama de Shoeller-Berkalof para las muestras de agua tomadas en la Valle del Río Pavas.....	133
Figura 33. Diagramas de Stiff para los puntos de muestreo localizados en la Valle del Río Pavas.	136
Figura 34. Composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ / δD) correspondiente a la precipitación, aguas superficiales y subterráneas del área de estudio.....	140
Figura 35. Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a las aguas subterráneas (manantiales y extraídas por piezómetro) del área de estudio para temporada seca.	141
Figura 36. Varios procesos fisicoquímicos que desvían los valores $^{18}\delta$ y $^2\delta$ de la LMM.....	141
Figura 37. Topografía de la cuenca del Río Pavas.....	144
Figura 38. Unidad hidrogeológica C.2., basamento hidrogeológico.....	145
Figura 39. Unidad hidrogeológica C.1., caracterizado como acuitardo.....	146

Figura 40. Unidad hidrogeológica A.2., acuífero local en el Valle del Río Pavas.....	148
Figura 41. Principales corrientes superficiales.....	149
Figura 42. Comportamiento de flujos subterráneos y zonas de recarga.....	150
Figura 43. Relación hidrogeoquímica e isotopos δD , $\delta^{18}O$ en el Valle del Río Pavas.	151
Figura 44. Modelo conceptual generalizado mediante bloque diagrama.....	153

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de asignación para grupo hidrológico de los suelos.....	49
Tabla 2. Precipitación Total Media Anual en estaciones meteorológicas de referencia.....	49
Tabla 3. Valores del potencial de recarga	53
Tabla 4. Número de curva de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas.....	84
Tabla 5. Numero de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas.....	85
Tabla 6. Cálculo de la ETP Método de Thornthwaite.....	89
Tabla 7. Valores de infiltración potencial.....	90
Tabla 8 Rango de pendientes presente en el área de estudio	91
Tabla 9 Tipo de suelos presentes en el área de estudio.....	93
Tabla 10 Principales características del tipo de roca presente en el área de estudio.....	94
Tabla 11 Principales tipos de cobertura de tierra y uso de suelo presentes en el área	97
Tabla 12. Característica de los puntos de agua subterránea inventariados.....	99
Tabla 13. Característica de los piezómetros de agua subterránea construidos.....	102
Tabla 14. Característica de las captaciones de agua subterránea y tipos de pruebas hidráulicas.....	104
Tabla 15. Resultados de las pruebas hidráulicas ejecutadas en el Valle del Río Pavas.....	106
Tabla 16. Características registradas durante la purga de las captaciones subterráneas.....	108
Tabla 17. Puntos seleccionados para el muestreo hidrogeoquímico e isotópico.....	110
Tabla 18. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos para las muestras de agua	113
Tabla 19. Resultados de los análisis isotópicos para las muestras de agua.....	115
Tabla 20. Clasificación de unidades hidrogeológicas	117
Tabla 21. Error admisible para análisis de muestras de agua.....	124

Tabla 22. Balance iónico para los datos fisicoquímicos obtenidos de los puntos de muestreo obtenidos en la primera campaña	125
Tabla 23. Análisis exploratorio de las muestras de agua subterránea, superficial y lluvia tomadas en el área de estudio	126
Tabla 24. Facies de cada uno de los puntos muestreados	130

INTRODUCCIÓN

La motivación para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del Río Pavas, es lograr tener el conocimiento sobre el comportamiento del sistema hídrico subterráneo y poder establecer si el paso del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero puede llegar a generar alguna alteración a la dinámica del recurso hídrico subterráneo.

Colombia actualmente está presentando un desarrollo importante en la ampliación de la red vial nacional mediante proyectos de cuarta generación (4G), que el gobierno nacional puso en mano de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), los cuales le permitirán al país tener un desarrollo acelerado, mejorando la competitividad para enfrentar los retos comerciales, promover la generación de empleo y proporcionar vías de primera calidad a los colombianos. Dentro del programa se contemplan 7000 km de red vial nacional, 150 km de viaductos y 141 km de túneles con un valor aproximado de COP \$47 billones. (DNP, 2014)

Según lo expuesto por Li *et al.*, (2018) la infraestructura vial se presenta como un fenómeno que fomenta la transformación social, regional y promueve el crecimiento económico, generando beneficios para el desarrollo local. Por su parte Crafts, (2009) afirman que la infraestructura vial es uno de los principales vehículos para el crecimiento económico de una región.

Li *et al.*, (2018) plantea que el acuerdo de libre comercio entre Colombia y EE.UU., puede fomentar los volúmenes de comercio y el desarrollo económico del país, mediante la ejecución y puesta en marcha de los proyectos de inversión vial planteados por el estado.

El desarrollo y construcción de los proyectos viales 4G y en general los proyectos de infraestructura vial nuevos que se están realizando en el país, presentan retos de ingeniería para logra un equilibrio entre la ejecución de los proyectos, los conflictivos sociales, prediales y ambientales.

En la actualidad el recurso hídrico se ha convertido en detonador para el desarrollo humano, la sostenibilidad ambiental, ecosistémica y de la economía, donde el agua subterránea como recurso hídrico juega un papel protagónico con proyectos que buscan el desarrollo del país como la infraestructura vial, la explotación minera y petrolera, las zonas industriales y la explotación con fines agrícolas.

Willem G Mook, (2000) estima que en la hidrosfera hay $1.4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ de agua, del cual los océanos representan el 96%, siendo el 4% únicamente agua dulce, del 4% del agua dulce el 69.3% se encuentra acumulada en los casquetes polares, el 29.9% corresponde a agua subterránea y solo el 0.8% hace parte de los ríos, lagos, embalses y la atmosfera.

Dentro de los retos ambientales los relacionados al conflicto con el recurso hídrico superficial y en especial con el recurso hídrico subterráneo toman una gran relevancia, ya que como lo plantea (Willem G Mook, 2000) el agua subterránea corresponde al 29.9% del agua dulce del planeta.

El corregimiento de Pavas el cual pertenece al municipio de la Cumbre, actualmente abastece su acueducto a partir de agua subterránea, captando un sistema de manantiales, administrado por la Asociación de Usuarios del Acueducto de Pavas (ACCAPAVAS) del cual se benefician cerca de 1200 suscriptores (Galeano *et al.*, 2000).

Actualmente la Agencia Nacional de Infraestructura ANI por medio del Concesionario COVIMAR realiza trabajos para obtener la licencia ambiental para el proyecto Vial Mulaló - Loboguerrero, el cual cuenta con 31.8 kilómetros y parte del trazado de la vía a cielo abierto atraviesa el Valle del Río Pavas en el municipio de la Cumbre, Valle del Cauca.

Basados en esta información, el trabajo de investigación que se desarrolla en el marco de la Maestría en Hidrogeología Ambiental de la Universidad Antonio Nariño, tiene como propósito

realizar el modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del río Pavas en la zona de influencia del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero en el Municipio de la Cumbre – Valle del Cauca.

El trabajo de maestría tiene por objetivo establecer el comportamiento del sistema hídrico subterráneo mediante la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual, el cual sirva como base para estimar posibles alteraciones al régimen hidrogeológicos en el Valle del Río Pavas, que se puedan generar por el paso del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero.

El desarrollo del presente trabajo de investigación estará soportado en la elaboración de 4 componentes que el modelo hidrogeológico conceptual y presenta los aspectos teóricos fundamentales asociados al estudio de las aguas subterráneas. El primer componente es el modelo geológico el cual tiene como objetivo identificar la geología presente en la superficie y sub-superficie, permitiendo definir el contacto roca – depósitos, delimitando las unidades geológicas y geomorfológicas. El segundo componente es la caracterización hidrológica la cual se ocupa de establecer los procesos hidrológicos superficiales, como las precipitaciones, la escorrentía y la evaporación, para estimar la recarga de los acuíferos (infiltración). El tercer componente se centra en el modelo hidráulico, el cual establece los principales parámetros hidráulicos que controlan el movimiento de las aguas subterráneas en las unidades hidrogeológicas, hidráulica de pozos, así como la red de flujo. El cuarto componente es la caracterización hidrogeoquímica la cual mediante los análisis fisicoquímicos e isotópicos de las aguas busca establecer la dinámica de los fluidos y las posibles interacciones con el medio por el que fluyen.

Con este trabajo de investigación se pretende definir si el proyecto Vial Mulaló - Loboguerrero en su trazado por la cuenca del Río Pavas, afectará la dinámica hidrogeológica específicamente en lo relacionado a las zonas de recarga, tránsito y descarga, así como modificaciones en los niveles freáticos actuales.

1. PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA

El modelo hidrogeológico conceptual como aporte del presente trabajo de investigación brindara el conocimiento de la línea base hidrogeológica necesario para entender el comportamiento del sistema hídrico subterráneo en el Valle de Pavas y de esta manera poder estimar posibles alteraciones al régimen hidrogeológico por la construcción del tramo de vía a cielo abierto del proyecto Vial Mulaló-Loboguerrero.

En este sentido permitirá que las entidades que controlan monitorean y gestionan las aguas subterráneas, utilicen la información obtenida para establecer medidas o lineamientos encaminadas a la protección, cuidado y uso racional de las aguas subterráneas en el Valle de Pavas. De forma que se promueva el desarrollo sustentable de esta zona del país.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO VIAL

El proyecto Mulaló – Loboguerrero cuenta con una longitud desde su origen hasta su destino de 31,8 Km, iniciando en la Intersección Panorama en la entrada a Mulaló, hasta Loboguerrero en la conexión con la Ruta 1901, y en su recorrido atraviesa los municipios de Yumbo, La Cumbre y Dagua del Departamento de Valle del Cauca. El proyecto contempla la construcción de una calzada sencilla bidireccional entre Mulaló (K0+000) y Pavas (K12+410), y entre Pavas (K16+528) y Loboguerrero (K31+765), así como la construcción de una doble calzada con vías de servicio en el corregimiento de Pavas.

El trazado inicia sobre la Unidad Funcional 1 en el sector de la Intersección Panorama que permite el ingreso a Mulaló sobre los 970 msnm, y transcurre conservando el corredor existente

hasta el K0+900 aproximadamente donde se separa por el costado derecho para ascender por la margen izquierda de la Quebrada Mulaló con pendientes hasta del 6.5% para llegar al portal de entrada al túnel 4 (K6+540) en el sector conocido como Cresta de Gallo ubicado a 1320 msnm. Durante su desarrollo en este trayecto, se contempla la construcción de 8 puentes sobre la calzada principal, 1 más en la intersección Panorama, 1 *box culvert* en la intersección Mulaló, 1 puente peatonal (K0+263,87), 1 zona de parqueadero, 2 intersecciones viales (intersección Panorama e intersección Mulaló) y 2 Túneles cortos de 636,3 m (Túnel 1) y 852,1 m (Túnel 2).

El trazado vial en su paso por el Valle del Río Pavas, el cual es objeto de estudio hidrogeológico del presente trabajo, gira en dirección Oeste y atraviesa por el costado Sur el casco urbano de Pavas, mediante la construcción de una doble calzada con vías de servicio en una longitud de aproximadamente 4 Km. A lo largo de este sector, se contempla la construcción de 4 Puentes sobre el eje principal, 7 puentes sobre la segunda calzada y calzadas de servicio (incluyendo la intersección con la vía La cumbre – Restrepo) y 2 puentes para la solución de retornos a desnivel que permitan complementar el circuito de conexión en el sector. Adicionalmente, se contempla la construcción de 2 puentes peatonales (K13+400) y (K15+239), el Centro de Control de Operaciones y área de Servicio en el K13+000 y la estación de peaje en el K16+200. Posteriormente y ya saliendo del Valle del Río Pavas ingresa al túnel 5, para conectar el tramo del sector Loboguerrero.

1.2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

La cuenca del Río Pavas se ubica en la región Sur-Occidental de la Cordillera Occidental, aproximadamente a 40.0 km al norte de la ciudad de Cali. El área de estudio se localiza en el

Corregimiento de Pavas, jurisdicción del Municipio de La Cumbre, en el Departamento del Valle del Cauca.

La zona se caracteriza por un Valle plano asociado a procesos erosivos y de depositación asociadas al Río Pavas, limita al norte por la zona conocida como la pinera y la vía Pavas – Restrepo, al occidente por la Serranía de Morales y el Cañón del Río Bitaco, al sur por la zona urbana del Municipio de la cumbre y al oriente por la Serranía Cresta de Gallo. La siguiente figura presenta la localización de la Cuenca del Río Pavas.

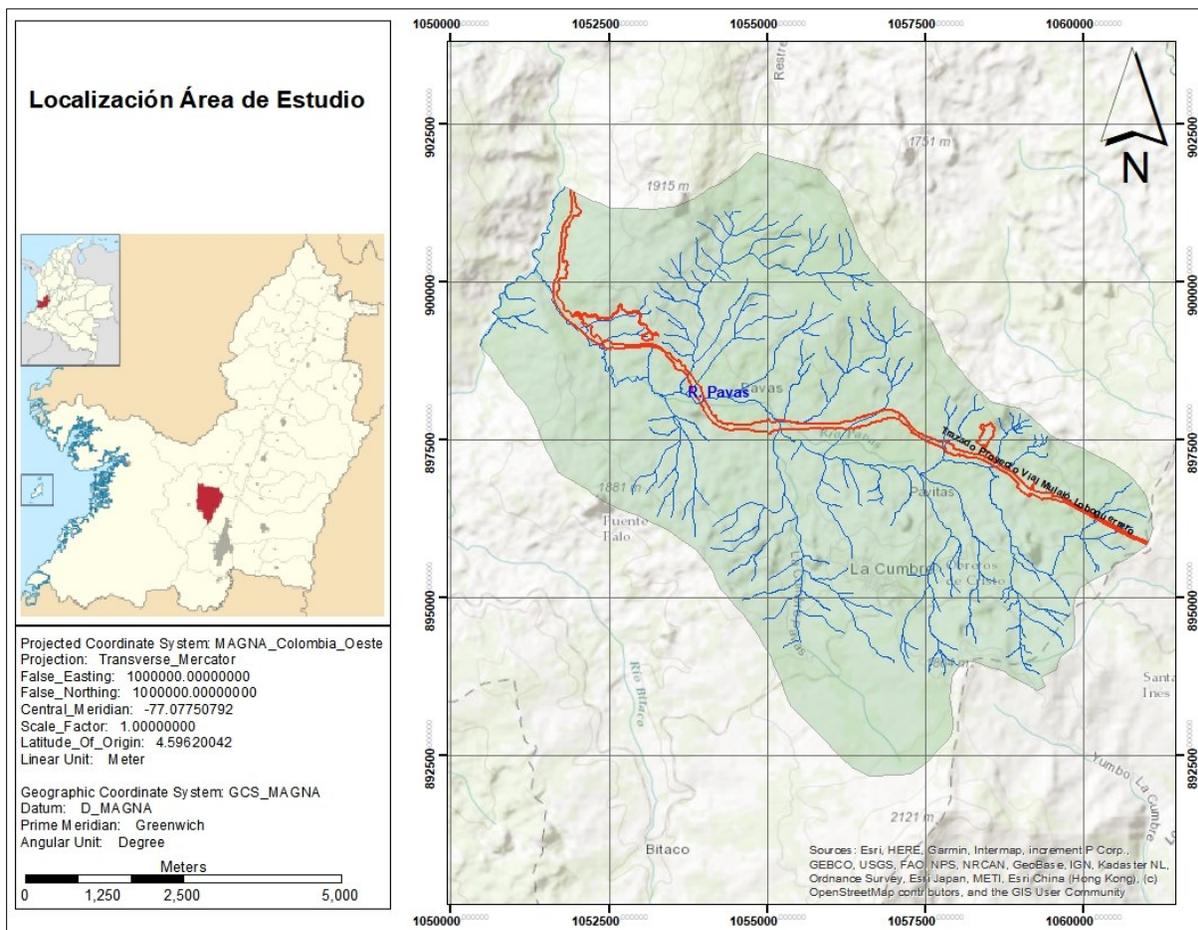


Figura 1. Localización de la Cuenca del río Pavas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer el comportamiento del sistema hídrico subterráneo mediante la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual para la Cuenca del Valle del Río Pavas, que permita estimar si el paso del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero puede llegar a generar alteraciones a la dinámica hidrogeológica de la zona.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar y analizar la información bibliográfica relacionada con la geología, hidrología, hidráulica, hidrogeoquímica e hidrogeología de la zona de estudio.
- Elaborar el modelo geológico de la zona de estudio a partir de levantamiento de información primaria y fuentes secundarias existentes.
- Elaborar la caracterización hidrológica de la zona de estudio, con fines de definir los valores de recarga potencial (infiltración) a los acuíferos presentes en la cuenca del Río Pavas.
- Elaborar la caracterización hidráulica de la zona de estudio, definiendo los parámetros hidráulicos para las unidades geológicas presentes.
- Elaborar la caracterización hidrogeoquímica de la zona de estudio, con miras a la definición de los tipos de agua subterránea y su correlación con las unidades geológicas presentes.
- A partir de análisis de isótopos estables δD y $\delta^{18}O$ comprender el funcionamiento del sistema hidrogeológico determinando características relacionadas al origen del agua, zonas

de recarga, direcciones de flujo, conexiones y posibles patrones de mezcla entre las diversas fuentes de agua.

- Construir un modelo hidrogeológico conceptual que permita describir el comportamiento del sistema hídrico subterráneo en la cuenca del Río Pavas en la zona de influencia del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero en el municipio de la Cubre, permitiendo estimar si el proyecto vial generar alteraciones a la dinámica hidrogeológica de la zona.

3. MARCO TEÓRICO

El recurso hídrico subterráneo es visto como uno de los recursos más importantes social y económicamente, por lo cual el conocimiento integral y una adecuada utilización, especialmente en zonas con limitaciones o déficit hídrico, tiene una influencia importante en el desarrollo sostenible de las actividades sociales y económicas de un territorio (Izady *et al.*, 2012).

En este sentido el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece en la Resolución 751 de 2015, que dentro de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) para proyectos de infraestructura vial, se desarrolle un estudio para el componente de hidrogeología.

La hidrogeología se puede definir como una ciencia de la tierra que estudia las aguas subterráneas desde sus propiedades físicas, químicas y sus estados (Alfaro & Santos, 2006). Teniendo en cuenta su origen, comportamiento, tránsito, composición, interacción con las rocas y las interacciones con el medio y las actividades antrópicas.

El éxito de un estudio hidrogeológico se basa en un desarrollo sistemático de las diferentes actividades que interactúan con las aguas subterráneas y de una buena base de datos de campo, en este sentido autores como Alfaro & Santos, (2006) y (Vélez *et al.*, 2004), coinciden que un estudio hidrogeológico debe contener por lo menos las siguientes actividades:

- Recopilación de análisis existente
- Geología de la zona
- Inventario de puntos de agua subterránea
- Prospección geofísica
- Caracterización de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas existentes
- Hidrología (Balance hídrico)

- Hidrogeoquímica y calidad del agua
- Definición de las unidades hidrogeológicas
- Modelo Conceptual
- Modelo numérico (dependiendo del objetivo del estudio)

Dependiendo de los objetivos del estudio se puede complementar con:

- Perforación de pozos
- Análisis de isotopos estables
- Pruebas de infiltración
- Análisis de vulnerabilidad y riesgo a la contaminación
- Definición y seguimiento de una red de monitoreo

Por lo general los resultados arrojados de las investigaciones de estudios hidrogeológicos son recopiladas y representadas mediante el modelo conceptual, el cual debe integrar un modelo geológico, un modelo hidrológico, un modelo hidráulico y un modelo hidrogeoquímico. El modelo conceptual se convierte en la base del modelo hidrogeológico numérico.

La definición de unidades hidrogeológicas se basa en la geología, las propiedades hidráulicas y otras condiciones del entorno, en este sentido la Asociación Internacional de Hidrogeología desarrollo una guía (IAH, 1995) para la clasificación de las unidades hidrogeológicas en la cual establece la siguiente clasificación:

- A. Rocas y sedimentos con flujo esencialmente intergranular.
 - A.1. Acuíferos con una alta productividad, sistemas de acuíferos continuos.
 - A.2. Acuíferos moderadamente productivos, sistemas de acuíferos discontinuos o locales.
- B. Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas, incluidos los acuíferos kársticos.

- B.1. Acuíferos altamente productivos, sistemas de acuíferos continuos.
- B.2. Acuíferos moderadamente productivos, sistemas de acuíferos discontinuos o locales.
- C. Rocas y sedimentos con limitado recurso de agua subterránea o estratos esencialmente sin recursos de agua subterránea.
 - C.1. Acuíferos menores con limitado recurso de agua subterránea (acuitardo), sistemas locales.
 - C.2. Estratos o rocas sin recurso de agua subterránea (acuicludos).

3.1 MODELO GEOLÓGICO

Un modelo geológico es el resultado del análisis y correlación de información multidisciplinaria, la cual incluye datos geológicos de campo, perforaciones, geofísicos, químicos, de reservorios y busca ampliar el conocimiento logrando un mayor entendimiento de los tipos de roca para aplicar en diferentes campos (Bu & Xu, 2020).

La correcta conceptualización de un modelo geológico es primordial en la correcta elaboración de un estudio hidrogeológico. Ya que, dependiendo del tipo de rocas presentes en una determinada zona, el tipo de porosidad que estas tengan pueden tener la capacidad para almacenar agua y transmitirla (Alfaro & Santos, 2006), teniendo relevancia hidrogeológica.

En este sentido es clave la representación bidimensional o tridimensional del volumen de rocas, permitiendo una correcta representación de la litología, la alteración, la mineralización u otro tipo de características geológicas que se involucren para el caso de la hidrogeología con la capacidad de las rocas o sedimentos para almacenar agua subterránea.

Los modelos geológicos permiten aumentar el conocimiento de la morfología de las rocas, sus orígenes y alteraciones, permitiendo establecer estructuras que favorezcan o limiten el almacenamiento y movimiento de las aguas subterráneas.

3.2 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

Los aspectos hidrológicos están relacionados con el recurso hídrico subterráneo y principalmente se relacionan mediante un balance hídrico buscando definir un valor de infiltración (recarga) de las unidades hidrogeológicas.

Según Fernández *et al.*, (2010), una herramienta útil para aplicar en países en desarrollo son los modelos prácticos (empíricos), como es el método de curvas numéricas, este modelo fue desarrollado en Estados Unidos por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS–CN). Para la aplicación en pequeñas cuencas con vocación agrícola, se debe establecer con antelación la máxima retención potencial de agua en el suelo, junto con la precipitación con el fin de estimar la escorrentía o escurrimiento con una precisión aceptable (Sánchez Cohen *et al.*, 2003).

Rawls *et al.* (1993) mencionaron que la CN refleja las condiciones de infiltración del suelo, las prácticas de manejo de los terrenos agrícolas, la condición antecedente de la lluvia y la cobertura del suelo, que relacionan la infiltración y la escorrentía superficial.

La recarga se define como el proceso mediante el cual ingresa agua a un acuífero desde las zonas que lo limitan (superficie o cuencas adyacentes); el agua de recarga puede provenir de la infiltración de la lluvia, del agua superficial o por transferencia desde otro acuífero (Custodio & Llamas, 1983).

Según el balance de aguas de una cuenca, la recarga del agua lluvia es igual a la infiltración, menos la evaporación y menos la escorrentía superficial; por lo general se establece como una tasa

la cual se relaciona como una altura, un caudal o una fracción de tiempo (UNESCO, 1998). Este fenómeno se produce de forma natural cuando el agua precipitada se infiltra hacia el acuífero a través del suelo con alta capacidad de infiltración o la roca es suficientemente permeable y la zona en donde ocurre este proceso se define como el área o zona de recarga (Mateus, 2007).

La infiltración es el volumen de agua originado por las lluvias, en un espacio de tiempo, y el cual tiene la facilidad de pasar el suelo y ocupar los poros vacíos del suelo o unidades geológicas de forma parcial o total, este volumen es lo que se considera infiltración eficaz, recarga natural o recarga profunda, Custodio & Llamas, (1983) hacen claridad en un aspecto importante que se debe tener en cuenta y es que no toda la infiltración alcanza la zona saturada.

La recarga natural está limitada por la capacidad de almacenamiento de los acuíferos, causando que después de algún tiempo el agua que logra alimentar al acuífero no tenga espacio para ser almacenada y deba empezar a alimentar ríos, lagos, o incluso a otro acuífero; lo cual conforma la descarga natural de los acuíferos y en los sitios donde se da este proceso se denominan las zonas de descarga natural; la capacidad que tiene un acuífero para almacenar agua dependerá de factores como el espesor y la profundidad, lo cual hace referencia a la geometría de los acuíferos solos o unidades hidrogeológicas interconectadas (Faustino J., 2006).

La importancia de la caracterización hidrológica dentro de un modelo hidrogeológico conceptual o un estudio hidrogeológico está encaminado a determinar los valores de infiltración e identificar las zonas con mayor o menor capacidad de asimilar estos valores de recarga.

3.3 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

Según Alfaro & Santos, (2006) la clasificación de las rocas por su capacidad de almacenar y transmitir agua, permiten definir las unidades hidrogeológicas o tipos de acuíferos basado en la

energía que posee el agua que esta almacenada en los poros. Por lo cual la caracterización hidráulica se convierte en un insumo fundamental para la conceptualización del comportamiento hidrogeológico local o regional.

El comportamiento y movimiento de las aguas subterráneas se basa en la Ley de Darcy (Ecuación 1), a partir de la cual, al aplicar el principio de conservación de la masa a un elemento de acuífero, se deriva la ecuación general del flujo subterráneo en régimen transitorio en medio homogéneo e isótropo (Ecuación 2) y en régimen permanente o estacionario.

Ecuación 1.

$$\vec{V}_x = K \frac{\partial h}{\partial x}$$

Ecuación 2.

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) * K = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación 3.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Cuando el régimen es estacionario, h es constante a lo largo del tiempo, por lo que su derivada se anula con respecto al tiempo.

Los parámetros hidráulicos de un acuífero como lo son la conductividad hidráulica, la transmisividad y la porosidad son datos esenciales en la caracterización de las unidades

hidrogeológica y para los diferentes cálculos encaminados a la gestión y la planificación de la explotación de aguas subterráneas.

La correcta estimación de estos parámetros permite la predicción cuantitativa de las cantidades explotables de agua subterránea y la respuesta hidráulica del acuífero al bombeo. Los métodos hidrogeológicos de campo, como las pruebas de bombeo, se han utilizado ampliamente para estimar los parámetros hidráulicos del acuífero, ya que proporcionan un alto grado de confiabilidad. Sin embargo, se requieren varios supuestos para la aplicación de las fórmulas de los métodos, incluida la homogeneidad del acuífero, la isotropía, el grosor, el almacenamiento del pozo, la continuidad y la naturaleza del flujo de fluido para ser válido en condiciones de campo (Kazakis et al., 2016).

Ushijima & Yeh, (2015) considera la conductividad hidráulica como uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta al modelar un acuífero. Las conductividades hidráulicas desconocidas pueden tener efectos drásticos en la confiabilidad de los resultados de los modelos de aguas subterráneas.

La definición de las unidades hidrogeológicas se basa principalmente teniendo en cuenta el coeficiente de almacenamiento y la capacidad que ofrece la roca para que el agua se desplace (Conductividad Hidráulica). Para la determinación de estos dos parámetros, existen pruebas hidráulicas entre las que se pueden destacar pruebas de bombeo, pruebas slug, pruebas lugeon, pruebas lefranc, y ensayos de laboratorio.

Por su parte la (IAH, 1995) ha definido las unidades hidrogeológicas bajo varios criterios, donde cabe resaltar la basada en los valores de conductividad hidráulica, definiendo: un acuífero de importancia hidrogeológica con una relativa alta permeabilidad y productividad a unidades con valores de conductividad hidráulica mayores a $1.0E-06$ m/s. Acuíferos o acuitardos de baja

productividad a los que presenten una conductividad entre 1.0E-06 m/s a 1.0E-9 m/s y clasifica las unidades con conductividades hidráulicas menores a 1.0E.-9 m/s.

Johnson, (1967), basado en los valores de coeficientes de almacenamiento hace la clasificación según su grado de confinamiento, estableciendo que valores de coeficiente de almacenamiento mayores a 10^{-3} representa agua proveniente del vacío de los poros y corresponde a un acuífero libre, mientras que valores entre 10^{-3} a 10^{-4} muestra que el agua procede de la reducción de la presión y las filtraciones desde los estratos confinantes permitiendo establecer que corresponde a un acuífero semiconfinado y para valores menores a 10^{-4} el agua provienen de la descompresión, asociándose a acuíferos confinando.

3.4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

La caracterización hidrogeoquímica brindara insumos para establecer los tiempos de residencia del agua subterránea en la roca, sistemas de flujo, zonas de tránsito y permiten contemplar la definición de zonas de recarga y descarga de los sistemas hidrogeológicos.

Tanto el agua subterránea como superficial están afectadas por diversos procesos fisicoquímicos que se producen en forma natural o artificial, y que afectan su composición fisicoquímica. Estos procesos están influenciados, entre otros, por factores como la vegetación, los suelos, las características geológicas de los sedimentos y/o rocas por los cuales el agua escurre, y por agentes antropogénicos. De éstos, particularmente importantes son los procesos asociados a la geología de los sitios por donde el agua fluye. Geyh *et al.*, (2001) plantea que:

Aceptando la hipótesis que la composición química e isotópica del agua subterránea refleja la composición mineralógica de las rocas en el acuífero, en otras palabras, que la litología le proporciona al agua una huella hidrogeoquímica precisa, es posible utilizar esta

información para determinar el origen del agua subterránea, así como conocer información acerca del proceso interactivo entre el agua y la roca y los procesos hidroquímicos que se generan en esta matriz ambiental. (p.105).

Cabe aclarar que el agua va adquiriendo diferentes sustancias a su composición desde el momento que precipita y a lo largo del recorrido antes de formar parte del agua almacenada en un acuífero, dada la incorporación a la matriz líquida de gases presentes en la atmósfera, dentro de los que se pueden destacar el Oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂), diversas sales, polvo y aerosoles que se encuentran en la atmósfera (IGME, 1985; López Velandia, 2016; Sánchez San Román, 2012). En la etapa posterior a la precipitación, durante el proceso de infiltración del agua precipitada se presentan interacciones con el suelo y en general con el medio por el cual transita, generando que la composición del agua presente alteraciones como resultado de la interacción fisicoquímica y biológicas. Esta interacción es mayor en la zona no saturada por lo cual la alteración es mayor en esta zona que en la zona saturada (López Velandia, 2016).

Entre los posibles procesos geológicos que modifican la calidad de las aguas cabe resaltar la disolución de los carbonatos, las evaporitas y los silicatos entre otros minerales. Como los depósitos evaporíticos (carbonatos, sulfatos y cloruros) son usualmente más solubles que los silicatos, las aguas que los atraviesan tendrán una composición hidroquímica distinta entre ellas, siendo las primeras generalmente más salinas o con mayor concentración de iones disueltos (suponiendo que las aguas tienen el mismo tiempo de recorrido o interacción con los materiales geológicos).

De forma general González-Abraham *et al.* (2012) y Tóth (2000) plantean:

Las aguas con menor tiempo de permanencia, predominantemente evolucionan desde una composición aniónica conformada por el ion bicarbonato, distintiva en flujos de corto recorrido (local), pasando por facies de tipo sulfatada, típica en flujos de mayor recorrido

(intermedio), hasta facies cloruradas, característica en la descarga de flujos de muy largo recorrido (los regionales); a esta evolución se le denomina secuencia de Chevotareb. (p. 45, p. 25).

Respecto con el contenido de cationes, se puede definir una orden que inicia con el calcio, pasando al magnesio y terminando con el sodio, sin embargo, esta secuencia esta muy ligada a la composición de la roca o litología con la cual el agua subterránea interactuó (González-Abraham *et al.*, 2012).

Adicional a la disolución de sales, puede existir otros procesos modificantes de la composición hidroquímica de las aguas subterráneas, tales como las reacciones de óxido-reducción, el intercambio iónico (que afecta principalmente a los cationes Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} por presencia de minerales arcillosos), así como procesos antrópicos relacionados con actividades productivas como la ganadería dado los desechos orgánicos o heces del ganado, la minería con producción de aguas de relave, posible drenaje minero ácido, la agricultura por el desecho de fertilizantes, pesticidas o herbicidas, vertimiento de aguas residuales sin previo tratamiento, residuos sólidos y en generar actividades que son responsables de cambios en la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas y superficiales.

Autores como Kpegli, Alassane, van der Zee, Boukari, & Mama, (2018) incorporan los análisis isotópicos como parte de la comprobación o refinamiento de los modelos conceptuales, dado que la hidrogeoquímica, si bien brinda una aproximación a las direcciones de flujo y zonas de recarga estos no son claros y precisos. En este sentido los isotopos estables y radiactivos a pesar de que su costo puede ser elevado y restringidos los laboratorios en algunos países, si son precisos y proporcionan información relevante sobre edades del agua subterránea, direcciones del flujo del agua subterránea, zonas de recarga y descarga de acuíferos. (Izbicki *et al.*, 1995; Szabo *et al.*, 1996).

Este es el motivo por el cual un buen análisis de isotopos y sus correlaciones con datos relevantes como el comportamiento de los niveles piezométricos en una red de monitoreo, sumado a los datos geológicos son a menudo los determinantes claves para un modelo conceptual hidrogeológico confiable (Bicalho *et al.*, 2017).

El uso de isótopos ambientales para el análisis del agua subterránea, ofrece información única y complementaria frente al origen y movimiento del agua subterránea y sus constituyentes disueltos, además de permitir una evaluación cuantitativa de la mezcla y otros procesos físicos como la evaporación y el intercambio isotópico en sistemas geotérmicos (Geyh *et al.*, 2001). En el presente documento, se dará uso de los isótopos estables del agua, oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$) y deuterio (δD).

Respecto a los isótopos estables δD y $\delta^{18}\text{O}$, su uso permite identificar las diferentes fuentes de recarga, origen del agua subterránea (meteórico, agua marina, fósil, magmática y metamórfica) permitiendo diferenciar composiciones químicas similares para las aguas, al ser trazadores ideales dado que hacen parte intrínseca de la composición molecular del agua (Valenzuela *et al.*, 2013; Vélez & Rhenals, 2008).

3.5 MODELO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual se convierte en la compilación y presentación de los resultados de un estudio hidrogeológico, se presenta de forma gráfica y concisa, soportado en la caracterización geológica, hidrológica, hidráulica e hidrogeoquímica.

Para el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2019), los modelos hidrogeológicos conceptuales son la representación de sistemas hidrogeológicos los cuales deben incluir la estructura y forma del acuífero, definición de la composición y extensión de las unidades

hidrogeológicas según su potencial acuífero, parámetros hidráulicas de los acuíferos, profundidad del nivel del agua subterránea, direcciones de flujo y las diferentes interacciones con el ciclo hidrológico, teniendo en cuenta las condiciones hidroquímicas, isotópicas, definiendo las zonas de recarga, tránsito y descarga. Esto en condiciones estacionarias y transientes y su representación se puede hacer en dos dimensiones (perfiles) o tres dimensiones (bloques diagrama).

Igualmente establece los siguientes componentes como parte del modelo hidrogeológico conceptual:

- Modelo Geológico Básico: debe integrar la descripción geológica, la definición de unidades geológicas, caracterización de las unidades hidrogeológicas soportadas en corte hidrogeológico, mapas geológicos e hidrogeológicos.
- Modelo hidrológico: contemplando los fenómenos hidrológicos tales como precipitación, evapotranspiración, infiltración, recarga, teniendo claras las condiciones de flujo y conociendo el inventario puntos de agua subterránea.
- Características hidráulicas: integrando los parámetros hidráulicos principales, la definición de los tipos de acuíferos, los caudales de explotación y principales características de las captaciones subterráneas.
- Se debe tener un conocimiento sobre el uso del agua subterránea, definido por sectores y fuentes que abastecen los acueductos de la zona.
- Desde el punto de vista fisicoquímico es importante conocer los tipos de agua, las afectaciones relacionadas con actividades antrópicas y posibles fuentes de contaminación.

Zheng y Bennett, (2002), plantea que un modelo conceptual es "sinónimo de caracterización del sitio", mostrándolo como una integración de la información hidrogeológica local y regional relevante utilizando supuestos que permiten simplificar e interpretar

cualitativamente el comportamiento del flujo y transporte propio de las unidades hidrogeológicas presentes en el sitio de investigación. Para lo cual establece los siguientes marcos:

- Marco Físico: hace relación a todos los mapas que relacionan el medio físico del área de investigación como la topografía, geología, unidades hidrogeológicas, zonificación hidráulica, localización de corrientes superficiales, isopiezas.
- Marco Hidrológico: relaciona las principales variables hidrológicas (precipitación, evaporación, temperatura, evapotranspiración), comportamientos de caudales en drenajes superficiales, comportamiento de niveles estáticos, caudales o volúmenes de descarga de las aguas subterráneas, recarga de acuíferos en el tiempo y el espacio.
- Marco químico: características químicas de las unidades geológicas, características hidrogeoquímicas de las aguas almacenadas en los acuíferos, distribución espacial y temporal de las condiciones hidrogeoquímicas, fuentes y tipos de contaminantes potenciales,

Otros autores como (Izady *et al.*, 2014) quien cita a (Anderson y Woessner 1992; Meyer y Gee 1999), define un modelo hidrogeológico conceptual, como una representación gráfica de un sistema de aguas subterráneas en términos de unidades hidrogeológicas en el cual se incorporan las entradas y salidas del sistema, con sus respectivos límites, propiedades hidráulicas y capacidades de transporte, teniendo en cuenta su variabilidad temporal y espacial.

Mary P., William W., & Randall J., (2015), define un modelo conceptual como una representación cualitativa de un sistema hídrico subterráneo que se ajusta a los principios hidrogeológicos, teniendo como base fundamental información geológica, geofísica, hidrológica, hidrogeoquímica principalmente. Para Kolm, (1996) un modelo hidrogeológico conceptual debe

considerar datos como: geomorfología, geología, geofísica, clima, vegetación, suelos, hidrología, hidrogeoquímica y aspectos antropogénicos.

Los modelos conceptuales para Gillespie, Nelson, Mayo, & Tingey, (2012) están basados en el desarrollo de estudios y la adquisición de conocimiento previo de un área de investigación, donde es clave el conocimiento de los regímenes o comportamientos hidrogeológicos similares, con la involucración de datos específicos para el sitio y el planteamiento de paradigmas preestablecidos.

Brassington & Younger, (2010) expresa que los modelos hidrogeológicos conceptuales forman la base de la mayoría de proyectos hidrogeológicos, mediante los cuales se establece una comprensión plena de sistemas complejos permitiendo la evaluación de aspectos para la toma de decisiones y asociar nuevos comportamientos o cambios permitiendo establecer comportamientos en el tiempo con una precisión satisfactoria y plantea que los componentes clave de un modelo conceptual deben ser: la hidrostratigrafía y la definición de parámetros hidrogeológicos (inventario de puntos de agua subterránea, direcciones generales del flujo, hidráulica). Generalmente un modelo hidrogeológico conceptual se presenta en una serie de diagramas, que incluyen secciones transversales, bloques diagramas y tablas. Es importante tener en cuenta el entorno regional para entender como esta influye en el comportamiento hidrogeológico local o del área a investigar.

4. MARCO METODOLÓGICO

El presente trabajo de investigación parte de una descripción general de la situación hidrogeológica de la zona de estudio, basado en la recopilación y análisis de información generada por la Concesionaria Nueva Vía al Mar -COVIMAR y la existente en entidades oficiales relacionada con geología, hidrología, hidráulica, hidrogeoquímica e hidrogeología para la Cuenca del Valle del Río Pavas. Esto es importante toda vez que las actividades de investigación científica deben estar soportadas en la información existente como lo describe Beatriz López, (2006), complementada con información de campo para obtener muestras de agua para análisis hidrogeoquímico e isotópico, permitiendo establecer el comportamiento del agua subterránea en la zona de estudio mediante la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual.

Para alcanzar los objetivos propuestos, fueron utilizados métodos basados en fases secuenciales, las cuales permitieron un desarrollo y análisis sistemático coherente con la información. La investigación se divide en cuatro fases; la primera fase consiste en la recopilación y análisis de información que soportara el estudio, seguido por una fase de campo que permitirá obtener datos en relación con la composición fisicoquímica y la relación isotópica de las aguas subterráneas, superficiales y lluvia de la zona, posteriormente se continua con una fase de análisis e interpretación de datos obtenidos en campo y su relación con la información recopilada, para finalizar con la elaboración del reporte de resultados.

En la Figura 2 se presenta un diagrama que representa las cuatro fases de la investigación.

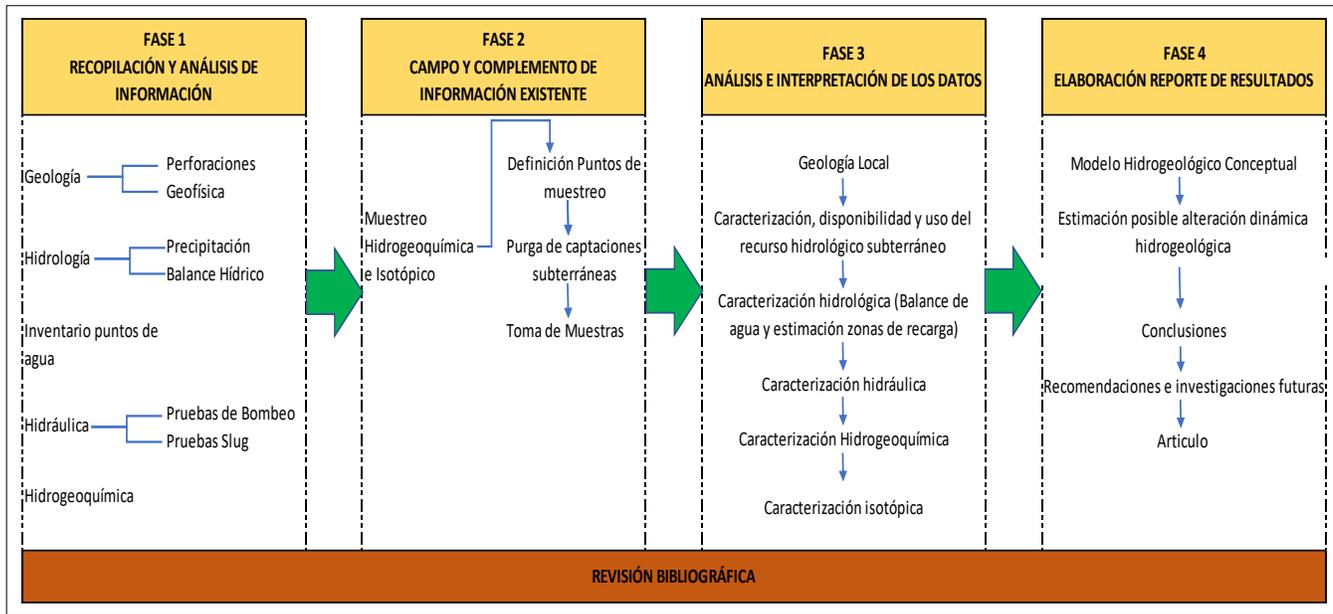


Figura 2. Desarrollo de la metodología de investigación definida.

En los siguientes capítulos se realiza una descripción de las fases desarrolladas.

4.1 FASE 1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La recopilación de información existente permite tener una visión holística del conocimiento existente de los diferentes componentes que permiten llegar al entendimiento del comportamiento hidrogeológico de la zona de estudio.

Se inicia con la recopilación de información de la geología en el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), para la información hidrológica se revisa la información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la que a la fecha haya generado el Consorcio Constructor Mulaló-Loboguerrero.

La información recopilada será analizada para evaluar su aplicabilidad y se utilizará como base de la presente investigación. En Figura 3 se presenta el flujo para la FASE 1.

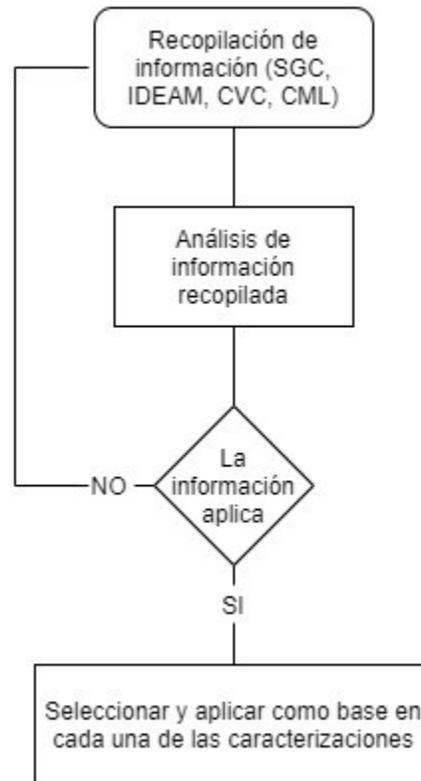


Figura 3. Flujo para el desarrollo de la fase 1.

4.1.1 Geología en la Cuenca del Río Pavas

La geología para el Valle del Río Pavas se define a partir de la Plancha 279-Dagua (INGEOMINAS 1984) a escala 1:100.000 (Ver. Figura 4), elaborado por Aspden *et al.*, (1984) y en la cual delimita cuatro unidades: La Formación Volcánica (Kv), Suelos laterizados (Ql) y Aluviones recientes (Qal). De acuerdo con los autores, la Formación Volcánica, antes denominada Grupo Diabásico, está compuesta por diabasas, lavas basálticas y lavas almohadillas, incluyendo también silos de dolerita, y tiene como localidad tipo la carretera principal entre Cali y Dagua. En la zona del valle del río Pavas esta unidad se encuentra en las dos vertientes del valle y por debajo de los depósitos aluviales que rellenan el valle, y aunque solo se encuentran afloramientos de roca

fresca en el curso del río Pavas, aguas abajo de donde termina el valle, los registros de las perforaciones en el valle indican que la roca es continua en toda la zona.

Los suelos laterizados (Ql) compuestos por arcillas limosas y arcillas marrones rojizas a ocre que reposan, ya sea sobre arcilla saprolítica café, o sobre lecho rocoso, y los aluviones recientes (Qal), que incluyen depósitos lacustres alrededor de Pavas.

En el mapa geológico elaborado por el Servicio Geológico Colombiano (2015), en el valle del río Pavas y zonas aledañas, se identifican dos unidades geológicas: Una unidad sin nombre formal compuesta por basaltos toelíticos, doleritas, picritas, tobas básicas y brechas volcánicas (K2Vm7), que corresponde con lo que varios autores han denominado Formación Volcánica, y los depósitos aluviales del río Pavas.

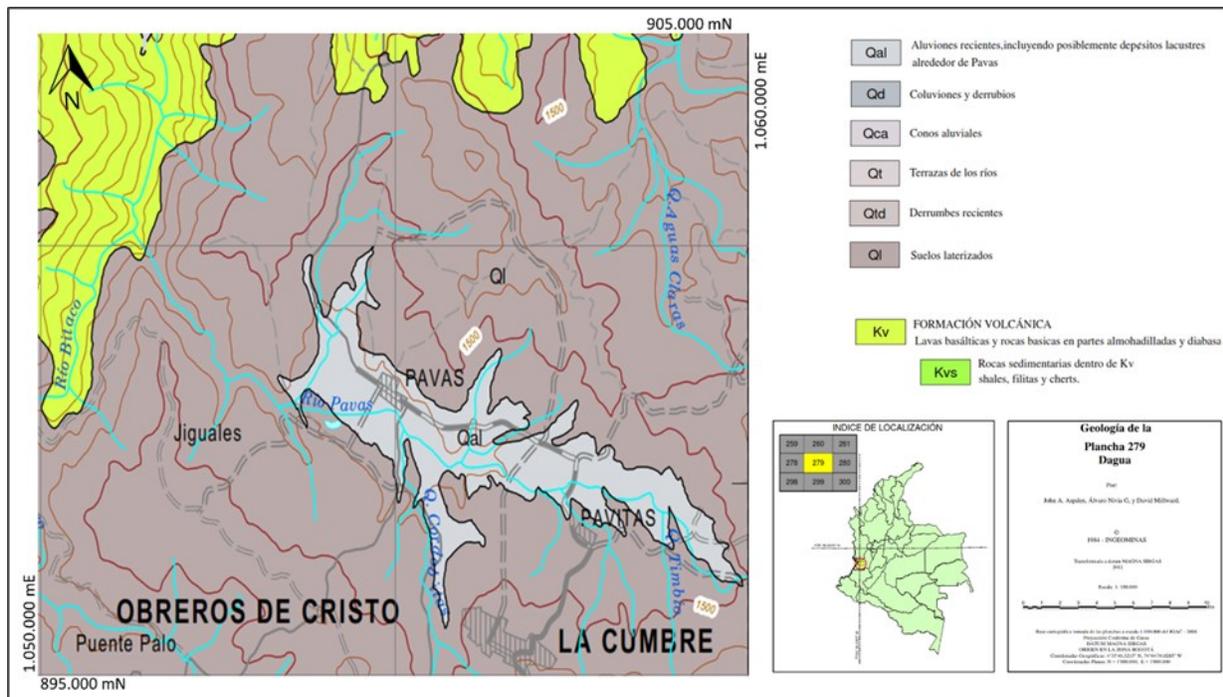


Figura 4. Geología del Valle el Río Pavas (Plancha 279-Dagua).

Fuente: Tomado y modificado de Plancha 279-Dagua, (Aspden *et al.*, 1984)

A partir de la geología descrita en la Plancha 279-Dagua (INGEOMINAS 1984) y el mapa geológico elaborado por el Servicio Geológico Colombiano (2015), se realizaron varias actividades

para obtener un mapa geológico a mayor detalle, las cuales incluyeron recorridos de campo estableciendo puntos de control geológico, correlación litológica de 26 perforaciones y 6 sondeos manuales, actividades realizadas por COVIMAR para actualizar y detallar la geología del Valle de Pavas.

4.1.2 Hidrología

El régimen hidrológico y los caudales para el Valle del Río Pavas fueron calculados empleado el método del *Soil Conservation Service* (SCS, 1972). Se debe dar claridad que esta metodología es susceptible de ser validada para nuestro país, toda vez que es una metodología que no fue desarrollada exactamente para los parámetros de las cuencas de nuestro país.

La metodología planteada por el *Soil Conservation Service* (SCS, 1972) mediante el número de la curva (CN), permite pasar de una precipitación total a una precipitación efectiva, siendo una de las más utilizadas ya que, es el resultado de la relación de fenómenos hidrológicos como los diferentes tipos de suelo y teniendo en cuenta condiciones preexistentes de humedad. Se obtiene un sin número de curvas mediante la relación de la profundidad de la precipitación y la profundidad de escorrentía directa. Las curvas obtenidas mediante esta relación fueron estandarizadas teniendo en cuenta un número adimensional que las representa (número de curva CN) y el cual va de 1 a 100, dependiendo del grado de escorrentía directa. Para lo cual un número de curva CN = 100 indicaría que toda la precipitación se convierte en escorrentía y un número de curva igual a uno indicaría la infiltración total del agua precipitada.

Para los cálculos se plantean las siguientes ecuaciones:

$$Q(mm) = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + (0.8S)}$$

En donde:

Q = Escurrimiento medio, (mm).

P = Precipitación del evento estudiado, (mm).

S = Máxima retención potencial, (mm).

Este potencial depende de las condiciones del suelo de la vegetación y del manejo, por lo que se relaciona con las curvas numéricas.

El máximo potencial de almacenamiento de humedad del suelo S, se puede obtener con la siguiente relación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

S = Potencial máximo de retención de humedad, (mm).

CN = Número de curva, adimensional.

El *Soil Conservation Service* -SCS, establece el número de curva como una función que tiene en cuenta los tipos de suelos, la cobertura vegetal y condiciones preexistentes de humedad. Dentro de esta metodología el SCS ha clasificado más de 4.000 tipos de suelos desde el punto de vista hidrológico teniendo en cuenta el potencial de escurrimiento, definiendo cuatro grupos hidrológicos de suelos identificados con las letras A, B, C y D.

En el grupo A se encuentran los suelos que presentan una alta capacidad de infiltración incluso bajo altos contenidos de humedad y por ende generan una baja escorrentía. Este grupo se caracteriza por altas profundidades con composiciones de arenas o gravas con una alta capacidad de drenar, suelos con alta capacidad de transmisión de agua, las cuales pueden ser superiores a los 7.62 mm/hora.

El grupo B se encuentran totalmente húmedos y presenta una moderada infiltración, se caracteriza por suelos de moderada profundidad, con un buen drenaje, compuestos por texturas finas a moderadamente gruesas, presentando valores de transmisión de agua entre 3,81 a 7,62 mm/hora.

Los suelos clasificados dentro del grupo C, presentan una baja capacidad de infiltración y que se encuentran completamente húmedos, estos suelos presentan capas semipermeables que limitan la infiltración. Las texturas de estos suelos son finas a moderadamente finas tipos arcillas y limos, con bajos contenidos de materia orgánica, su razón de transmisión de agua es del orden de 1,27 a 3,81 mm/hora.

Los suelos que presentan muy baja capacidad de infiltración y alta escorrentia se casifica dentro del grupo D, están caracterizados por suelos arcillosos expansivos, de poca profundidad y cubiertos por capas de arcillas en superficie, donde los niveles freáticos se encuentran muy próximos a la superficie. Los suelos del grupo D presentan una capacidad de transmisión de agua entre 0,0-1,27 mm/hora).

Para la asignación de rangos de trasmisión de agua por tipo de suelos se emplea la clasificación presentada por el *Soil Conservation Service*, los cuales se representa en la siguiente tabla.

Tabla 1. Criterios de asignación para grupo hidrológico de los suelos

Clase de Suelo	f_{\min} (cm/h)	K_s (m/d)	Características
A	1,143 – 0,762	0,274 - 0,182	Arenas con poco limo y arcilla de tamaño medio (escurrimiento mínimo)
B	0,762 – 0,381	0,182 - 0,091	Arenas finas y limos orgánicos e inorgánicos, mezcla de ambos
C	0,381 – 0,127	0,091 - 0,030	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
D	0,127 – 0,000	0,030 - 0,00	Sub - horizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)

Fuente: scs.nsw.gov.au, 2017

4.1.2.1 Precipitación

La precipitación del Valle del Río Pavas se establece a partir de las estaciones de referencia de la CVC e IDEAM relacionadas en la Tabla 2 y presentando su localización en la Figura 5. La distribución temporal para los 12 meses del año se basó en las estaciones 53110100 La Cumbre y 53110040 Aguaclara, ya que estas estaciones son las más cercanas al valle, ubicadas a 0,65 km y 0,56 km de distancia de la zona de estudio respectivamente.

Tabla 2. Precipitación Total Media Anual en estaciones meteorológicas de referencia.

Estación Meteorológica	Precipitación Media Anual
5301500203 Atuncela	404,6 mm/año
5301500107 Dagua Dagua	1135,4 mm/año
53110100 La Cumbre	1241,9 mm/año
53110040 Aguaclara	996,4 mm/año
2622900102 Ocache	1209,5 mm/año
2622600101 Santa Inés	1153,9 mm/año

Estación Meteorológica	Precipitación Media Anual
5301500102 Loboguerrero	850,4 mm/año

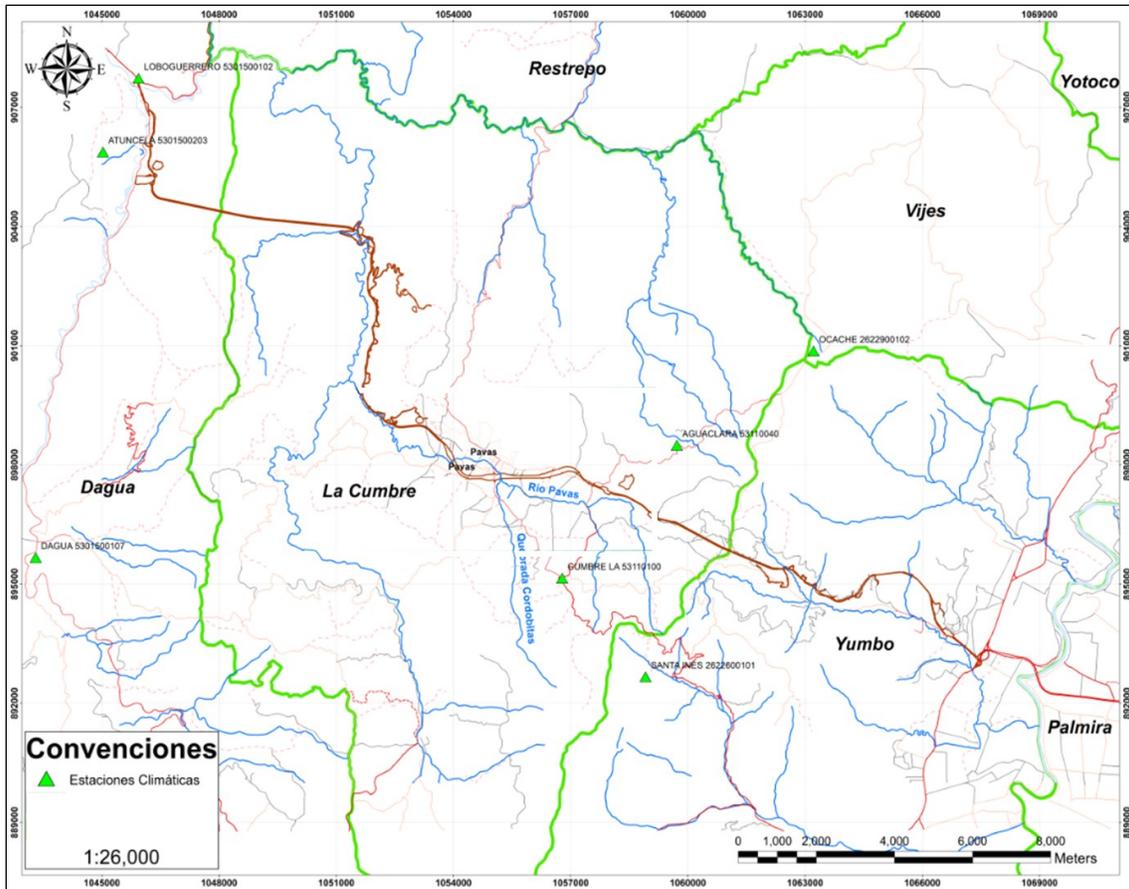


Figura 5. Localización de las estaciones climáticas.

4.1.2.2 Temperatura

En la caracterización de la temperatura en el sitio de estudio se realizó teniendo en cuenta la clasificación Caldas-Lang esto ya que es una de las metodologías que más se ajusta las condiciones del país, donde se tiene en cuenta la altitud y temperatura. Para esta caracterización se consideró la variación de la temperatura en relación con la altura (factor térmico), esta

consideración es solo válida para los países que están ubicados sobre la franja tropical (IDEAM, 2005).

Al obtener la temperatura en la zona de estudio se obtuvieron valores aproximados de las variaciones de temperatura en relación con la variación altitudinal, esto como una alternativa por la ausencia de estaciones oficiales para obtener la temperatura en el Valle de Río Pavas.

$$T(^{\circ}C) = 30.03 - 0.0062 * h$$

Donde:

T = Temperatura ($^{\circ}C$).

h = Altura sobre el nivel del mar.

4.1.2.3 Evapotranspiración

Para elaborar el análisis del comportamiento de la evapotranspiración en la zona de estudio, se tuvo en cuenta la metodología de Thornthwaite, la cual fue desarrollada teniendo en cuenta los datos de precipitación y escorrentía. La evapotranspiración se estima a partir de la temperatura media realizando una corrección dependiendo de la duración astronómica del día, así como el día del mes.

La metodología de Thornthwaite permite la estimación de la evapotranspiración mediante la siguiente fórmula:

$$ETR_{\text{sin corr.}} = 16 * \left(\frac{10 * t_m}{I} \right)^a$$

Donde:

$ETR_{\text{sin corr.}}$: Evapotranspiración mensual sin corregir (mm/mes).

t_m : Temperatura media mensual en $^{\circ}C$.

I: Índice de calor anual ($I = \sum_{j=1}^{12} i_j$;

El índice de calor para cada mes es ajustado teniendo en cuenta el calor mensual, i , como la sumatoria de los índices mensuales del año:

$$i_j = \left(\frac{t_{mj}}{5} \right)^{1,514}$$

Con el fin de estimar la ETP para cada mes es necesario corregir la ETR, contemplando un coeficiente que incluya el número total de días en el mes y las horas en el día, lo que permite la relación con la latitud. Por lo cual se tienen en cuenta el índice de iluminación mensual el cual afecta a la ETR sin ajustar para obtener la ETP según lo planteado en la metodología de Thornthwaite (mm/mes).

$$ETP = ETR_{\sin\text{corr.}} * \left(\frac{N}{12} \right) * \left(\frac{d}{30} \right)$$

4.1.3 Delimitación de las zonas potenciales de recarga

Los métodos aplicados para la zonificación de las zonas de recarga se basan en la evaluación del potencial del terreno para permitir la infiltración del agua lluvia, analizando variables como la topografía, geología, suelos, uso del suelo y factores climáticos. La definición del tipo y cantidad de variables depende en gran medida de la escala del estudio y del objeto específico de esta zonificación; en general las zonas de recarga se presentan categorizadas como altas, medias o bajas.

Para determinar las zonas de recarga en la cuenca del Río Pavas se aplicó la metodología planteada por Matus, (2007), la cual clasifica el grado de capacidad de infiltración de un terreno con base en su potencial para funcionar como zona de recarga.

Esta metodología utiliza como variables el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la unidad geológica, la pendiente del terreno y el uso del suelo. Cada una de estas variables es discretizada

en cinco (5) rangos. Para cada rango, dependiendo de su potencial para contribuir a la recarga se le asigna un valor de 1 a 5, siendo 5 el potencial “muy alto” y 1 “muy bajo”, como se presenta en la

Tabla 3. Valores del potencial de recarga

Potencial de Recarga	Valor Resultante
Muy alta	4.1 – 5.0
Alta	3.5 – 4.09
Moderada	2.6 – 3.49
Baja	2.0 – 2.59
Muy baja	0.75 -1.99

Fuente: Matus, 2007

La suma de todos estos factores, cada uno con un peso diferente, determina el valor del potencial de recarga, tal como se muestra a continuación.

$$ZR = (0.27 * Pendiente) + (0.23 * Tipo de suelo) + (0.12 * Tipo de roca) + (0.25 * cobertura vegetal) + (0.13 * uso de suelo)$$

Una vez discretizada y ponderada cada variable, utilizando algebra de mapas, se obtuvo la delimitación de las zonas de recarga potencial.

4.1.4 Inventario de puntos de agua subterránea

El inventario de puntos de agua subterránea contemplo la identificación de manantiales, aljibes, piezómetros y pozos, existentes en el Valle del Río Pavas, siguiendo los lineamientos establecidos en el Formulario Único Nacional para el Inventario de Puntos de Agua Subterránea (FUNIAS) desarrollado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

La identificación de puntos de agua se hace mediante recorrido predio a predio y en consulta con la comunidad quien suministra la información de ubicación y propietarios de los puntos de

agua subterránea. Posteriormente se realiza la identificación del punto, el registro de las coordenadas y mediante una sonda eléctrica de niveles se procede a medir la profundidad del nivel estático y profundidad de la captación.

Mediante el uso de un multiparámetro se registran los parámetros fisicoquímicos en sitio como pH, temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Finalmente, para los manantiales identificados se hace un registro del caudal y en las captaciones el caudal y tiempo de explotación.

4.1.5 Hidráulica

Dentro del presente trabajo se realizaron pruebas hidráulicas tanto de bombeo a caudal constante como de recuperación y ensayos de tipos slug, las cuales fueron interpretadas según fuera el caso por los métodos de *Theis*, *Cooper y Jacob*, *Neuman*, *Theis Recovery*, *Hvorslev* y *Cooper-Bredehoeft-Papadopulos*.

4.1.5.1 Pruebas de Bombeo

Las pruebas de bombeo son ensayos hidráulicos que permiten principalmente el cálculo de parámetros hidráulicos, estimación de radios de influencia y caudales específicos. La prueba consiste en bombear una captación subterránea, registrando los descensos de los niveles de agua subterránea hasta lograr su estabilidad y posteriormente registrar los datos de recuperación del nivel de agua subterránea en el tiempo.

Existen varios métodos para la interpretación, pero a continuación se hace una breve descripción de los empleados en la estimación de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas en el Valle del Río Pavas.

Theis

Theis (1935) desarrollo una solución analítica para la ecuación general de flujo:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u} du}{u} \quad u = \frac{r^2 s}{4Tt}$$

Para la definición específica de u dada anteriormente, la integral se conoce como la función de pozo, $W(u)$ y se puede representar mediante una serie infinita de Taylor de la siguiente forma:

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 * 2!} + \frac{u^3}{3 * 3!} - \dots$$

A partir de esta ecuación obtenemos:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

El método de interpretación de Theis se aplica para acuíferos confinados, pero se puede aplicar en acuíferos libres aplicando la corrección de Jacob (Kruseman & de Ridder, 1994).

La corrección de Jacob se presenta ya que la transmisividad no es constante en un acuífero libre, dado que esta aumenta con el abatimiento (disminución del espesor saturado), lo que significa que no solo hay flujo horizontal hacia el pozo, sino que también hay un componente vertical, que aumentará a medida que se acerque al pozo. Jacob (1944) propuso la siguiente corrección:

$$s_{cor} = s - \left(\frac{s^2}{2D} \right)$$

Donde:

S_{cor} : la corrección por el abatimiento

S : abatimiento medido

D : Espesor original saturado del acuífero.

Cooper y Jacob

El método Cooper-Jacob (1946) es una simplificación del método Theis válido para valores de tiempo mayores y una distancia decreciente desde el pozo de bombeo (valores menores de u) y aplica para acuíferos confinados. La ecuación resultante es:

$$s = \left(\frac{2.3Q}{4\pi T} \right) \log_{10} \left(\frac{2.25Tt}{Sr^2} \right)$$

Para el cálculo de la transmisividad se aplica:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s}$$

Theis Recovery

El método de *Theis Recovery*, se emplea en la prueba de recuperación (después de apagar la bomba) ya que los niveles del agua dentro del pozo empiezan a ascender (recuperar). Este aumento en el nivel del agua se conoce como reducción residual (s'). Las mediciones de la prueba de recuperación permiten calcular la transmisividad del acuífero, proporcionando así una verificación independiente de los resultados de la prueba de bombeo, siendo más confiables que los datos de bombeo porque la recuperación ocurre a una velocidad constante, mientras que el bombeo constante a menudo es difícil de lograr en el campo.

Se utiliza este método en acuíferos con goteo, libres y acuíferos con pozos parcialmente penetrantes (Kruseman y de Ridder, 1990, p. 183).

$$S' = \frac{Q}{4\pi T} W(u) - W(u')$$

Donde:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \qquad u' = \frac{r^2 S'}{4Tt'}$$

s' : abatimiento residual

r : distancia entre el pozo y el piezómetro

T: transmisividad del acuífero

S y S': valor del almacenamiento durante el bombeo y la recuperación

t y t': tiempo entre el inicio y final del bombeo

Neuman

El método de Neuman (1975) se puede aplicar a acuíferos libres en pozos que tengan una penetración total o parcial.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_b, \beta)$$

Donde:

$W(u_A, u_b, \beta)$: es la función de pozo libre

u_A : $r^2 S / 4Tt$ (Curva tipo A para los primeros tiempos)

u_B : $r^2 S_y / 4Tt$ (Curva tipo B para tiempo posterior)

β : $r^2 K_v / D^2 K_h$

K_v, K_h : conductividad hidráulica horizontal o vertical

S_y : rendimiento específico

$$K_h = \frac{T}{D}$$

$$K_v = \frac{\beta D^2 K_h}{r^2}$$

4.1.5.2 Pruebas Slug

Es una prueba hidráulica que consiste en extraer o inyectar de manera inmediata un volumen de agua en una captación de agua de poco diámetro, permitiendo medir el descenso o aumento del nivel del agua en el tiempo hasta lograra la recuperación de los valores iniciales.

Este comportamiento de los niveles del agua subterránea al interior del piezómetro y del acuífero permite estimar los parámetros hidráulicos de la unidad hidrogeológica captada, por lo general se puede estimar la conductividad hidráulica, o la transmisividad, bajo algunas condiciones también se puede obtener el coeficiente de almacenamiento. La limitante de este tipo de ensayos es que los valores que se estiman son representativos únicamente del punto donde se realiza la prueba y sus zonas directamente adyacentes.

Es importante que la captación en la cual se realice el ensayo tenga un diámetro pequeño (menor a 3 pulgadas), ya que esto permitirá que la irrupción o extracción de agua genere una variación importante en la cabeza piezométrica, permitiendo un registro del comportamiento de los niveles del agua subterránea en el tiempo. Es igualmente importante conocer el diseño de la captación o piezómetro (longitudes ranuradas, espacio anular, tipo de empaque filtrante) y la cantidad de agua que fue extraída o inyectada.

La interpretación para la caracterización hidráulica e hidrogeológica de la cuenca del Río Pavas realizó por los métodos de Hvorslev y Cooper – Papadopulos.

Hvorslev

El método de Hvorslev permite estimar la conductividad hidráulica de un acuífero libre o semiconfinado mediante una ecuación que establece que la entrada o salida (q) en el piezómetro en cualquier momento t es igual a la conductividad hidráulica (K) en el suelo y la diferencia de recuperación o descenso.

$$q(t) = \pi r^2 \frac{dh}{dt} = FK(H - h)$$

Hvorslev definió el intervalo de tiempo, T_L (el tiempo requerido para que el cambio de presión inicial inducido por la inyección / extracción se disipe, suponiendo un caudal constante) como:

$$T_L = \frac{\pi r^2}{FK}$$

Donde:

r: el radio efectivo del piezómetro

F: factor de forma

K: conductividad hidráulica mayor dentro del radio de influencia

Al sustituir el lapso de tiempo se tiene.

$$K = \frac{\pi r^2 (\ln \frac{h_t}{h_0})}{FT_L}$$

Donde:

h_t : desplazamiento en función del tiempo

h_0 : desplazamiento inicial

La ecuación general establecida por Hvorslev teniendo en cuenta que la relación de la longitud de la zona ranurada y el radio de los filtros (incluyendo el empaque de grava) sea mayor de 8.

$$K = \frac{r^2 \ln \left(\frac{L}{R} \right)}{2LT_L}$$

Donde:

L: longitud de la rejilla

R: radio del piezómetro (incluido empaque de grava)

T_L : tiempo transcurrido donde $h_t/h_0=0.37$

Cooper-Bredehoeft-Papadopulos

La interpretación por el método de Cooper-Bredehoeft-Papadopulos (1967) se aplica en acuíferos confinado. Si se inyecta agua en el pozo, entonces la altura inicial está por encima del nivel de equilibrio y el método de solución predice la acumulación. Por otro lado, si se extrae agua de la cubierta del pozo, entonces la altura inicial está por debajo del nivel de equilibrio y el método calcula la extracción. La reducción o acumulación está dada por la siguiente ecuación:

$$s = \frac{2H_0}{\pi} \int_0^{\infty} \exp\left(\frac{\beta u^2}{\alpha}\right) \left[J_0\left(\frac{ur}{r_c}\right) [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)] - J_0\left(\frac{ur}{r_c}\right) [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)] \right] \left(\frac{1}{\Delta(u)}\right) du$$

Donde.

$$\Delta(u): [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - 2\alpha Y_1(u)]^2$$

$$\alpha: (r_w^2 S) / r C^2$$

$$B: (Tt) / r_c^2$$

H_0 : cambio inicial en la cabeza

r : distancia radial desde el pozo de inyección hasta un punto en el cono radial de depresión

r_c : radio efectivo de la cubierta del pozo

r_w : radio efectivo del intervalo bien abierto

T : transmisividad del acuífero

S : almacenamiento del acuífero

t : tiempo

J_0 : función Bessel de orden cero del primer tipo

J_1 : función Bessel de primer orden del primer tipo

Y_0 : función Bessel de orden cero del segundo tipo

Y_1 : función Bessel de primer orden del segundo tipo

4.2 FASE 2 CAMPO Y COMPLEMENTO DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Para alimentar y comprobar la información recopilada se realizará la toma de muestras de agua subterránea, superficial y lluvia para el análisis hidrogeoquímico e isotópico, para cual se realizara una definición de puntos según lo planteado en (IDEAM & INVEMAR, 2017) en el protocolo de monitoreo de agua, y se seguirán las recomendaciones la guía para el muestreo de precipitación (OIEA/GNIP, 2014) y (Willem G Mook, 2000), para la purga de captaciones y toma de muestras.

Para los trabajos de muestreo y análisis de las muestras de agua, se utilizarán laboratorios acreditados por el IDEAM, teniendo en cuenta lo establecido en la norma NTC-ISO/IEC 17025 “Requisitos Generales de Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración”, y lo establecido en el Decreto 1600/1994 y la Resolución No. 0176 del 31 de octubre de 2003, la cual derogó la resolución No. 0059/2000 y 0079/2002.

Teniendo en cuenta que dentro de la información recolectada no existe la certeza y claridad sobre un análisis hidrogeoquímico, como parte del presente estudio se realizar el muestreo y análisis hidrogeoquímico e isotópico para conocer la composición y correspondencia entre las aguas subterráneas y las unidades geológicas, las aguas superficiales y las agua lluvias, de igual manera el análisis isotópico permitirá definir las zonas de recarga del acuífero existente en el Valle del Río Pavas, análisis que estará a cargo del Laboratorio de Isotopos Ambientales de la Universidad de Waterloo EIL, por sus siglas en inglés (*Environmental Isotope Laboratory*)

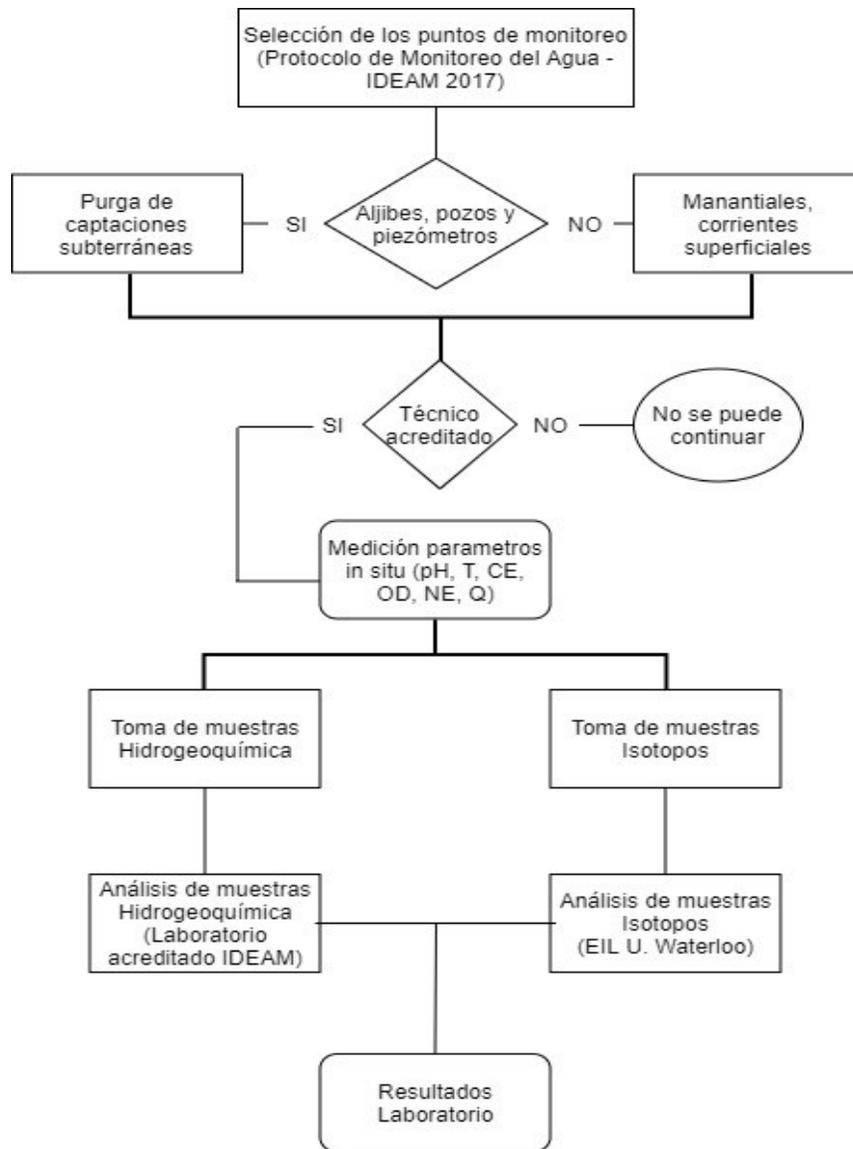


Figura 6. Flujo para el desarrollo de la fase 2.

4.2.1 Definición de Puntos de Muestreo

La definición de los puntos de monitoreo debe tener en cuenta la distribución espacial que involucre las diferentes unidades hidrogeológicas, una profundidad que represente los acuíferos a monitorear que represente la heterogeneidad y anisotropía del medio, que represente las zonas de recarga e interacciones con aguas superficiales, la distribución de la red o puntos de muestreo debe

incluir el uso del agua en la zona, teniendo en cuenta la logística para la toma de muestras y la facilidad de accesos (IDEAM & INVEMAR, 2017).

(Hernández *et al.*, 2017) identifican que el diseño de las redes de monitoreo por lo general se basa en un marco hidrológico (se define a partir de condiciones hidrológicas del sitio), estadístico (basado en inferencias estadísticas obtenidas de los datos existentes) y de modelación matemática (a partir de modelos numéricos de flujo de agua subterránea).

Para determinar la distribución de los datos y validar la existencia de valores atípicos es importante la aplicación de medidas estadísticas que contemplen funciones de tendencia central y dispersión, los cuales deben ser manejados con un criterio de experto ya que en algunos casos los datos que suelen parecer anómalos pueden ser la explicación o solución del problema.

4.2.2 Purga de Captaciones Subterráneas

Con el fin de garantizar que las muestras tomadas en las captaciones de agua subterránea (aljibes y piezómetros) sean representativas del agua almacenada en el acuífero se procedió a retirar tres cuartas partes del volumen almacenado en cada captación, haciendo un seguimiento de los parámetros *in situ* (pH, Conductividad y Temperatura) hasta lograr su estabilización, situación que se validó mediante la toma de estos parámetros en intervalos de dos minutos según lo recomendado por (IDEAM & INVEMAR, 2017).

Posteriormente se espera a una recuperación mínimo del 90% del descenso generado para proceder a la toma de muestras.

4.2.3 Toma de Muestras

El muestreo se realizó por técnicos acreditados para la toma de muestras pertenecientes a AGQ PRODYCOM COLOMBIA SAS, laboratorio acreditado mediante resolución 1133 del 01 de octubre de 2019 y la resolución 0031 del 14 de enero de 2020, tanto para la toma de muestras como para el análisis en laboratorio. Se tomaron simultáneamente muestra para análisis hidrogeoquímico e isotópico, para temporada seca (estiaje).

Para cada una de las muestras tomadas se realizó la toma de parámetro *in situ* como pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto, así como la acidulación y refrigeración a 4 °C para su preservación.

Foto 1. Acidulación para la preservación de las muestras y rotulo de las muestras.

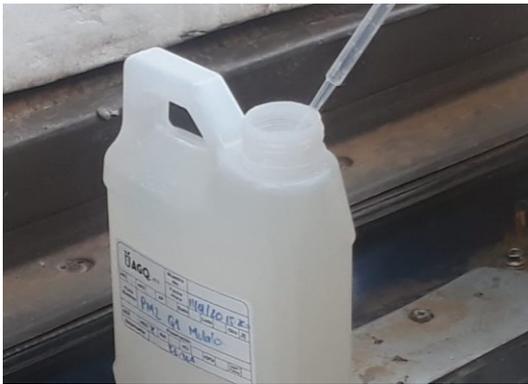


Foto 2. Toma de parámetros *in situ* – Multiparámetros Hatch.



4.2.3.1 Toma de Muestras en Captaciones Subterráneas (Piezómetros y Aljibes)

Posterior a la purga de cada una de las captaciones y garantizar que la recuperación del nivel estático fuera superior al 90%, se procedió a realizar la toma de muestras. La toma de muestras en las captaciones subterráneas se realizó mediante el método de muestreo a profundidad, el cual consiste en introducir un instrumento de muestreo permitiendo la toma de agua a la profundidad establecida.

En total se toman diez (10) muestras de piezómetros y cuatro (4) en aljibes. Las muestras fueron identificadas con el nombre de la captación muestreada, la fecha y análisis a realizar, posteriormente fueron embaladas en cavas con hielo garantizando una temperatura para la preservación de las muestras a 4 °C.

Foto 3. Toma de muestras mediante bailer en el piezómetro PM23_PZ6



Foto 4. Toma de muestra en Aljibes.



4.2.3.2 Toma de Muestras en Manantiales y Corrientes Superficiales

Previo al muestreo en manantiales y corrientes superficiales se registró el caudal y parámetros *in situ*, posteriormente en los manantiales se tomó la muestra de forma directa del punto donde brota el agua. En las corrientes superficiales se hace igual la toma directa del cuerpo de agua.

Se tomaron cinco (5) muestras de manantiales y cinco (5) de las corrientes superficiales a lo largo y ancho del Valle del Río Pavas.

Foto 5. Toma de muestras Río Pavas punto PM19_R1_Pavas.



Foto 6. Toma de muestra en manantial PM35_MN9.



4.2.3.3 Toma de Muestras de Agua Lluvia

Con el fin de establecer las características del agua precipitada en la zona y establecer las posibles zonas de recarga se construyeron cuatro (4) totalizadores enterrados en las cuatro vertientes del Valle de Río Pavas.

Para establecer los puntos y que las muestras de agua lluvia recogidas en los totalizadores se tuvo en cuenta que la evaporación no tuviera incidencia, evitando la alteración de la abundancia isotópica; que la muestra representara las precipitaciones de la zona y los aspectos logísticos en cuanto acceso y seguridad.

Se seleccionaron puntos en zonas de pastos con poca vegetación arbórea y arbustiva, donde la pendiente fuera suave y no superara el 15%, se instaló el embudo a una altura de 1.20 m y el recipiente totalizador se enterrado 0.5 metros por debajo del terreno y cubierto, evitando que se presenten fenómenos de evaporación. Como se busca obtener datos isotópicos son alta resolución temporal se empleó un muestreo a base de eventos colectando muestras de precipitaciones que no superaran una temporalidad de cinco días, siempre las muestras fueron almacenadas en el recipiente

de acumulación el cual era de alta densidad, atendiendo las recomendaciones de la Guía para el muestreo de la precipitación de la OIEA/GNIP, (2014).

Foto 7. Instalación del totalizador para la recolección de las muestras de agua lluvia.



Foto 8. Recolección de la muestra del totalizador en el sector la pinera.



4.3 FASE 3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

A partir de la información recopilada, analizada y seleccionada, más el aporte de los datos de actualización de niveles estáticos, caudales y resultados hidrogeoquímicos e isotópicos, se establecerán las relaciones geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas en la cuenca del Valle del Río Pavas.

Se realizará una síntesis y explicación de la geología local, a partir de la cual se realizarán correlaciones litológicas, de profundidad del nivel del agua, los parámetros hidráulicos, para establecer las unidades hidrogeológicas de la zona de estudio y su potencialidad acuífera.

Mediante el inventario de puntos de agua subterránea se realizará el análisis del recurso hídrico en cuanto al uso y la disponibilidad.

La caracterización hidrológica y su relación con los tipos de suelo, cobertura vegetal y pendientes permitirán establecer la potencial recarga en la zona. Esta caracterización será soportada con la caracterización hidrogeoquímica e isotópica.

Solo se procesará, en lo posible, las muestras que tienen un porcentaje de Error Analítico menor del 15%, los análisis hidrogeoquímicos se interpretarán mediante los diagramas gráficos de Piper, Stiff y Schoeller que servirán para clasificar el agua, correlacionar las aguas superficiales y subterráneas, estimar posibles orígenes y direcciones probables de flujo identificando las posibles áreas de recarga y descarga.

El análisis de isotópico se realizará mediante la relación de 2H y 18O y la Línea Meteorica Global y para la datación del agua se tendrá en cuenta la abundancia de 3H.

Con base en la información obtenida y relacionada se podrá establecer el comportamiento de las aguas subterráneas para el Valle del Río Pavas.

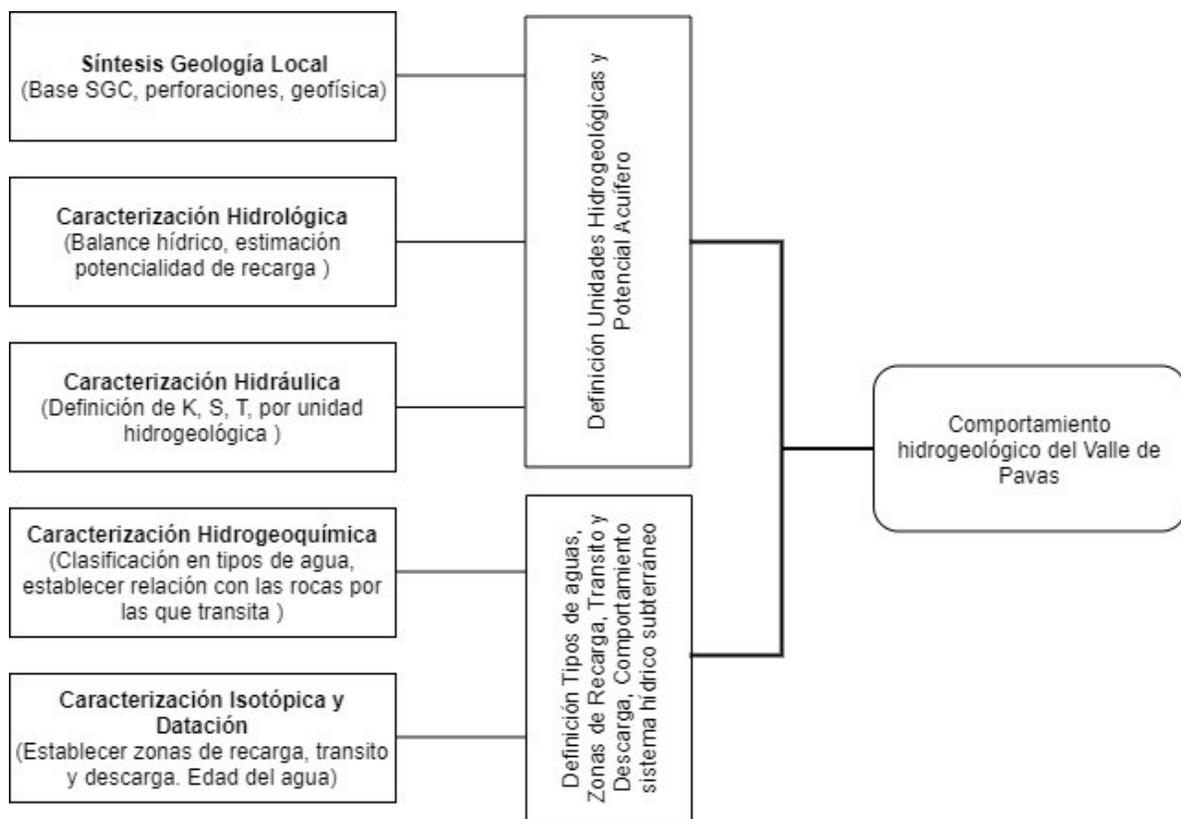


Figura 7. Flujo para el desarrollo de la fase 3.

4.4 FASE 4 ELABORACIÓN DE REPORTE DE RESULTADOS

Como resultado del conocer el comportamiento del sistema hídrico subterráneo el Valle del Río Pavas se construirán los siguientes reportes claves que permitirán transmitir los resultados de la investigación:

- Modelo Hidrogeológico Conceptual: Mediante los modelos geológico, hidrológico, hidráulico, hidrogeoquímico y bloques diagrama, perfiles hidroestratigráficos, se explicará el comportamiento hidrogeológico de la zona de estudio.
- Se extraerán las conclusiones que expliquen los resultados obtenidos durante la investigación.
- Se plantearán recomendaciones para mejorar el conocimiento que se establezca dentro de la presente investigación y se planearan futuras líneas de investigación, que complementen o debatan la investigación a realizar.
- Artículo: Como producto de la investigación se elaborará un artículo científico titulado: VALIDACIÓN DE MODELOS CONCEPTUALES MEDIANTE ISOTOPOS ESTABLES ^2H , ^{18}O , CASO DE ESTUDIO: “MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA DEL RÍO PAVAS EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO VIAL MULALÓ – LOBOGUERRERO EN EL MUNICIPIO DE LA CUMBRE – VALLE DEL CAUCA” el cual será sometido a una revista indexada para su publicación.

5. RESULTADOS

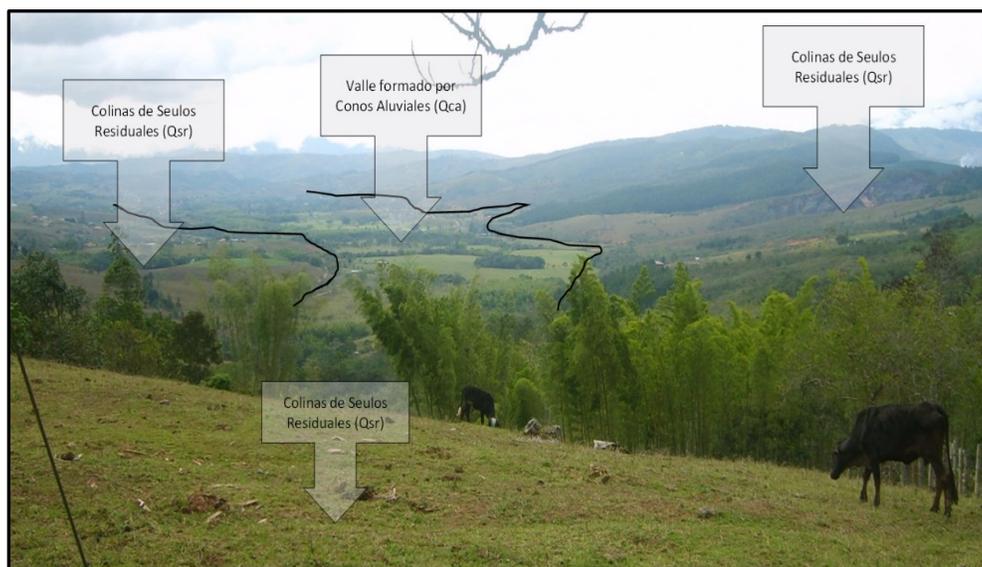
Basados en la información recopilada, la cual es fundamental en trabajos de investigación según Hernandez Sampieri *et al.*, (2010), en relación con la geología, la hidrología, la hidráulica y el complemento mediante el muestreo hidrogeoquímico e isotópico, se presentan a continuación los resultados para cada una de las caracterizaciones.

5.1 MODELO GEOLÓGICO

A partir de los mapas geológicos preexistentes y el trabajo de campo realizado por (COVIMAR, 2018) se define la geología para el Valle del Río Pavas la cual se caracteriza por la presencia de la Formación Volcánica (Kv), Suelos Residuales (Qsr), Conos Aluviales (Qca) y Depósitos Aluviales (Qal).

En la siguiente fotografía se presenta una vista panorámica del Valle del Río Pavas y se identifican las dos unidades geológicas que predominan y en la Figura 8, se presenta el mapa geológico para la cuenca del Valle del Río Pavas.

Foto 9. Vista del Valle de Pavas desde el sector Creta de Gallo.



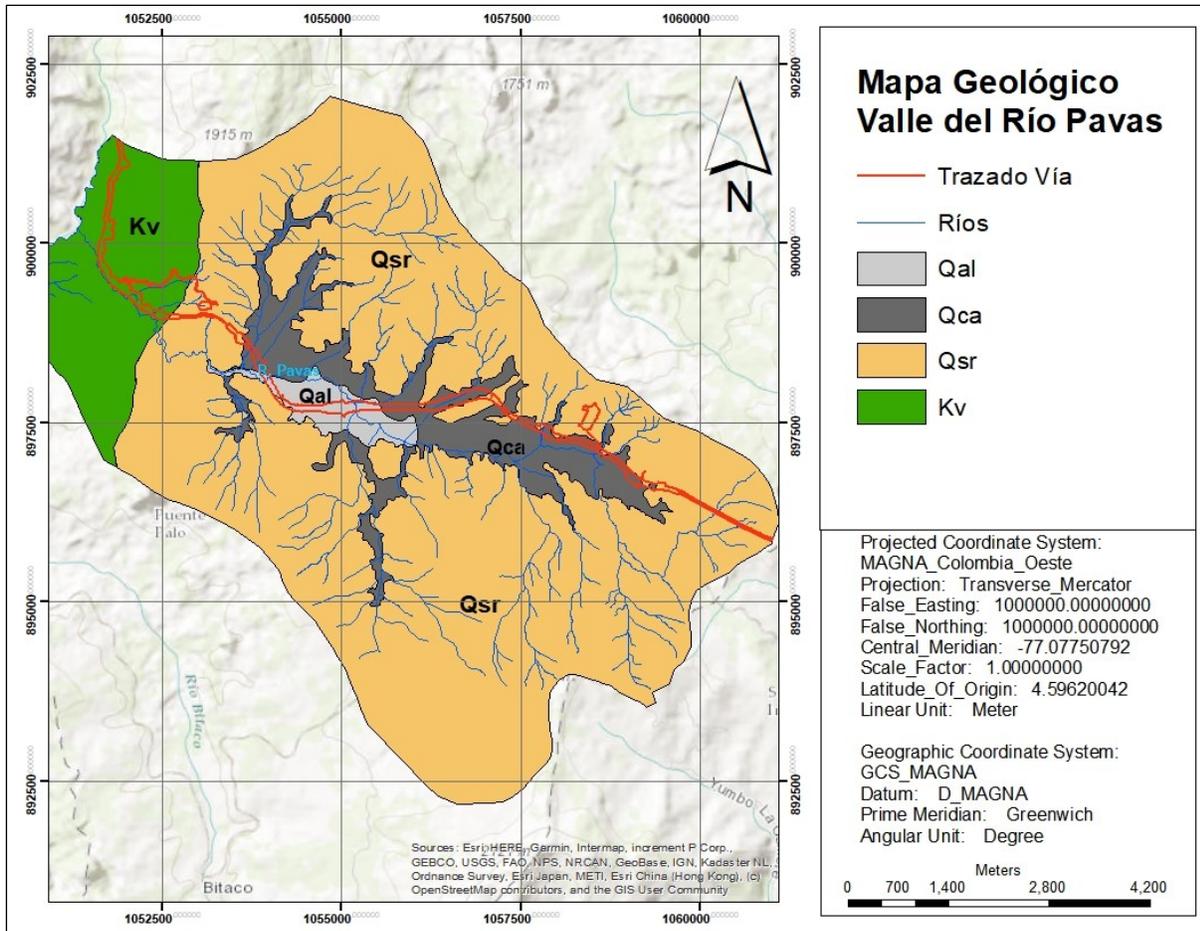


Figura 8. Mapa geológico actualizado para el Valle del Río Pavas.

Fuente: Tomado y mejorado EIA (COVIMAR, 2018)

5.1.1 Formación Volcánica (Kv)

Esta unidad está constituida principalmente por diabasas, verdosas, azulosas y grises, altamente fracturadas, moderada a altamente meteorizadas, donde a partir de la afectación generada por los diferentes eventos tectónicos que se han llevado a cabo en el sector se pueden identificar espejos de fricción sobre las discontinuidades.

Esta unidad geológica en el Valle del Río Pavas solo aflora al noroccidente de la zona, en la parte baja del río Pavas cerca a la desembocadura del mismo al Río Bitaco. Los afloramientos

se caracterizan por ser rocas de textura afanítica y color verde, con moderado de fracturamiento, de excelente condición geomecánica, visualmente la roca es monótona y no se encontró ningún otro tipo de litología.

Foto 10. Rocas de la Formación Volcánica (Kv), en el sector noroccidental de la zona de estudio.



5.1.2 Suelos Residuales (Qsr)

Esta unidad se encuentra presente en las cuatro laderas que rodea el Valle del Río Pavas, en general este suelo se presenta de un color pardo- rojizo, producto de la meteorización intensa de las rocas volcánicas de la zona, no conserva ninguna textura ni estructura de la roca madre (Diabasa), sus tonalidades evidencian que su composición es rica en óxidos e hidróxidos de hierro. Es un suelo de textura que varía entre areno-limoso y limo-arcilloso, su espesor es muy variable y puede llegar a superar los 30 metros de espesor.

También se identifican niveles de Lateritas que suprayacen en diferentes tramos el sustrato rocoso, estos niveles residuales son originados a partir de procesos de meteorización química intensa que alteran la estructura y composición de las rocas *in situ*.

Foto 11. Suelos Residuales producto de la meteorización de la roca volcánica.



5.1.3 Conos Aluviales (Qca)

Estos depósitos se encuentran en la zona plana del Valle del Río Pavas, puede desarrollar un espesor hasta de 30 m, en la parte central y se adelgaza hacia la zona de piedemonte.

Esta unidad está formada por la coalescencia de varios depósitos de detritos provenientes de la erosión de las laderas del valle, los cuales se han depositado en forma de pequeños conos aluviales de poca pendiente. Estos depósitos se formaron poco a poco y fueron avanzando hacia la parte más baja del valle hasta colmatarlo.

Los depósitos se reconocen debido a que como todo depósito de este tipo tiene un ápice, una parte distal y una ligera pendiente en la dirección de la depositación. Estos depósitos se formaron por la acumulación de coladas de barro acuosas y coetáneas, que llegaron hasta la parte más baja del valle y lo fueron colmatando hasta llenarlo. Durante este proceso se formó un lago

que paulatinamente se fue colmatando hasta desaparecer, quedando los depósitos lacustres que se han reportado en varias perforaciones hechas en la parte plana del valle. El proceso de llenado de una zona deprimida, por medio de abanicos y/o conos aluviales crea una serie de depósitos coetáneos e interdigitados, que, dependiendo de la zona de aporte, pueden ser lentes de conglomerados, arenas, limos y arcillas, más los depósitos lacustres. Como la zona de aporte está constituida en un alto porcentaje por los suelos residuales arcillosos derivados por la meteorización química de las rocas diabásicas de la Formación Volcánica, es de esperarse que los depósitos que más abundan en el valle sean arcillas rojas transportadas.

Foto 12. Depósitos de Conos Aluviales (Qca) en el Acueducto de Pavas, originando manantiales de surgencia, por presión y erosión o por remover la capa arcillosa que confina el acuífero en esta zona.



5.1.4 Depósitos Aluviales (Qal)

Con esta denominación se nombran los depósitos localizados en la zona de menor pendiente, para diferenciarlos de los depósitos de los conos aluviales que si tienen una ligera pendiente. Composicionalmente y en la superficie no se diferencian de los depósitos de los conos y la carencia de afloramientos no permite obtener una columna estratigráfica superficial, pero la información de las perforaciones permite concluir que son depósitos lacustres formados por intercalaciones de limos y arcillas con lentes de arenas, formados en un ambiente de aguas tranquilas. En la Figura 9, se presenta la columna estratigráfica generalizada para el Valle del Río Pavas.

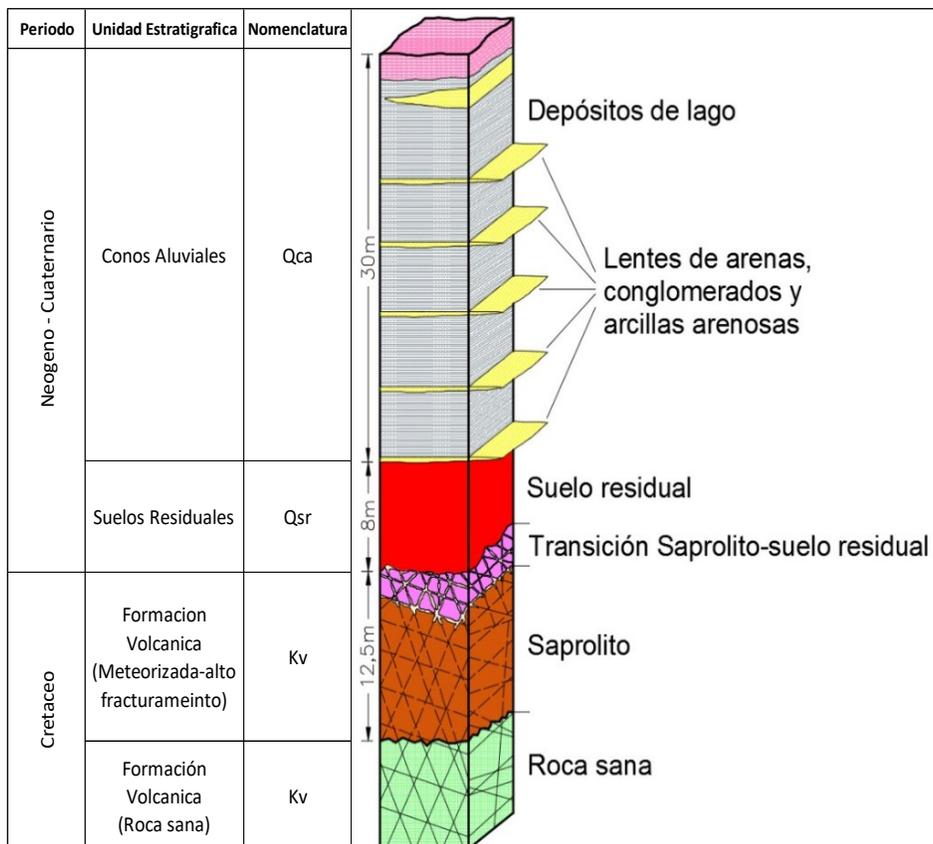


Figura 9. Columna estratigráfica generalizada para el Valle del Río Pavas.

Fuente: Tomado y mejorado EIA (COVIMAR, 2018)

5.1.5 Geología Estructural

El Valle del Río Pavas se ubica en el borde oriental de la Cordillera Occidental de Colombia al noroeste de la ciudad de Cali, sobre un basamento de rocas volcánicas básicas de origen marino que han sido afectadas por varios eventos tectónicos que en conjunto han dado lugar a la conformación de la cordillera como se conoce hoy. Esta tectónica ha permitido la generación de un sistema de fallas geológicas de características regionales con orientación NNE-SSW.

En la Figura 10 se pueden observar los rasgos estructurales más sobresalientes en el valle, reflejan las fallas de Mulaló, Falla de Pavas – Quebrada Seca y Falla La Cumbre – Aguas Claras.

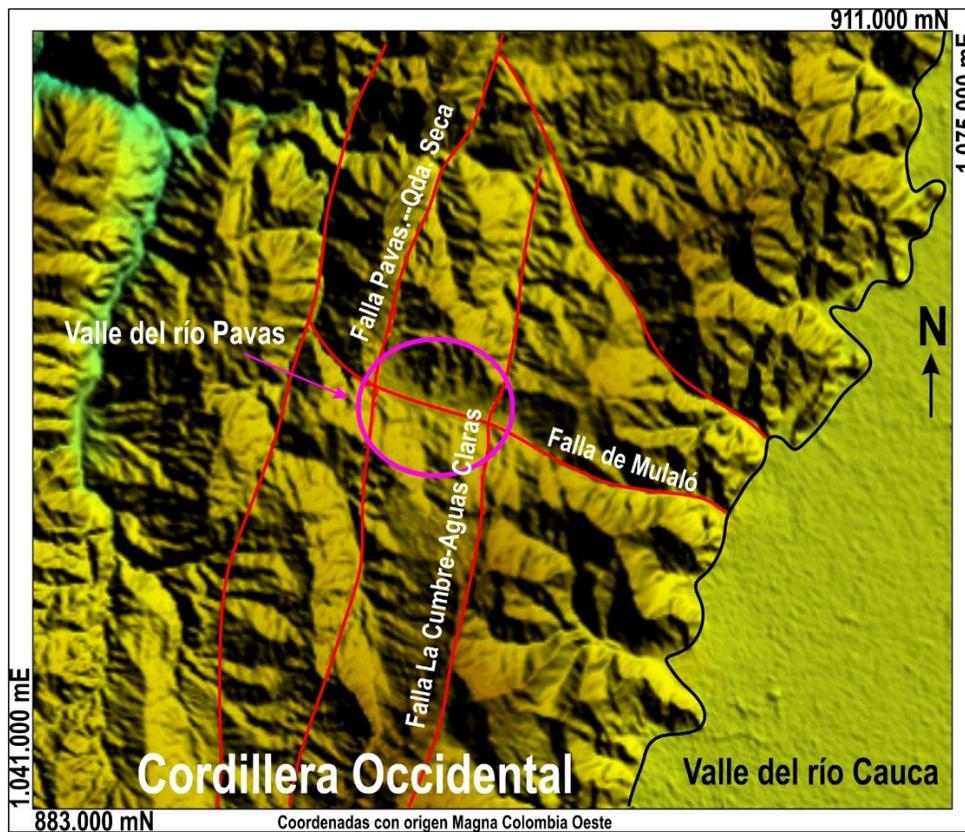


Figura 10. Rasgos geomorfológicos mayores y lineamientos y fallamiento geológico a nivel regional.

Fuente: Tomado y mejorado EIA (COVIMAR, 2018)

5.1.5.1 Falla de Mulaló

La Falla Mulaló es una de las fallas transversales en la dirección de la mayoría de las fallas que tiene la Cordillera Occidental, presenta un rumbo aproximado de $N75^{\circ}W$ y cruza en sentido longitudinal el Valle del Río Pavas, controlando gran parte de su curso. Su trazo rectilíneo y ligeramente curvo en superficie indica que el plano de falla en profundidad es de alto ángulo y alabeante. No se conoce ni la edad ni la actividad de la falla ya que no hay evidencias en depósitos recientes. En el Valle del Río Pavas está cubierta por los depósitos recientes que rellenan el valle.

5.1.5.2 Falla Pavas – Quebrada Seca

Esta falla hace parte de las fallas de tendencia norte – sur y su trazo se localiza justo en la parte occidental del valle donde el río Pavas cambia bruscamente su pendiente. El rumbo de la falla a su paso por el valle es $N10^{\circ}15^{\circ}E$, y por su trazo rectilíneo en superficie es una falla de alto ángulo de buzamiento.

La diferencia en altura entre el filo localizado al occidente de la falla y el valle, es un indicativo que la falla tiene componente de gravedad normal, con el bloque oriental hundido. Esto permite explicar por qué el valle permitió la acumulación de depósitos aluviales y la formación del acuífero de Pavas.

5.1.5.3 Falla La Cumbre – Aguas Claras

Esta falla, al igual que la Falla Pavas – Quebrada Seca es de trazo norte – sur y atraviesa el valle del río Pavas en su costado oriental. Es una falla como las anteriores es de alto ángulo de buzamiento y plano alabeante.

La combinación de las tres fallas hasta ahora conocidas permite plantear un modelo geológico estructural del valle del río Pavas, donde es claro que el valle tectónico del Valle del Río Pavas está formado por al menos dos bloques de roca afectados por tectónica distensiva con formación de sendos escalones que facilitaron la acumulación de los sedimentos que rellenan el valle.

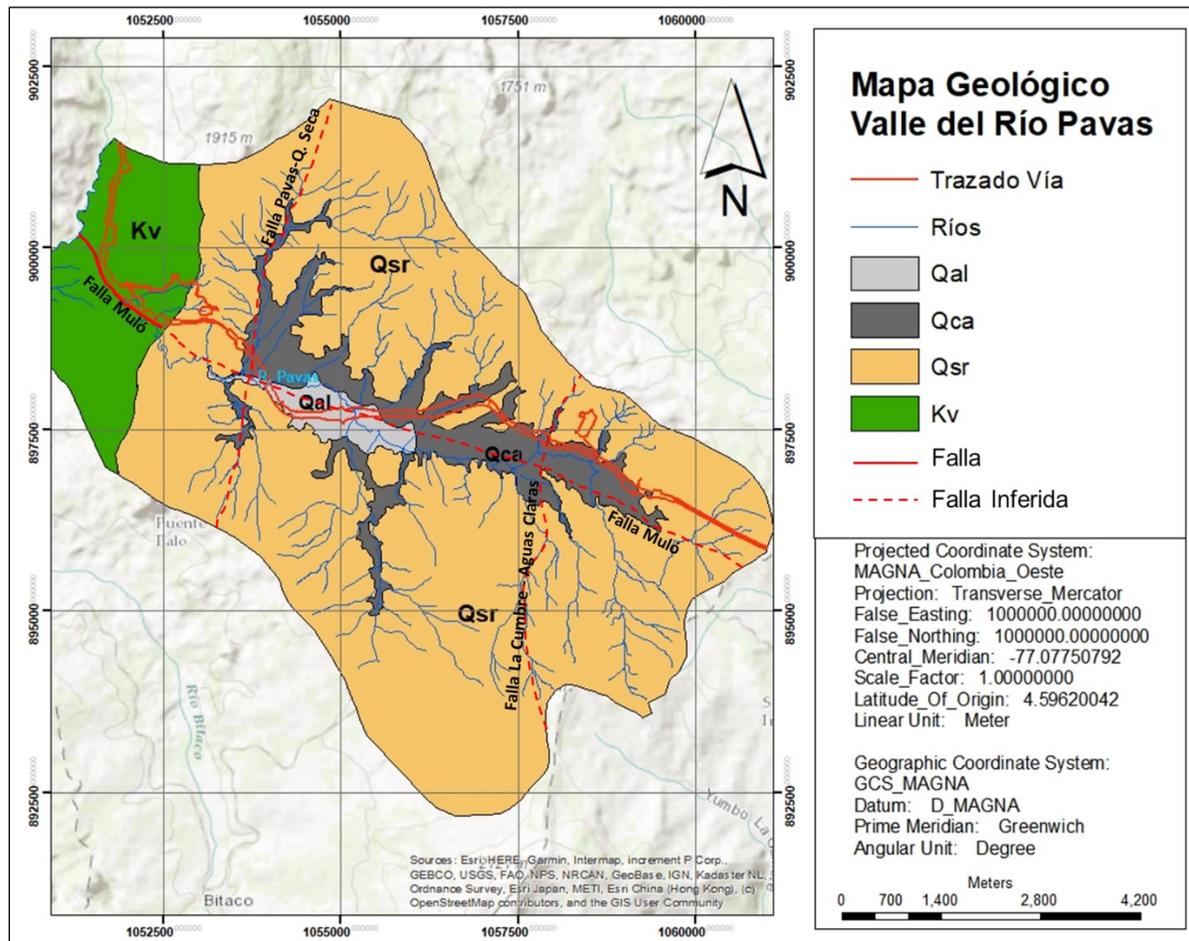


Figura 11. Fallas identificadas en la Cuenca del Valle del Río Pavas.

Fuente: Tomado y mejorado EIA (COVIMAR, 2018)

5.1.6 Correlaciones Geológicas

A partir de las perforaciones existente en el Valle del Río Pavas y la información levanta en campo por COVIMAR, (2018) se construyeron seis (6) secciones geológicas, permitiendo representar la composición geológica en profundidad del Valle del Río Pavas.

En la Figura 12, se presenta el mapa con la ubicación de las secciones para las correlaciones geológicas.

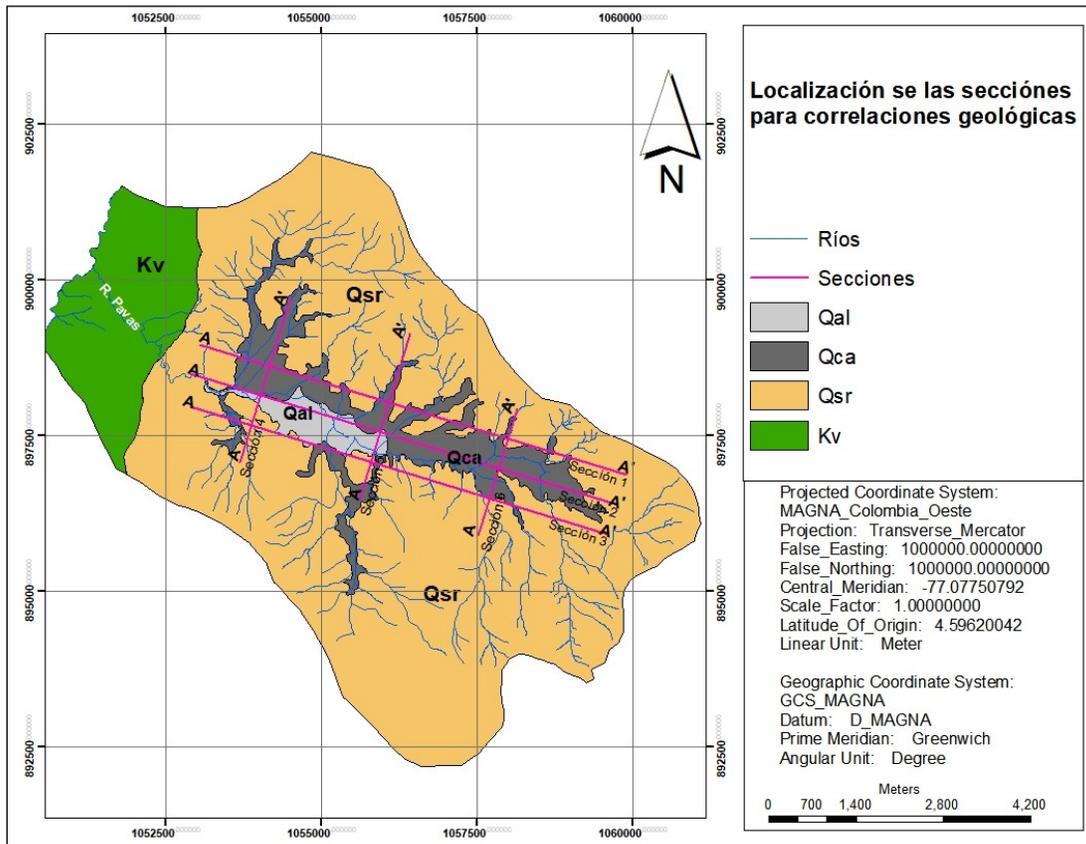


Figura 12. Localización de las secciones geológicas.

Las secciones 1 a 3, atraviesa el Valle del Río Pavas en dirección NW-SE, las secciones 1 se localiza en la zona de piedemonte de la ladera norte (zona la Pinera) y la sección 3 se localiza en el piedemonte de la ladera sur (zona La Cumbre) y representan en superficie de occidente a oriente los Suelos Residuales (Qsr) con espesores que van entre 12 y 15 metros, seguidos de Conos

Aluviales (Qca) con un espesor que no supera los 10 metros, la sección muestra los depósitos de Conos Aluviales asociados a las zonas de depresión y por donde seguramente se originó la depositación en la zona plana, con espesores que no superan los 5 metros, sobreyaciendo los Suelos Residuales. De techo a base, esta sección presenta los Suelos Residuales (en algunas zonas cubiertos por Conos Aluviales), sobreyaciendo la Formación Volcánica, la cual se en su parte más superficial (de máximo 3 metros) se presenta medianamente fracturada y en el fondo se presenta más consolidada y con bajo a nulo grado de fracturamiento.

La sección 2, en la misma dirección (NW-SE) representa principalmente en superficie los Depósitos Aluviales y los Conos Aluviales, los Depósitos Aluviales se presentan al occidente donde el valle se va haciendo más estrecho presentan un espesor de hasta 25 metros en esta zona, los Conos Aluviales presentan una mayor extensión y desarrolla espesores de hasta 30 metros, en los extremos de esta sección se presentan los Suelos Residuales asociados a las laderas de Cresta de Gallo y Morales. En profundidad se puede observar la Formación Volcánica, diferenciando en sus tres primeros metros la zona con un grado moderado de fracturamiento.

En las tres secciones se observa la falla de Aguas Claras – La Cumbre al oriente y la falla Pavas – Quebrada Seca al occidente, las dos cubiertas por depósitos recientes. La Figura 13 muestra las tres primeras secciones.

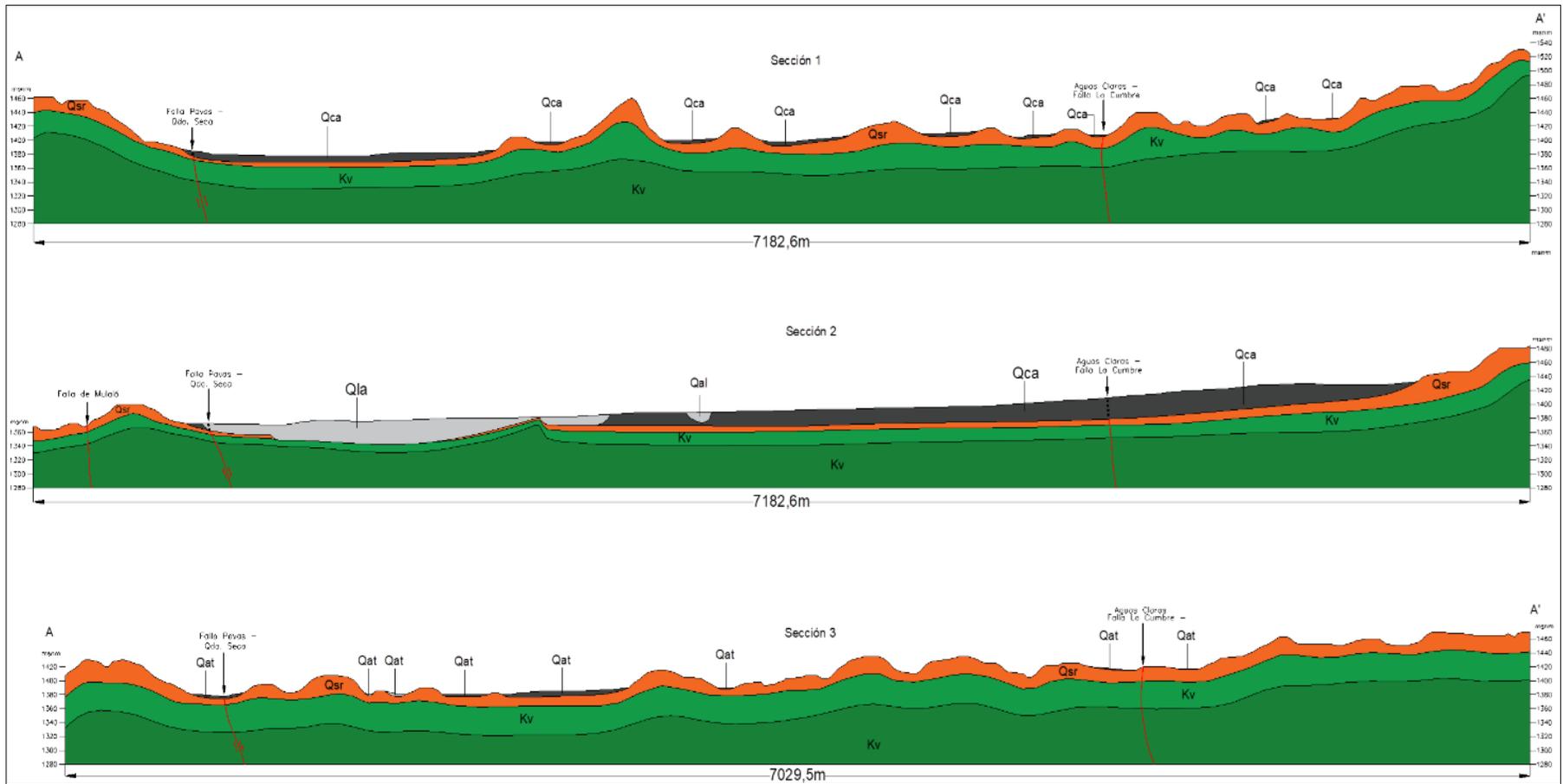


Figura 13. Secciones geológicas NW-SE.

Las secciones 4, 5 y 6 se realizan con dirección S-N, representan una configuración del Valle del Río Pavas en forma de U ensanchada, mostrando que en las vertientes norte (La pinera) y sur (La Cumbre) se presentan Suelos Residuales aflorando en superficie desarrollando espesores hasta de 30 metros. En la zona plana estos suelos se encuentran cubiertos por los Conos Aluviales y Depósitos aluviales con espesores hasta de 30 metros en la zona con mayor espesor.

Se observa el trazo de la Falla Mulaló, la cual es cortada de forma transversal por las tres secciones. (Ver Figura 14).

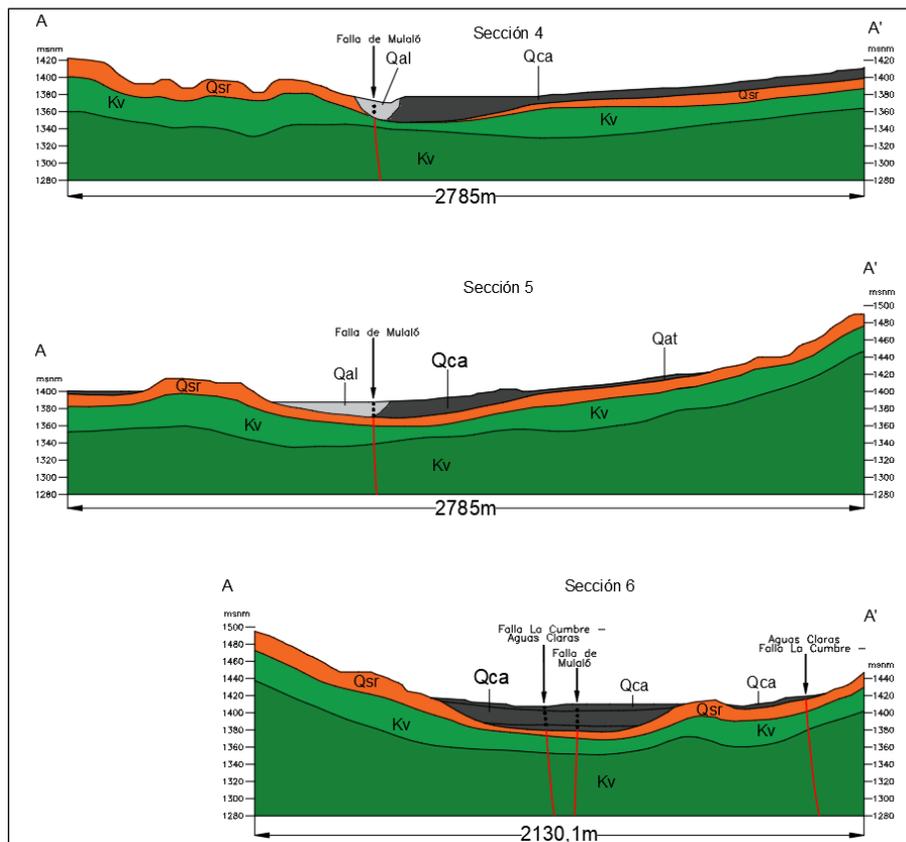


Figura 14. Secciones geológicas S-N.

5.2 CARACTERIZACIÓN HIDROLOGÍA

Con el fin de obtener los valores de recarga se aplica el método del *Soil Conservation Service* y la metodología propuesta por (Matus, 2007) para la delimitación de zonas potenciales de recarga.

5.2.1 Determinación de la Infiltración Potencial

Para determinar el número de curva propuesto por el *Soil Conservation Service*, se tuvo en cuenta el mapa de suelos y de cobertura vegetal, los cuales se presenta en las Figura 15 y Figura 16.

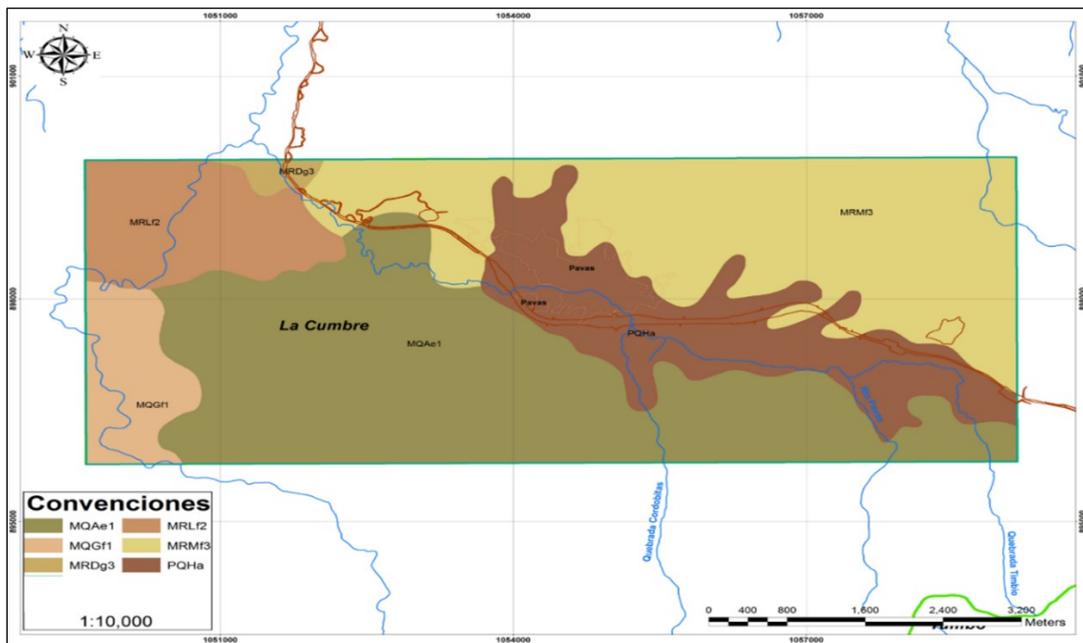


Figura 15. Tipos de suelo en la cuenca del Valle del Río Pavas.

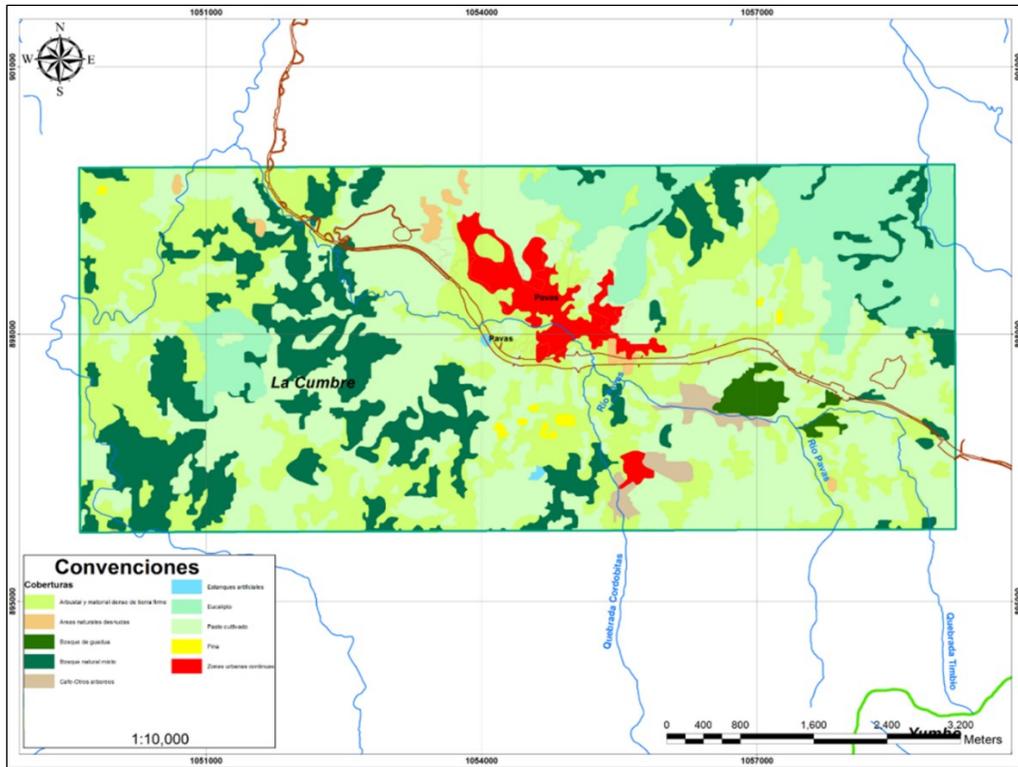


Figura 16. Cobertura vegetal.

En la Tabla 4 se presentan el número de curva para los grupos de suelo cultivados y en la Tabla 5 se relacionan los números de curva para suelos con otra condición agrícola.

Tabla 4. Número de curva de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas.

Cobertura		Condición Hidrológica	Grupo de suelos			
Uso de la Tierra	Practica o Tratamiento		A	B	C	D
			Numero de Curva			
Rastrojo	Hileras Rectas	-	77	86	91	94
Cultivos en hileras	Hileras Rectas	Mala	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de Nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Curvas de Nivel y Terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81

Cobertura		Condición Hidrológica	Grupo de suelos			
Uso de la Tierra	Practica o Tratamiento		A	B	C	D
			Numero de Curva			
Cultivos en hileras estrechas	Hileras Rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de Nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Curvas de Nivel y Terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras Rectas	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Curvas de Nivel	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Curvas de Nivel y Terrazas	Mala	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80

Tabla 5. Numero de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas.

Descripción y tipo de cobertura	Condición hidrológica	Numero de curva para grupos de suelos hidrológicos			
		A	B	C	D
Pastos, forraje para pastoreo	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno	Buena	30	58	71	78
	Mala	48	67	77	83

Descripción y tipo de cobertura	Condición hidrológica	Numero de curva para grupos de suelos hidrológicos			
		A	B	C	D
Maleza mezclada con pasto de semilla con la maleza como principal elemento	Regular	35	56	70	77
	Buena	30	48	65	73
Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles)	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes		59	74	82	86

5.2.1.1 Precipitación

La precipitación del Valle del Río Pavas se establece a partir de las estaciones de referencia, en la Figura 17 se presenta la distribución de la precipitación para los doce meses del año, basado en los datos de las estaciones en referencia.

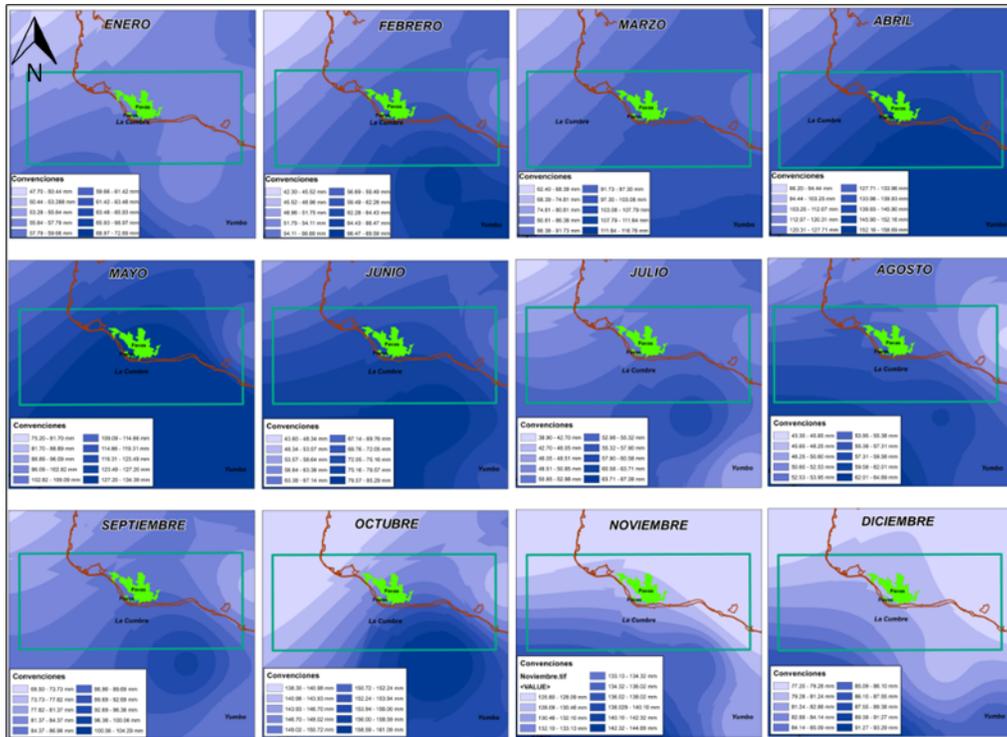


Figura 17. Distribución de la precipitación.

La mayor precipitación ocurre hacia el suroriente de la cuenca en el sector de Montaña, de igual manera, se observa que hacia la zona noroccidental la precipitación disminuye y en el Valle del Río Pavas se presenta una precipitación media con respecto a toda la cuenca. En la Figura 18 se representa la precipitación para la cuenca del Río Pavas.

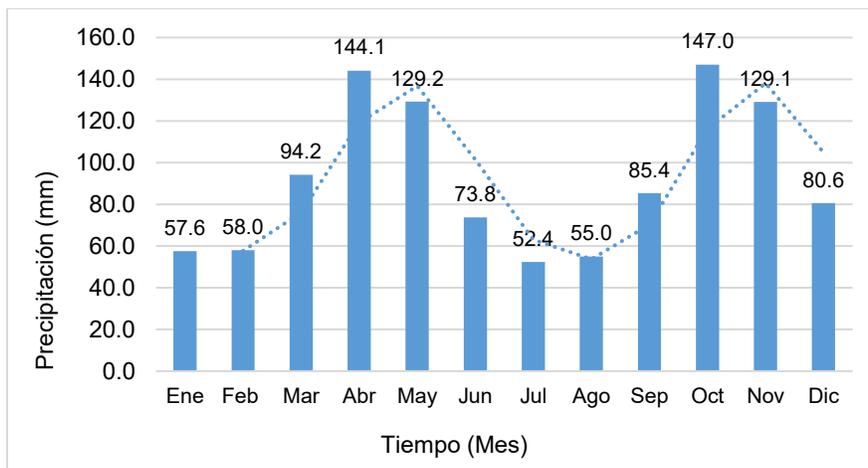


Figura 18. Precipitación media mensual multianual para la Cuenca del Río Pavas.

5.2.1.2 Temperatura

A partir del análisis de la temperatura basados en Caldas-Lang, se tiene la distribución de la temperatura a lo largo de la cuenca del Río Pavas, la cual se presenta en la Figura 19.

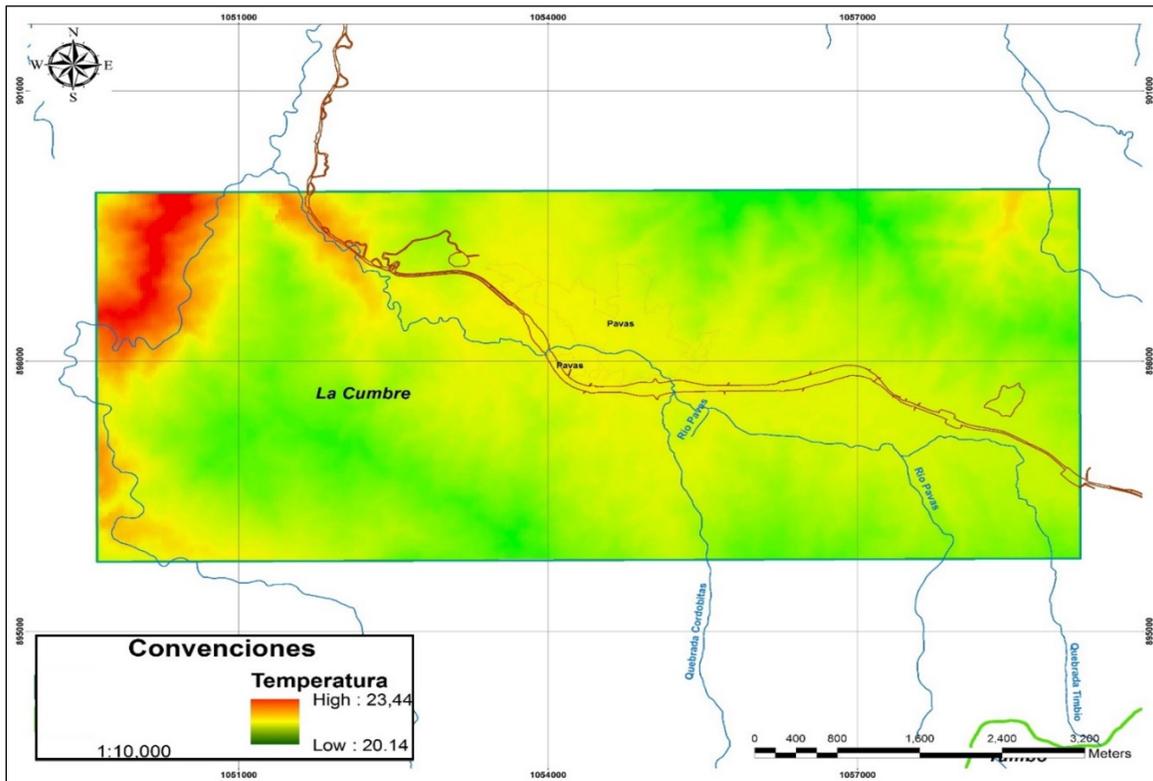


Figura 19. Distribución de la temperatura para la cuenca del Río Pavas.

5.2.1.3 Evapotranspiración

Aplicando la metodología de Thornthwaite se estimaron los valores de evapotranspiración que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Cálculo de la ETP Método de Thornthwaite.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	23,5	23,8	23,9	24,0	23,7	23,9	23,7	23,8	23,3	22,8	22,7	23,4
i	10,4	10,6	10,7	10,7	10,5	10,7	10,5	10,6	10,3	9,9	9,9	10,3
ETP _{Sin} corregir	96,4	99,9	101,1	102,3	98,7	101,1	98,7	99,9	94,0	88,4	87,3	95,2
No Días mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
ETP corregida	103,7	87,0	87,1	80,2	82,5	89,3	102,0	114,4	112,8	114,2	106,9	112,3

5.2.1.4 Infiltración Potencial

Teniendo en cuenta el cálculo del número de curva y los valores de precipitación en la cuneca del Río Pavas se establecieron los valores de infiltración potencial, los cuales se presentan en comparación con la precipitación en la siguiente figura.

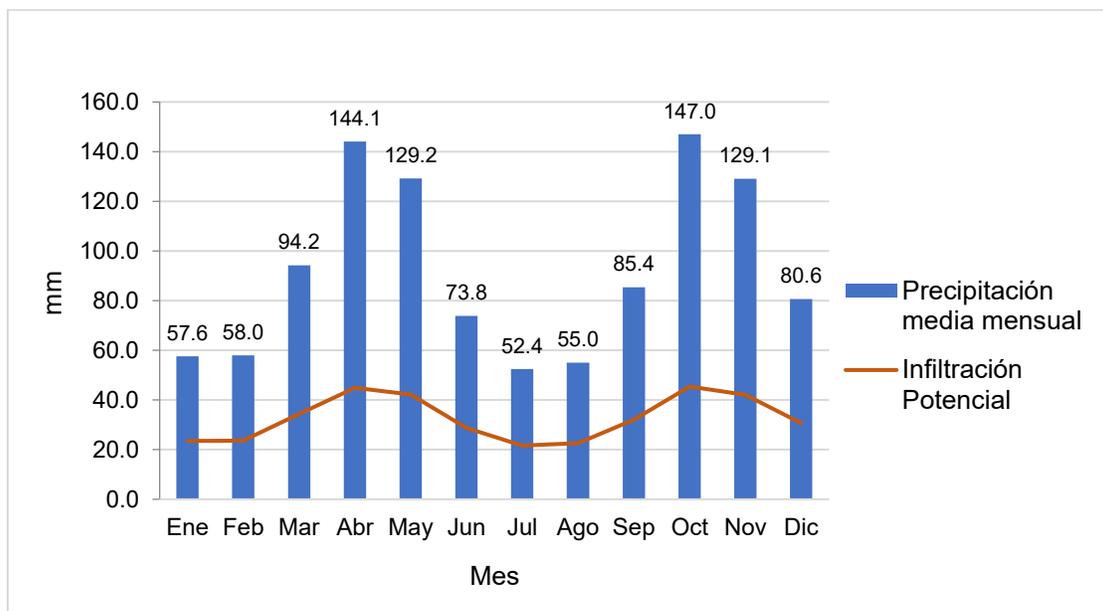


Figura 20. Valores de infiltración potencial vs precipitación.

Tabla 7. Valores de infiltración potencial.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación	57. 6	58. 0	94.2	144. 1	129. 2	73. 8	52. 4	55.0	85. 4	147. 0	129. 1	80. 6
Infiltración	23. 5	23. 6	34.4	44.9	42.1	28. 7	21. 6	22.6	32. 0	45.4	42.1	30. 7

El análisis de la infiltración potencial aplicando el método del *Soil Conservation Service*, permite establecer que en las zonas donde se presente un mayor potencial de recarga la infiltración potencial puede llegar a ser hasta del 35% de la precipitación que se registre.

5.2.2 Delimitación de Zonas Potenciales de Recarga

A continuación, se describen los valores asignados a cada variable en la metodología de (Matus, 2007) así como también y valores asignados según las características de la zona.

5.2.2.1 Pendientes

Los valores de escorrentía de un área están fuertemente asociados al valor de la pendiente que allí se tiene, teniendo en cuenta que en las zonas planas se presenta un tiempo mayor en el que se favorecen proceso de infiltración en el suelo, a diferencia de las zonas con pendientes fuertes, las cuales favorecen procesos de escorrentía lo que puede ocasionar degradación de los suelos y desfavoreciendo los procesos de infiltración.

Morfográficamente en la cuenca del Río Pavas existe un predominio de las pendientes ligeramente plana en un 23.12 % y ligeramente inclinadas en un 22.4%, el 19% corresponde a pendientes moderadamente inclinadas, 14.5% pertenece a pendientes fuertemente inclinadas,

8.84% son pendientes ligeramente escarpada o ligeramente empinada, 5.14% son pendientes a nivel, el 4.82% son pendientes moderadamente escarpadas y el 1.52%. Estos datos se obtuvieron mediante el Modelo de Elevación Digital (MED) el cual presenta una resolución de 12.5 m y los cuales se presentan en al Tabla 8.

La mayor parte de estas altas pendientes corresponde o se encuentra asociada a los puntos de inflexión de las geoformas de origen volcánico, las más sobresalientes son las fuertemente inclinadas, resaltadas en color naranja, que se relacionan principalmente con las áreas conformadas por las litologías más competentes. El segundo tipo de pendiente se caracteriza por incluir zonas moderadamente inclinadas, resaltadas en color amarillo y que se relacionan principalmente con los relieves de lomas que caracterizan el sector norte del área de estudio. El tercer tipo de pendiente, característico del área de influencia, incluye zonas de pendientes ligeramente planas, representadas en colores verdes donde se ubica el casco urbano del Corregimiento de Pavas. (Ver Figura 21).

Tabla 8 Rango de pendientes presente en el área de estudio

Rango (%)	Descripción	Potencial de recarga	Ponderación	Área de Estudio (%)
0 – 1%	A nivel	Muy alta	5	5.14
1% – 3%	Ligeramente plana	Muy alta	5	23.12
3% – 7%	Ligeramente inclinada	Muy alta	5	22.34
7% – 12%	Moderadamente inclinada	Alta	4	19.72
12% – 25%	Fuertemente inclinada	Alta	4	14.48
25% – 50%	Ligeramente escarpada o ligeramente empinada	Media	3	8.84
50% – 75%	Moderadamente escarpada o moderadamente empinada	Media	3	4.82
75%-100%	Fuertemente escarpada o fuertemente empinada	Baja	2	1.52

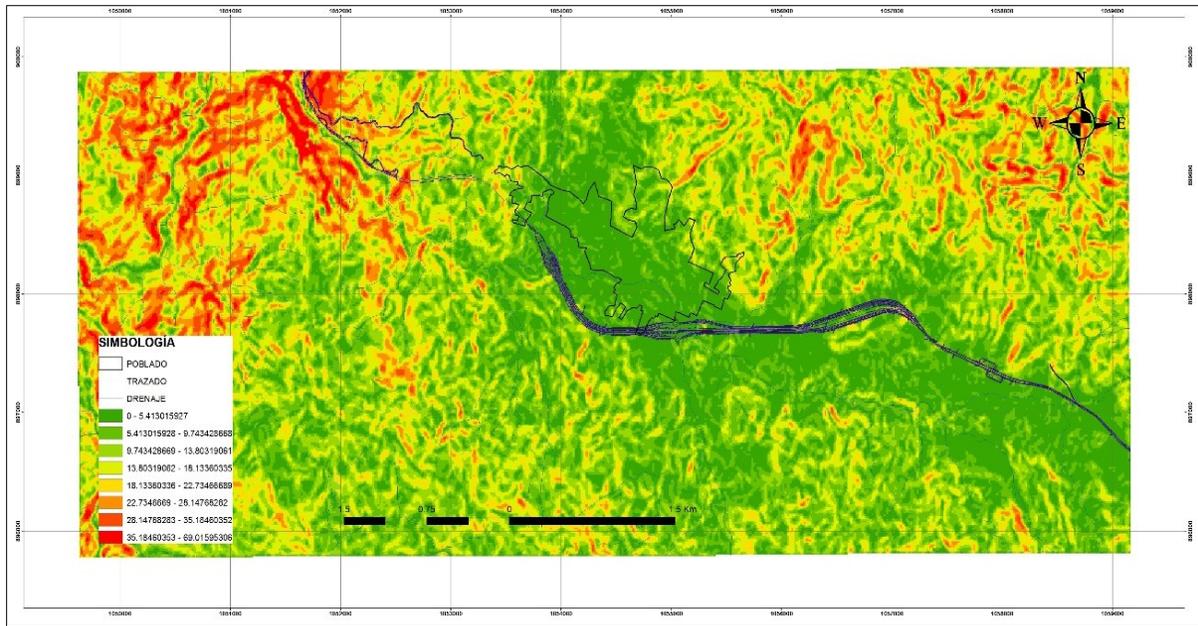


Figura 21 Mapa de pendientes del área de estudio

5.2.2.2 Suelos

El suelo es el resultado de la meteorización o alteración de una roca originaria, el cual puede ser de tipo orgánico o de tipo mineral. Su origen, composición y desarrollo está relacionado con los fenómenos (generalmente naturales) que actúan simultáneamente en el tiempo sobre la roca de origen como es el clima, los organismos y la topografía.

Como resultado de la interacción de los factores pedogenéticos, ocurren procesos de pérdidas, adiciones, transformaciones y translocaciones, los que se encargan de producir la diferenciación de horizontes y determinar el grado de evolución de los suelos. En la Tabla 9 se describen las características que forman parte de los suelos presentes en el área de influencia y en la Figura 22 se muestra su distribución.

Tabla 9 Tipo de suelos presentes en el área de estudio

Unidad de Suelo	Características Principales	Potencial de recarga	Ponderación	Área de Estudio (%)
MQAe1	Franco arenosa-arcillosa, a franca	Baja	2	38.00
MQGf1	Franco limosa a arcillosa	Muy baja	1	5.49
MRDg3	Arcillosa-gravosa	Baja	2	0.83
MRLf2	Franco arcillosa arenosa con grava	Moderada	3	9.12
MRMf3	Franco arcillosa arenosa con grava	Moderada	3	30.10
PQHa	Franco arcillosa, franca, arcillo-arenosa	Muy baja	1	16.45

La variable textura del suelo predominante para el área de estudio es franco arenosa-arcillosa, a franca abarcando el 38% del total del área de estudio.

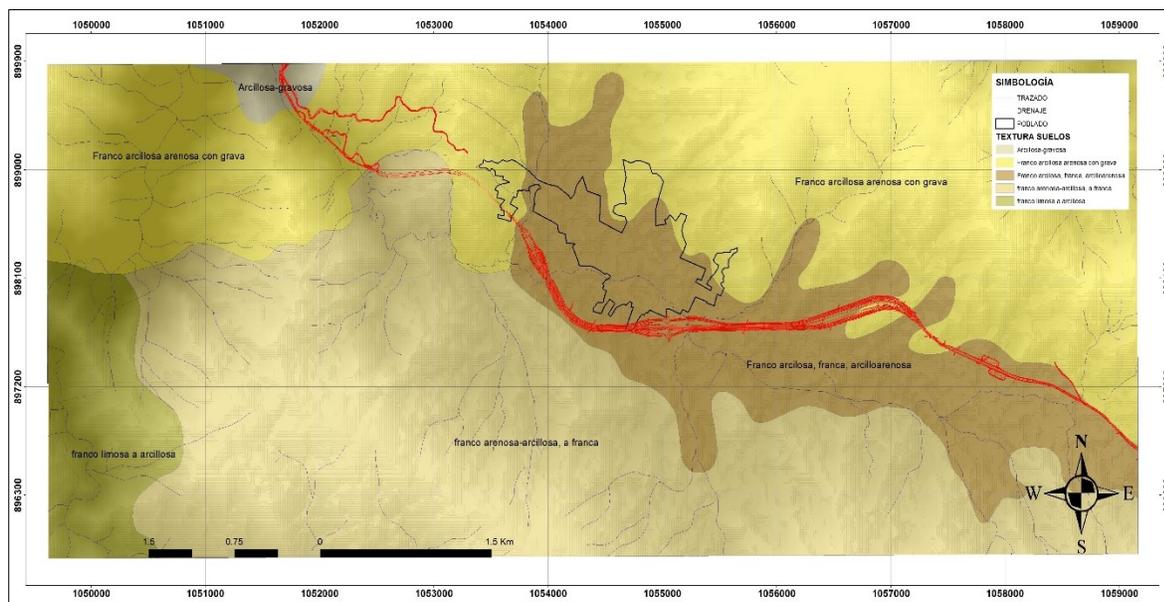


Figura 22 Distribución de texturas de suelo presentes en el área de estudio

5.2.2.3 Tipo de Roca

Las ponderaciones son asignadas con base en los tipos de material geológico en relación con su permeabilidad; así, rocas ígneas o metamórficas no fracturadas o con fracturas cerradas poseen una baja permeabilidad, al igual que los materiales finogranulares arcillo-limosos; por otro lado, las arenas gruesas y gravas cuya textura permite que existan poros de gran tamaño entre sus granos, mediante los cuales fluye el agua con sin mayores limitantes, comportamiento que favorece de muy buena forma los procesos de recarga.

Localmente, el área de estudio se encuentra cubierta principalmente por suelos lateríticos (57,5%) y por diabasas (26.9%). El tipo de roca presente se muestra en la Figura 23 y su ponderación se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 Principales características del tipo de roca presente en el área de estudio

Unidad estratigráfica	Descripción Litológica	Tipo de Roca	Ponderación	Potencial de Recarga	Área de Estudio (%)
Depósitos Cuaternarios Aluviales (Qal)	Depósitos poco consolidados, se componen de cantos transportados, redondos a sub-redondos, estos cantos se encuentran embebidos en una matriz principalmente arenosa, que varía a limoarenosa y/o limosa.	Permeables	3	Moderada	0.14
Depósitos Cono Aluvial (Qca)	Estos depósitos se constituyen por capas de arenas finas a gruesas y hacia la base se pueden encontrar gravas finas a	Permeables	3	Moderada	14.24

	medias embebidas en limos arenosos.				
Suelos Residuales (Qsr)	En general este suelo se presenta de un color pardo-rojizo, producto de la meteorización intensa de las rocas volcánicas de la zona, no conserva ninguna textura ni estructura de la roca madre (Diabasa), sus tonalidades evidencian que su composición es rica en óxidos e hidróxidos de hierro.	Poco Permeables	2	Baja	57.49
Formación Volcánica (Kv)	Se compone principalmente por diabasas, medianamente fracturadas, moderada a altamente meteorizadas.	Medianamente permeables	2	Baja	26.87

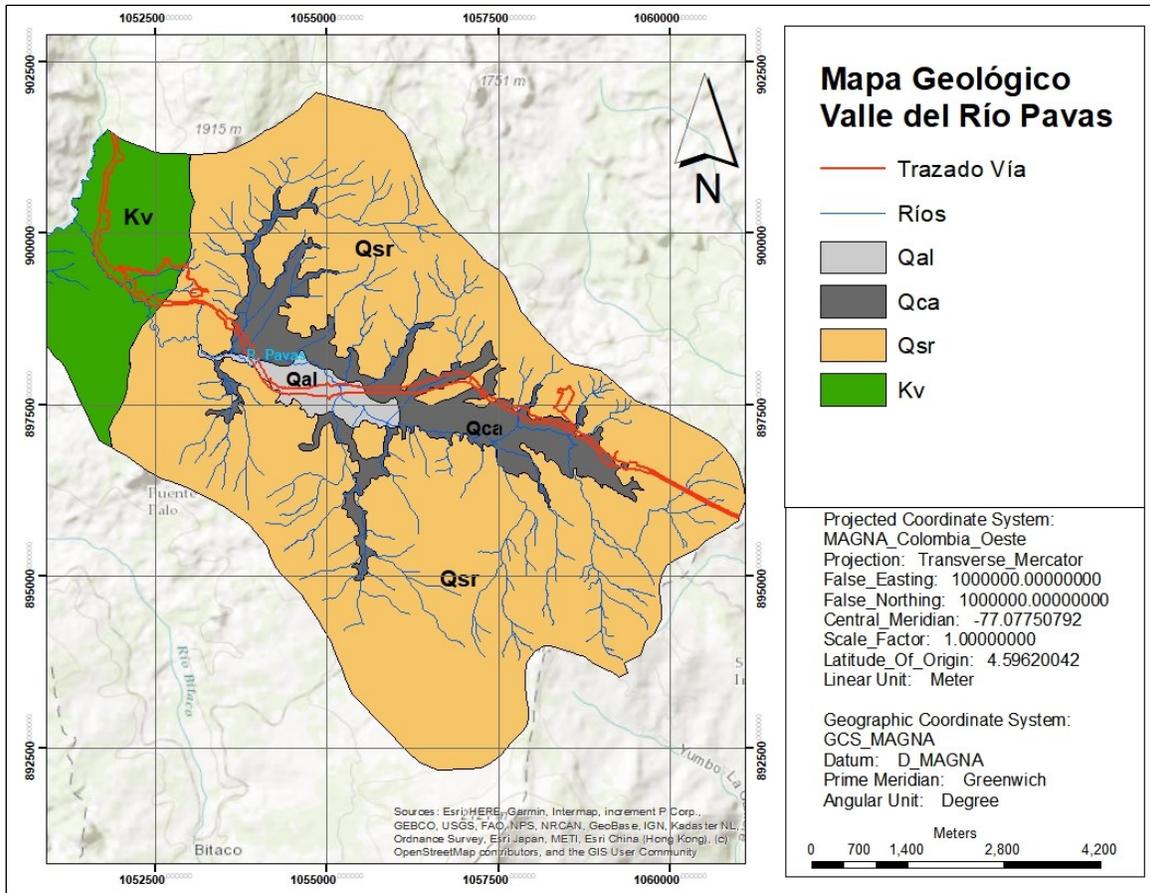


Figura 23 Unidades geológicas presentes en el área de estudio

5.2.2.4 Cobertura vegetal y uso de suelo

El grado de cobertura vegetal que cubra los suelos permite que exista un mayor contacto entre el agua precipitada y los suelos, aumentando la infiltración y disminuyendo procesos de escorrentía superficial, procesos de erosión, la vegetación protege los suelos del golpe de las gota de lluvia y disminuye la resequead generada por los rayos del sol, mejorando las condiciones del suelo y permitiendo aumentar los procesos de recarga hídrica.

En la Tabla 11 se resumen los principales tipos de cobertura vegetal, así como el uso actual y su ponderación y en la Figura 24 se muestra la relación entre la cobertura vegetal y el uso de suelo presente en el área de estudio.

Tabla 11 Principales tipos de cobertura de tierra y uso de suelo presentes en el área

Cobertura Vegetal	Uso Actual	Potencial de recarga	Ponderación	Área de estudio (%)
Cultivos herbáceos plantados	Agricultura intensiva	Alto	4	0.29
Cultivos arbóreos plantados	Agricultura semi intensiva	Moderado	3	12.13
Cultivos arbóreos plantados	Agroforestal	Moderado	3	1.07
Arbustales y matorrales naturales	Forestal extractivo bajo	Bajo	2	27.41
Bosques naturales	Forestal extractivo medio	Bajo	2	1.00
Bosques naturales	Forestal extractivo bajo	Bajo	2	16.07
Aguas continentales	Humedales artificiales	Nulo	0	0.080
Áreas naturales abiertas sin o con poca vegetación	Misceláneos de erosión	Bajo	2	0.64
Cultivos herbáceos plantados	Pastoreo extensivo	Bajo	2	38.33
Zonas urbanizadas	Zona urbana	Muy bajo	1	2.96

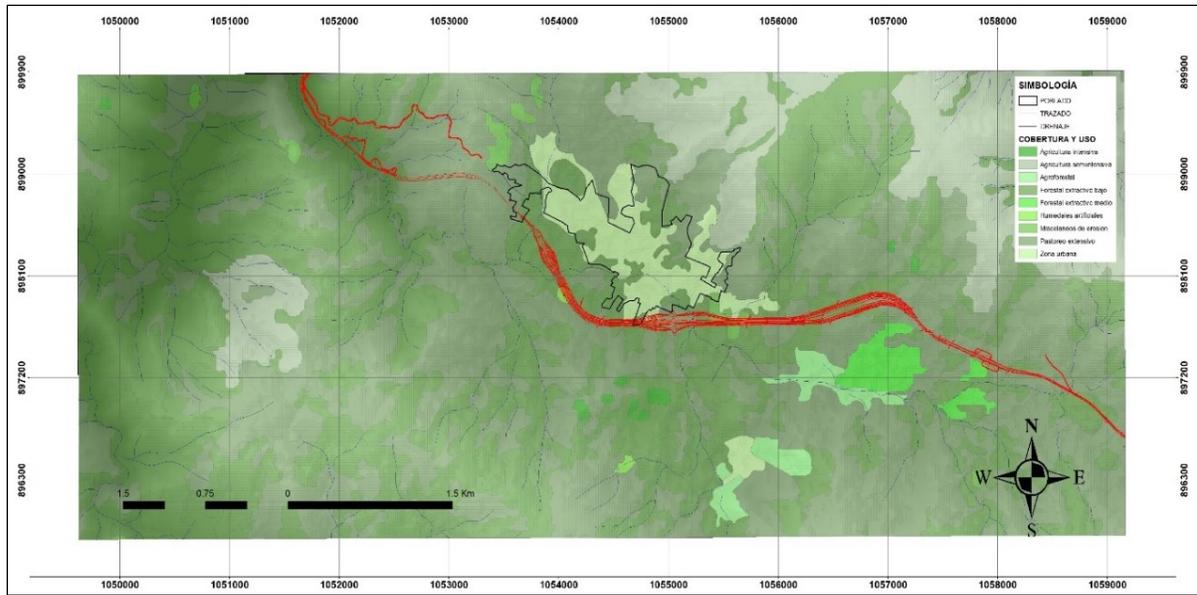


Figura 24 Mapa de coberturas y uso de suelo del área de estudio

Utilizando la metodología propuesta (Matus, 2007), se obtuvo para el área de estudio zonas de recarga baja, moderada y alta, las cuales se presentan en la Figura 25.

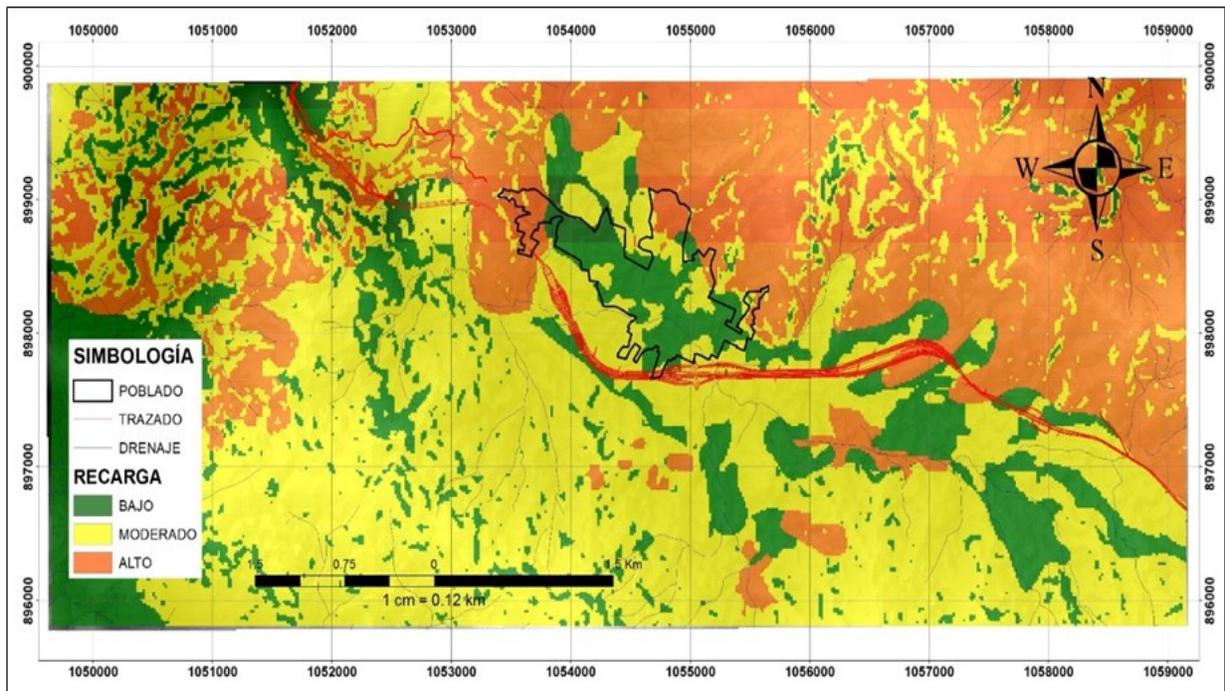


Figura 25 Distribución de las principales zonas de recarga en el área de estudio

La Figura 25 muestra que las zonas de mayor importancia a nivel de recarga se encuentran asociadas a los altos topográficos y en algunos casos a los depósitos asociados a los ríos.

5.3 INVENTARIO PUNTOS DE AGUA

En total se identificaron 59 puntos de agua subterránea, dentro de los cuales 10 se caracterizan como manantiales, 24 aljibes, se identifican 24 piezómetros y un pozo. En general los manantiales reflejan caudales entre 0.15 l/s y 1.9 l/s, excepto el sistema de manantiales que abastecen el acueducto del Corregimiento de Pavas los cuales suman un caudal de 24 l/s. Los aljibes no superan los 25 metros de profundidad y registran niveles estáticos entre 1.12 m y 9.9 m.

Dos piezómetros construidos en zonas adyacentes al sistema de manantiales del acueducto de Pavas son artesianos (saltantes) con niveles de 0.1 m y 0.2 m por encima del nivel del terreno, los demás piezómetros registran niveles estáticos entre 0.6 m y 51.3 m, y tres se encuentran secos. Se registra un pozo con profundidad de 45 m y nivel estático a los 23.02 m. En la Tabla 12 se presentan las principales características de los puntos de agua identificados durante el inventario.

Tabla 12. Característica de los puntos de agua subterránea inventariados.

No.	Tipo de Punto	Identificación	Este	Norte	Cota (msnm)	Profundidad Nivel Estático (m) / Caudal (l/s)	Profundidad (m)
1	Manantial	MN7_AcuPavas	1056453.00	897330.00	1403.0	24.0	-
2	Manantial	M3R-1	1056792.86	896301.21	1440.7	0.2	-
3	Manantial	M4-R	1056997.69	896175.59	1445.3	0.2	-
4	Manantial	MP	1052723.19	898449.14	1377.3	1.9	-
5	Manantial	MP2	1052637.73	898499.08	1358.4	0.3	-
6	Manantial	M10R	1052485.13	898840.15	1319.4	0.8	-

No.	Tipo de Punto	Identificación	Este	Norte	Cota (msnm)	Profundidad Nivel Estático (m) / Caudal (l/s)	Profundidad (m)
7	Manantial	MSECRETA	1056576.57	897052.61	1407.4	0.7	-
8	Manantial	AFLUEPAVAS2	1052324.72	899114.79	1329.8	0.5	-
9	Manantial	M2R	1055865.75	896087.81	1451.2	0.2	-
10	Manantial	MQ	1052673.85	898277.83	1361.0	0.2	-
11	Piezómetro	SPPV-07	1055239.32	897645.19	1390.9	1.8	30.0
12	Piezómetro	SPPV-09	1055208.43	897691.25	1391.6	1.1	30.0
13	Piezómetro	SPPV-05	1055239.27	897731.20	1389.1	3.2	31.0
14	Piezómetro	SPPV-06	1055208.41	897734.25	1391.1	1.3	30.4
15	Piezómetro	SPPV-10	1055177.57	897697.37	1391.4	4.8	30.0
16	Piezómetro	SPPV-08	1055199.20	897642.09	1391.9	0.8	30.0
17	Piezómetro	SPPV-14	1054023.18	898102.21	1382.8	1.3	30.4
18	Piezómetro	SPPV-15	1053998.49	898096.05	1383.3	5.5	30.0
19	Piezómetro	SPPV-16	1053989.24	898077.62	1383.6	4.9	30.0
20	Piezómetro	SPPV-13	1053967.63	898105.25	1383.2	3.7	30.0
21	Piezómetro	SPPV-12	1053976.87	898126.76	1381.9	14.5	30.5
22	Piezómetro	SPPV-11	1054007.71	898169.78	1382.0	3.6	30.0
23	Piezómetro	SPPV-22	1053859.52	898286.42	1381.2	2.6	31.2
24	Piezómetro	SPPV-20	1053890.36	898326.37	1382.4	1.9	30.0
25	Piezómetro	SPPV-18	1053754.47	898525.96	1384.6	3.0	30.0
26	Piezómetro	ST5-01	1053544.51	898719.37	1414.0	44.0	85.0
27	Piezómetro	ST5-02B	1053439.53	898832.97	1436.5	Seco	130.0
28	Piezómetro	ST5-03	1053115.43	898967.95	1477.4	Seco	180.0
29	Piezómetro	ST5-03B	1052905.58	898977.05	1449.3	Seco	180.0
30	Piezómetro	ST5-04	1052677.24	898937.00	1400.8	51.3	80.0
31	Piezómetro	ST4-04B	1052575.38	898967.66	1352.4	38.0	80.0
32	Piezómetro	ST5-05	1052519.83	898986.06	1331.8	25.0	80.0
33	Piezómetro	PZA-1	1056344.27	897375.49	1399.3	-0.2	22.0
34	Piezómetro	PZA-3	1055903.99	897212.26	1393.6	0.6	20.0

No.	Tipo de Punto	Identificación	Este	Norte	Cota (msnm)	Profundidad Nivel Estático (m) / Caudal (l/s)	Profundidad (m)
35	Aljibe	A-1	1053591.05	898258.63	1382.0	2.6	15.4
36	Aljibe	A-2	1053683.52	898461.42	1382.5	3.8	14.3
37	Aljibe	A-3	1054275.99	898532.39	1382.5	1.8	12.2
38	Aljibe	A-4	1054529.10	898440.38	1385.4	1.1	13.6
39	Aljibe	A-5	1054566.35	898034.93	1384.2	2.5	11.4
40	Aljibe	A-6	1055918.27	897593.35	1395.1	2.8	20.8
41	Aljibe	A-7	1054393.64	897838.24	1385.1	1.8	16.3
42	Aljibe	A-8	1056004.48	897955.86	1405.8	10.0	24.1
43	Aljibe	A-9	1054921.63	897325.55	1391.2	1.7	10.6
44	Aljibe	A-10	1054989.46	897445.38	1388.9	1.9	14.8
45	Aljibe	A-11	1056482.85	897888.55	1402.5	3.8	12.8
46	Aljibe	A-12	1057371.86	897477.45	1410.8	3.8	17.3
47	Aljibe	A-13	1057063.27	897452.70	1405.4	2.5	11.3
48	Aljibe	A-14	1055019.93	898145.76	1393.0	2.8	18.6
49	Aljibe	A-15	1057797.88	897222.74	1412.4	8.5	19.4
50	Aljibe	A-17	1054816.19	898271.59	1388.8	3.4	12.5
51	Aljibe	A-18	1055208.55	897485.44	1398.4	2.6	9.2
52	Aljibe	A-19	1054152.89	897911.83	1378.0	2.5	10.3
53	Aljibe	A-20	1057529.20	897569.69	1417.4	2.0	10.3
54	Aljibe	A-21	1055103.69	897359.44	1391.4	1.8	10.0
55	Aljibe	A-22	1054186.44	898633.71	1382.4	2.5	9.2
56	Aljibe	A-23	1054634.33	897881.38	1383.1	1.9	8.9
57	Aljibe	A-24	1054961.30	898145.73	1391.1	6.5	14.1
58	Aljibe	A-25	1053887.08	898676.55	1387.3	1.7	10.4
59	Pozo	PO-1	1054532.69	897512.71	1389.7	23.0	45.0

Con el fin de contar con piezómetros que cumplieran técnicamente para el monitoreo de las aguas subterráneas (IDEAM & INVEMAR, 2017) y de esta manera ampliar el conocimiento sobre el comportamiento del recurso hídrico subterráneo se construyeron nueve (9) piezómetros en el Valle del Río Pavas, para tener un total de 68 puntos de agua subterránea. En la Tabla 13 se presentan las características de ellos piezómetros construidos y en la Figura 26 la localización de los puntos de agua subterránea inventarios en el Valle del Río Pavas.

Tabla 13. Característica de los piezómetros de agua subterránea construidos.

No.	Tipo de Punto	Identificación	Este	Norte	Cota (msnm)	Profundidad Nivel Estático (m) / Caudal (l/s)	Profundidad (m)
1	Piezómetro	PM17_PZ4	1059028.79	896822.28	1421.2	25.5	40.0
2	Piezómetro	PM20_PZ5	1057997.80	897237.81	1406.1	15.4	50.0
3	Piezómetro	PM23_PZ6	1056772.90	897927.84	1400.6	11.4	51.0
4	Piezómetro	PM26_PZ8	1056298.69	897659.49	1387.7	-0.5	47.0
5	Piezómetro	PM27_PZ9	1056228.86	897771.30	1388.4	-0.1	40.0
6	Piezómetro	PM33_PZ11	1053905.27	898371.70	1371.6	1.1	22.0
7	Piezómetro	PM45_PZ14_TUNEL4	1060250.41	896220.48	1534.8	55.8	100.0
8	Piezómetro	PM46_PZ13_TUNEL4	1060485.11	896094.58	1558.1	73.0	150.0
9	Piezómetro	PM47_PZ15_TUNEL5	1053237.48	898969.53	1466.4	Seco	100.0

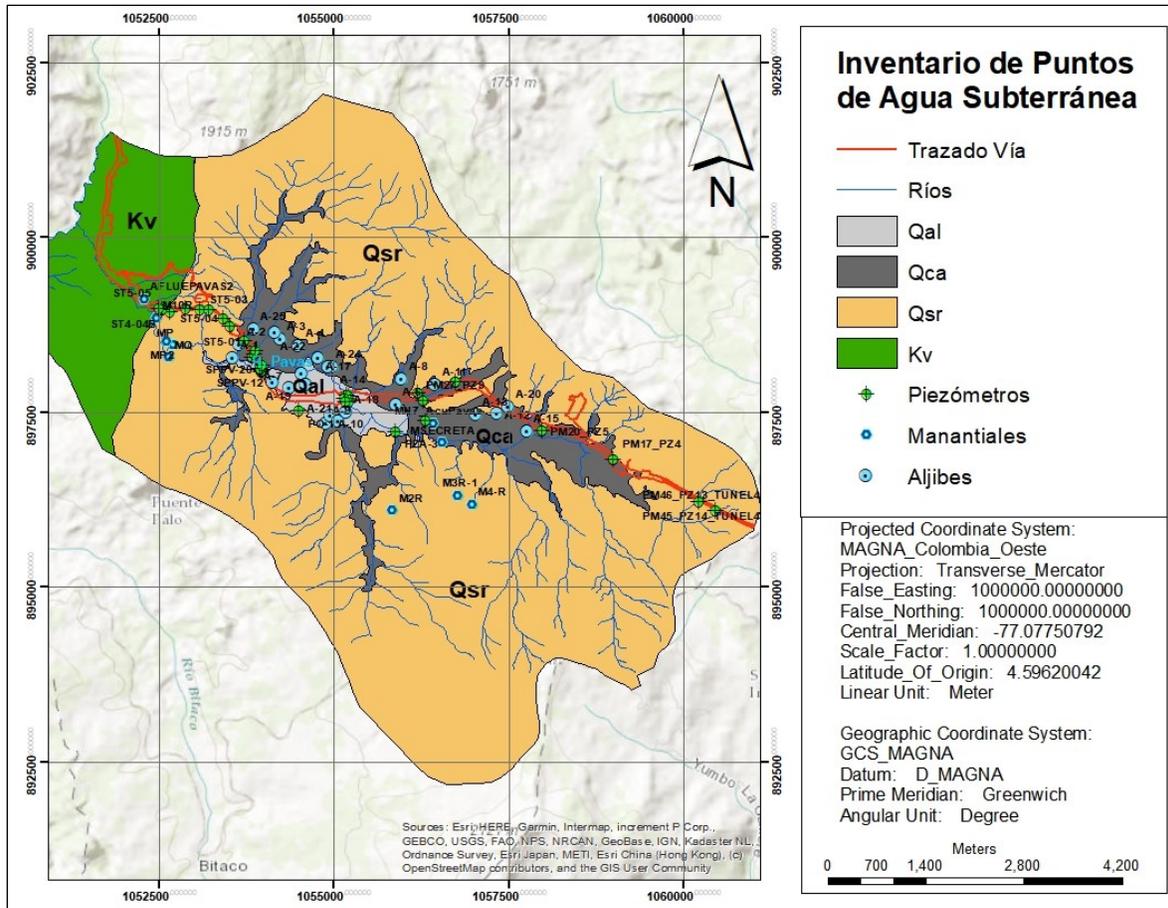


Figura 26. Localización inventario de puntos de agua subterránea.

5.4 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

La caracterización hidráulica se soporta en 22 pruebas hidráulicas, de las cuales 14 son pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación y 8 son pruebas puntuales tipo slug. En la Tabla 14 se presentan las principales características de las captaciones de agua subterránea en las que se realizaron pruebas hidráulicas.

Tabla 14. Característica de las captaciones de agua subterránea y tipos de pruebas hidráulicas.

ID	Coordenadas		Profundidad (m)	Nivel Estático (m)	Diámetro (Pulg)	Tipo de Prueba	Unidad Geológica Captada
	Este	Norte					
SPPV-05	1055239.27	897731.20	30.0	3.18	2.0	Slug Vaciado/ Llenado	Qca
SPPV-10	1055177.57	897697.37	30.0	4.72	2.0	Slug Vaciado/ Llenado	Qca
ST4-05	1059514.11	896581.75	35.6	Seco	1.5	Slug Llenado	Qsr
ST5-02b	1053439.53	898832.97	80.0	Seco	1.5	Slug Llenado	Qsr
ST5-04B	1052575.38	898967.66	80.0	38.00	1.5	Slug Llenado	Qsr
PZA-1	1056344.27	897375.49	23.4	-0.20	2.0	Bombeo	Qca
PZA-3	1055906.14	897218.59	26.8	0.62	2.0	Bombeo	Qca
Pozo PS4	1059148.70	896785.10	28.5	5.70	8.0	Bombeo	Qsr
PZ-4	1055969.00	897163.00	15.0	-0.32	2.0	Bombeo	Qca
PZ-5	1055307.00	897215.00	22.0	-0.08	2.0	Bombeo	Qca
PZ-6	1055494.00	879268.00	28.5	-0.39	2.0	Bombeo	Qca
PO-2	1055211.43	897451.54	32.0	16.00	6.0	Bombeo	Qca
PO-3	1053895.06	897977.92	68.0	11.30	6.0	Bombeo	Qca
A-1	1060691.89	896766.69	13.2	1.70	43.0	Bombeo	Qca
A-2	1054796.75	898254.79	6.4	2.40	35.0	Bombeo	Qca
A-13	1053581.58	899305.62	6.6	2.30	35.0	Bombeo	Qca
PZ-3	1055494.00	879268.00	22.3	1.70	2.0	Bombeo	Qca
PO-5	1055228.72	895707.23	45.7	15.50	6.0	Bombeo	Qca
PZ-1	1057092.27	897778.96	16.8	7.34	2.0	Slug	Qsr
PZ-2	1056506.34	897776.70	20.0	1.46	2.0	Slug	Qsr
ST2-02	1065214.97	895273.66	163.0	Seco	1.5	Slug	Kv
ST4-02	1061641.05	895563.21	127.0	Seco	1.5	Slug	Kv
ST9-05	1048051.79	904399.25	225.0	Seco	1.5	Slug	Kv

Basados en once (11) pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación y dos (2) pruebas de slug de vaciado y llenado, se establecieron las características hidráulicas para los Conos Aluviales (Qca). En los Suelos Residuales (Qsr) se realizaron cinco (5) pruebas slug de llenado y dos pruebas de bombeo los cuales permiten establecer sus parámetros hidráulicos.

Como la Formación Volcánica (Kv) no aflora en la zona de estudio esta unidad se caracteriza a partir de tres (3) pruebas slug realizadas en sectores aledaños la Valle del Río Pavas como lo son Mulaló y La María (Loboguerrero). En las siguientes fotos se presentan algunas pruebas hidráulicas realizadas y en la Tabla 15 se presentan los métodos empleados para la interpretación y los resultados obtenidos por cada unidad geología presente en la zona de estudio.

Foto 13. Piezómetro ST4-02, localizado en portal salida del Túnel 4, sobre Suelos Residuales (Qsr).



Foto 14. Piezómetro ST5-02B, localizado al noroccidente del casco urbano de Pavas, sobre Suelos Residuales (Qsr).



Foto 15. Ejecución de la prueba de bombeo a caudal constante en el PZ-1. sobre Conos Aluviales (Qca).



Foto 16. Piezómetro PZA-3, localizado en el callejón por la parte suroccidente del Acueducto de Pavas, sobre Conos Aluviales (Qca).



Basados en las pruebas hidráulicas realizadas en diferentes captaciones de agua subterránea y las recopiladas en zonas aledañas se pueden caracterizar hidráulicamente las unidades presentes en el Valle del Río Pavas.

La interpretación se realizó mediante los métodos de Theis, Cooper & Jacob, Hvorslev y Cooper-Bredhoeft-Papadopoulos, Neuman, Theis Recovery obteniendo valores promedio de Conductividad Hidráulica, Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento, los cuales se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados de las pruebas hidráulicas ejecutadas en el Valle del Río Pavas.

Unidad Geológica	Espesor saturado (m)	T (m ² /d)	Kxy (m/d)	S	Captación	Método de Interpretación
Conos Aluviales (Qca)	15-20	13.195	7.54E-01	3.48E-04	PZ-4	Theis, Cooper & Jacob
		7.805	4.46E-01	1.13E-04	PZ-5	Theis, Cooper & Jacob, Theis Recovery
		3.675	2.10E-01	-	PZA-3	Theis, Theis Recovery
		15.750	9.00E-01	5.60E-04	PZ-6	Theis

Unidad Geológica	Espesor saturado (m)	T (m ² /d)	Kxy (m/d)	S	Captación	Método de Interpretación
		1.365	7.80E-02	6.37E-05	PZA-1	Theis, Cooper & Jacob, Theis Recovery
		5.810	3.32E-01	3.08E-03	SPPV-05	Hvorslev y Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
		0.011	6.53E-04	4.31E-04	SPPV-10	Hvorslev y Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
		0.742	4.24E-02	6.05E-02	PO-2	Neuman, Theis Recovery
		4.515	2.58E-01	6.00E-02	PO-3	Theis, Theis Recovery
		10.850	6.20E-01	1.38E-02	A-1	Theis, Theis Recovery
		15.225	8.70E-01	4.20E-02	A-2	Theis, Theis Recovery
		14.875	8.50E-01	2.20E-02	A-13	Theis, Theis Recovery
		1.925	1.10E-01	-	PZ-3	Hvorslev
Suelos Residuales (Qsr)	10	0.084	8.40E-03	-	PZ-1	Hvorslev
		0.064	6.40E-03	-	PZ-2	Hvorslev
		0.054	5.40E-03	1.27E-03	ST4-05	Hvorslev
		0.014	1.36E-03	1.85E-03	ST5-02B	Hvorslev
		0.004	3.71E-04	1.86E-03	ST5-04B	Hvorslev
Formación Volcánica (Kv)	5	0.016	3.25E-03	2.77E-06	ST2-02	Hvorslev y Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
		0.002	3.05E-04	2.77E-07	ST4-02	Hvorslev
		0.318	6.36E-02	1.77E-06	ST9-05	Hvorslev y Cooper-Bredehoeft-Papadopulos

Los resultados de las pruebas hidráulicas realizadas en la Formación Volcánica (Kv), arrojaron conductividades hidráulicas con valores entre 6.36E-2 m/d (para la zona de mayor fracturamiento) y de 3.05E-4 m/d (en la zona con bajo grado de fracturamiento), con valores promedio de 2.24E-2 m/d, la Transmisividad (estimando un espesor saturado de 5.0 m) se

encuentra entre 0.318 m²/d y 0.002 m²/d con valor promedio de 0.112 m²/d. El Coeficiente de Almacenamiento promedio es de 1.6E-6.

Los Suelos Residuales (Qsr), se caracterizan por un valor de Conductividad Hidráulica entre 8.40E-3 m/d y 3.71E-4 m/d con un valor promedio de 4.39E-3 m/d, una Transmisividad entre 0.084 m²/d y 0.004 m²/d (con un espesor saturado de 10 m), con valores promedio de 0.044 m²/d y un Coeficiente de Almacenamiento de 1.66E-3.

Los Conos Aluviales (Qca), presentan valores de Conductividad Hidráulica entre 9.0E-1 m/d y 6.35E-4 m/d, una Trasmisividad entre 15.75 m²/d y 0.011 m²/d (con espesor saturado de 17.5 m) y un Coeficiente de Almacenamiento entre 6.05E-2 y 4.50E-6.

5.5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA

Previo a la toma de muestras y su posterior análisis por parte del laboratorio AGQLabs, se realizó la purga de las captaciones subterráneas cuyos resultados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Características registradas durante la purga de las captaciones subterráneas.

ID	Diam (m)	Prof (m)	NE (m)	V.A (m ³)	V.R (m ³)	ND (m)	pH			CE μS/cm			T °C			NE Muestra (m)	Rec (%)
							Unidades										
PM1_PZ1	0.10	62.0	24.56	0.30	0.25	33.70	7.25	7.28	7.19	852	852	855	24.40	24.40	24.30	24.65	99
PM3_ALJ1	0.65	14.6	6.03	2.84	2.22	13.20	7.42	7.40	7.49	681	682	682	24.78	24.68	24.78	6.16	98
PM4_ALJ2	0.84	12.8	1.90	6.04	4.55	6.40	7.41	7.44	7.39	660	663	660	24.54	24.54	24.54	2.10	96
PM6_PZ2	0.05	42.0	0.00	0.09	0.06	2.40	7.81	7.84	7.79	654	652	658	24.36	24.36	24.36	0.00	100
PM11_PZ3	0.05	27.0	6.54	0.04	0.05	18.50	7.67	7.67	7.72	541	542	537	24.16	24.46	24.11	6.79	98
PM17_PZ4	0.10	40.0	20.14	0.16	0.20	38.12	5.55	5.62	6.57	44	48	45	22.41	22.41	22.41	20.29	99
PM20_PZ5	0.10	50.0	13.02	0.30	0.23	32.70	6.38	6.36	6.37	476	473	479	23.35	23.35	23.38	13.73	96
PM21_ALJ3	1.90	10.8	6.83	11.26	8.00	8.62	6.91	6.83	6.89	273	272	275	21.78	21.78	21.72	7.10	85
PM22_ALJ4	1.00	15.0	1.56	10.56	8.10	10.45	6.52	6.59	6.61	515	518	518	22.57	22.56	22.51	1.72	98
PM23_PZ6	0.10	51.0	9.31	0.34	0.26	34.70	6.67	6.61	6.65	313	311	312	23.03	23.03	23.11	9.48	99
PM25_PZ7	0.05	22.0	-0.86	0.05	0.03	18.80	7.90	7.96	7.89	161	165	164	22.89	22.89	22.97	-0.93	100
PM26_PZ8	0.10	47.0	-0.96	0.39	0.28	17.50	7.50	7.48	7.49	370	372	368	23.12	23.12	23.12	-1.03	100

ID	Diam (m)	Prof (m)	NE (m)	V.A (m ³)	V.R (m ³)	ND (m)	pH			CE μS/cm			T °C			NE Muestra (m)	Rec (%)
							Unidades										
PM27_PZ9	0.10	40.0	-0.13	0.33	0.25	18.80	7.53	7.55	7.60	271	269	269	23.23	23.28	23.31	-0.18	100
PM29_PZ10	0.05	20.0	0.27	0.04	0.03	12.60	7.56	7.56	6.61	48	45	50	21.12	21.12	21.19	0.20	101
PM30_ALJ5	1.10	20.8	1.15	18.67	8.70	15.05	6.66	6.62	6.74	403	404	400	22.76	22.76	22.76	1.27	99
PM32_ALJ6	0.08	65.0	21.80	0.20	0.14	40.50	5.90	5.91	5.90	165	166	160	22.65	22.59	22.57	22.60	96
PM33_PZ11	0.10	22.0	0.61	0.17	0.12	15.80	6.78	6.81	6.86	583	583	581	23.76	23.76	23.76	0.58	100
PM45_PZ14 TUNEL4	0.05	100.0	53.89	0.09	0.07	80.45	7.27	7.32	7.35	234	238	234	20.06	20.06	20.06	54.63	97
PM46_PZ13 TUNEL4	0.05	150.0	68.98	0.16	0.12	84.96	7.38	7.47	7.42	430	432	433	20.12	20.13	20.27	69.59	96
PM42_PZ12	0.05	27.0	6.12	0.04	0.03	14.67	7.59	7.69	7.66	521	522	518	25.56	25.56	25.56	5.60	106

Diam: Diámetro; Prof: Profundidad; NE: Nivel Estático; ND: Nivel Dinámico; CE: Conductividad Eléctrica; T: Temperatura; Rec: Recuperación

Foto 17. Toma del nivel estático antes de la purga en el piezómetro PM46_PZ13_TUNEL4



Foto 18. Purga mediante baldeo empleando bailer en el piezómetro PM17_PZ4.



Foto 19. Purga mediante bombeo en el Aljibe PM22_ALJ4.



Foto 20. Purga mediante bombeo en el piezómetro PM26_PZ8.



Teniendo en cuenta los diferentes planteamientos para establecer una red de monitoreo hidrogeológica, se eligieron diez (10) piezómetros, cuatro (4) aljibes, cinco (5) manantiales, cinco (5) puntos en corrientes superficiales y tres (3) muestras de agua lluvia, para realizar el análisis hidrogeoquímico del Valle del Río Pavas. De los veintisiete puntos que se seccionaron para el análisis hidrogeoquímico se eligieron doce (12) puntos y se incluyó otra muestra de agua lluvia para análisis isotópico. En la Tabla 17 se presentan los puntos seleccionados y su localización se presenta en la Figura 27.

Tabla 17. Puntos seleccionados para el muestreo hidrogeoquímico e isotópico.

Tipo de Captación	Identificación del punto	Este	Norte	Tipo de análisis
Piezómetro	PM17_PZ4	1059028.79	896822.28	Fisicoquímico e Isotopos
Piezómetro	PM20_PZ5	1057997.80	897237.81	Fisicoquímico
Piezómetro	PM23_PZ6	1056772.90	897927.84	Fisicoquímico e Isotopos
Piezómetro	PM25_PZ7	1056342.64	897374.55	Fisicoquímico
Piezómetro	PM26_PZ8	1056298.69	897659.49	Fisicoquímico e Isotopos
Piezómetro	PM27_PZ9	1056228.86	897771.30	Fisicoquímico
Piezómetro	PM29_PZ10	1055903.99	897212.26	Fisicoquímico
Piezómetro	PM33_PZ11	1053905.27	898371.70	Fisicoquímico e Isotopos

Tipo de Captación	Identificación del punto	Este	Norte	Tipo de análisis
Piezómetro	PM45_PZ14_TUNEL4	1060250.41	896220.48	Fisicoquímico e Isotopos
Piezómetro	PM46_PZ13_TUNEL4	1060485.11	896094.58	Fisicoquímico
Aljibe	PM21_ALJ3	1057794.95	897222.86	Fisicoquímico
Aljibe	PM22_ALJ4	1057059.81	897450.75	Fisicoquímico
Aljibe	PM30_ALJ5	10559912.70	897592.69	Fisicoquímico
Aljibe	PM32_ALJ6	1054470.40	897519.05	Fisicoquímico
Manantial	PM24_MN7_AcuPavas	1056439.72	897333.70	Fisicoquímico e Isotopos
Manantial	PM34_MN8	1052679.46	898277.23	Fisicoquímico
Manantial	PM35_MN9	1052485.33	898840.32	Fisicoquímico
Manantial	PM36_MN10	1052334.98	899145.94	Fisicoquímico
Manantial	PM44_MN11_AcuParraga	1052721.72	898453.67	Fisicoquímico e Isotopos
Superficial	PM18_Q6_Timbío	1058165.00	897114.00	Fisicoquímico
Superficial	PM19_R1_Pavas	1057863.24	896234.77	Fisicoquímico
Superficial	PM28_R2_Pavas	1056127.00	897185.00	Fisicoquímico e Isotopos
Superficial	PM31_Q7_Cordobitas	1055267.00	896833.00	Fisicoquímico e Isotopos
Superficial	PM37_R3_Pavas	1052134.00	899133.00	Fisicoquímico
Lluvia	MA_02_La Primavera_La Cumbre	1057187.18	896121.73	Fisicoquímico e Isotopos
Lluvia	MA_01_El Porvenir_Cresta de gallo	1060502.45	896076.55	Fisicoquímico e Isotopos
Lluvia	MA_03_Santafe_La Pinera	1058133.74	897415.28	Fisicoquímico e Isotopos
Lluvia	MA_04 Túnel 5_Morales	1053587.31	898681.61	Isotopos

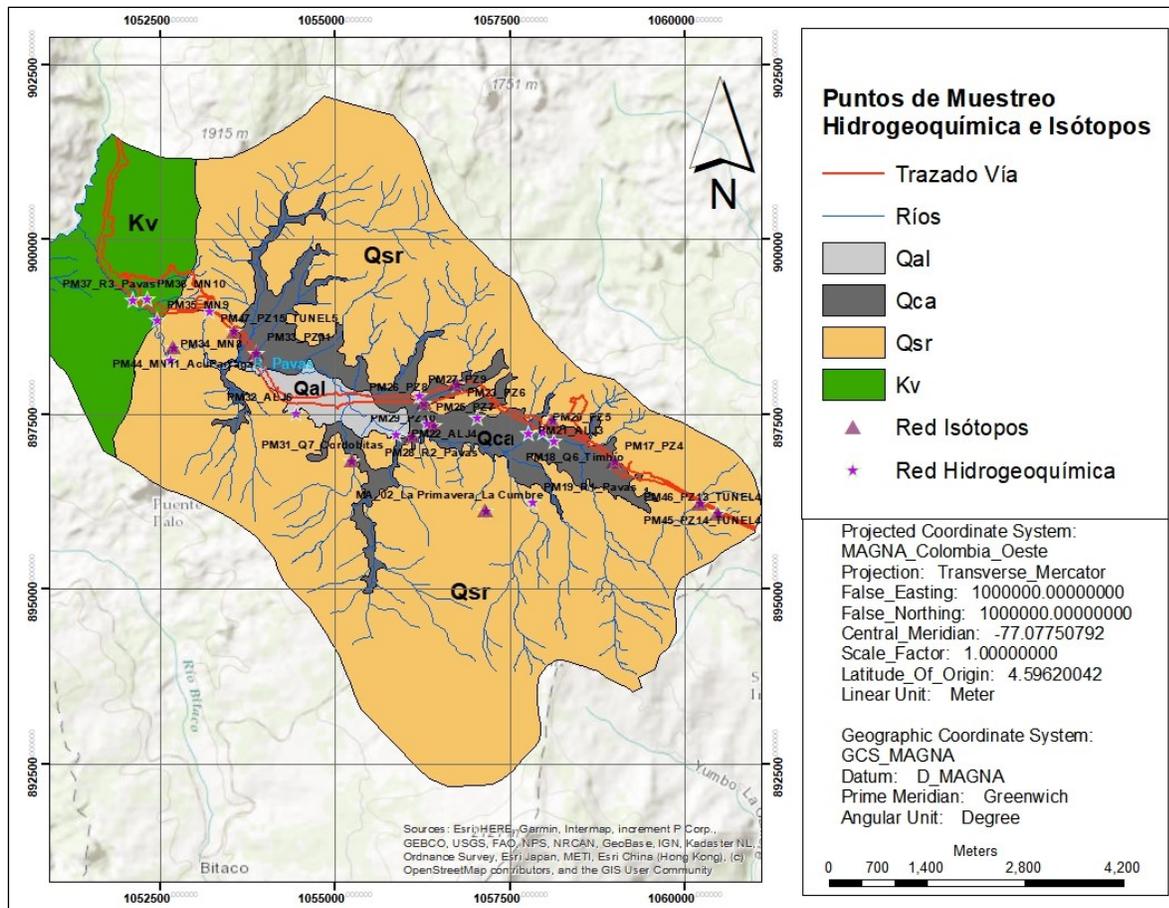


Figura 27. Localización de los puntos a muestrear.

5.5.1 Hidrogeoquímica

Con las muestras obtenidas para la temporada seca, se llevó a cabo un análisis fisicoquímico y microbiológico a cargo del laboratorio AGQLabs, realizando el análisis de los parámetros presentados en la Tabla 18.

Tabla 18. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos para las muestras de agua

Parámetro	PNT	Técnica	Rango
Mediciones In Situ			
Conductividad Eléctrica <i>In Situ</i> Medido MA	SM 2510 B	Electrometría	0,33 - 40.000 μ S/cm
Oxígeno Disuelto <i>In Situ</i> Medido MA	SM 5210 B / ASTM D-888- 12	Electrometría	0,020 - 20,0 mg/L
pH In Situ Medido MA	SM 4500 H+B	Electrometría	1,0 - 14 Unidades de pH
Temperatura <i>In Situ</i> Medido MA	SM 2550 B	Electrometría	0,20 - 80,0 °C
Parámetros Fisicoquímicos			
Aceites y Grasas	SM 5520 C	Espect FTIR	4,0 - 20.000 mg/L
Acidez Total	SM 2310 B	Volumetría	5,00 - 1.000 mg/L CaCO ₃
Alcalinidad Total	SM 2320 B	Calculado	5,00 - 1.000 mg/L CaCO ₃
Bicarbonatos	SM 2320 B	Calculado	5,00 - 1.000 mg/L CaCO ₃
Carbonatos	SM2320B Cálculo	Calculado	5,00 - 1.000 mg/L
Dureza Cálcica	SM 3500 Ca-B	Titrición	5,00 - 1.000 mg/L
Dureza Total	SM 2340 C	Volumetría	5,00 - 1.000 mg/L
Sólidos Totales Disueltos	SM 2540 C / 180°C	Gravimetría	10,00 - 20.000 mg/L
Aniones			
Cloruros	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica	0,70 - 100 mg/L
Fosfatos	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica	0,100 - 1,00 mg/L
Nitratos	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica	0,30 - 7,0 mg/L

Parámetro	PNT	Técnica	Rango
Nitritos	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica	0,030 - 0,200 mg/L
Sulfatos	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica	0,800 - 100 mg/L
Metales Totales			
Calcio Total	EPA 200.7	ICP-OES	1,00 - 20,0 mg/L
Hierro Total	EPA 200.7	ICP-OES	0,100 - 2,00 mg/L
Magnesio Total	EPA 200.7	ICP-OES	1,00 - 20,0 mg/L
Manganeso Total	EPA 200.7	ICP-OES	0,0700 - 2,000 mg/L
Potasio Total	EPA 200.7	ICP-OES	4,00 - 50,0 mg/L
Sodio Total	EPA 200.7	ICP-OES	4,00 - 50,0 mg/L
Microbiología			
Coliformes Fecales por NMP	SM 9221 E	Tubos Múltiples	1,80 - 1,60 x 10 ¹¹ NMP/100mL
Coliformes Totales por NMP	SM9221B Modificado	Tubos Múltiples	1,80 - 1,60 x 10 ¹¹ NMP/100mL
Escherichia coli	SM9221F Modificado	Tubos Múltiples	1,90 - 100.000.000.000 NMP/100mL
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales	SM 5520 C,F	Espect FTIR	4,000000 - 20.000,0 mg/L

Los resultados de laboratorio de presentan en el Anexo A.

5.5.2 Isotopos

El uso de isótopos ambientales para el análisis del agua subterránea, ofrece información única y complementaria frente al origen y movimiento del agua subterránea y sus constituyentes

disueltos, además de permitir una evaluación cuantitativa de la mezcla y otros procesos físicos como la evaporación y el intercambio isotópico en sistemas geotérmicos (Geyh *et al.*, 2001).

El análisis de los isotopos estables del agua: oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$) y deuterio (δD) fue realizado por el UW-EIL (*Environmental Isotope Laboratory of Waterloo University*), los cuales representan la temporada seca de la zona de estudio. Los resultados se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados de los análisis isotópicos para las muestras de agua

Punto de Muestreo	Fecha	Resultado $\delta^{18}\text{O}$	Resultado δD
		VSMOW \pm 0.2‰	VSMOW \pm 0.8‰
Pm17_pz4	7/01/2020	-10.88	-76.60
Pm23_pz6	8/01/2020	-11.15	-80.43
Pm24_mn7_AcuPavas	7/01/2020	-10.61	-71.48
Pm26_pz8	7/01/2020	-10.15	-73.42
Pm28_R2_pavas	9/01/2020	-10.14	-70.22
Pm31_Q7_cordobitas	8/01/2020	-9.66	-68.00
Pm33_pz11	8/01/2020	-10.05	-71.25
Pm44_mn11_acuparraga	9/01/2020	-10.26	-73.37
Pm45_pz14tunel 4	7/01/2020	-10.78	-73.92
MA_02_La Primavera_La Cumbre	30/12/2019	-5.62	-36.40
MA_01_El Porvenir_Cresta de gallo	2/01/2020	-9.64	-70.11
MA_03_Santafe_La Pinera	2/01/2020	-5.62	-36.70
MA_04 Túnel 5_Morales	7/01/2020	-6.20	-37.87
Pm24_mn7_AcuPavas (Duplicado)	7/01/2020	-10.45	-71.91

Los resultados se presentan en el Anexo B.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Basados en la información recopilada en relación con la geología, la hidrología, la hidráulica la cual es fundamental en trabajos de investigación (Hernandez Sampieri *et al.*, 2010) y el complemento mediante el muestreo hidrogeoquímico e isotópico se procedió a realizar el análisis y definición de las Unidades Hidrogeológicas y con el análisis hidrogeoquímico e isotópico se estableció el comportamiento hidrogeológico en la cuenca del Río Pavas, para finalmente elaborar el Modelo Hidrogeológico Conceptual.

6.1 DEFINICIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS Y POTENCIAL ACUÍFERO

La definición de las unidades hidrogeológicas para la cuenca del Río Pavas, se basa en el análisis geológico y estructural de las unidades presentes, como también en la evaluación de los resultados del inventario de captaciones de aguas subterráneas, las correlaciones geológicas, la hidrología y en los resultados de las pruebas hidráulicas.

Siguiendo los lineamientos planteados por la Asociación Internacional de Hidrogeología (IAH, 1995) las unidades hidrogeológicas del área del proyecto se clasifican teniendo en cuenta el tipo de porosidad que caracteriza los sedimentos y rocas, así como capacidad acuífera (según su capacidad específica).

Para la cuenca del Río Pavas se definen tres unidades hidrogeológicas:

- A.2. Acuíferos moderadamente productivos, sistemas de acuíferos discontinuos o locales.
- C.1. Acuíferos menores con limitado recurso de agua subterránea, sistemas locales.
- C.2. Estratos o rocas sin recurso de agua subterránea.

En la Tabla 20, se presenta la clasificación de las unidades hidrogeológicas y sus principales características litológicas e hidráulicas.

Tabla 20. Clasificación de unidades hidrogeológicas

Clasificación IAH	Unidad Estratigrafía	Litología	K (m/d)	S	
A. Rocas y sedimentos con flujo esencialmente intergranular					
A.1.	Acuíferos con una alta productividad, sistemas de acuíferos continuos.				
A.2.	Acuíferos moderadamente productivos, sistemas de acuíferos discontinuos o locales.	Conos Aluviales (Qca)	Depósitos constituidos por capas de arenas finas a gruesas y limos, hacia la base se pueden encontrar gravas finas a medias embebidas en limos arenosos. Se encuentran cubiertos por una capa de arcillas asociadas a la erosión de los Suelos Residuales, en el sector oriental del valle. Espesor entre 25 y 30 m.	5.45E-01	2.71E-04
		Depósitos Aluviales (Qal)	Depósitos no consolidados asociados al Río Pavas, constituido por bloques y cantos de roca de la Formación Volcánica, con presencia de arcillas y arenas finas. Espesor entre 10 y 15 m	-	-
B. Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas, incluidos los acuíferos kársticos.					
B.1.	Acuíferos altamente productivos, sistemas de acuíferos continuos.				

Clasificación IAH		Unidad Estratigrafía	Litología	K (m/d)	S
B.2.	Acuíferos moderadamente productivos, sistemas de acuíferos discontinuos o locales.				
C. Rocas y sedimentos con limitado recurso de agua subterránea o estratos esencialmente sin recursos de agua subterránea					
C.1.	Acuíferos menores con limitado recurso de agua subterránea (acuitardo), sistemas locales.	Formación Volcánica (Kv) Moderadamente Fracturado	Lava basáltica, diques de diabasa, cantidades menores de brecha volcánica, y horizontes de rocas sedimentarias silíceas con un fracturamiento de carácter local moderado. Espesor 5.0 m en promedio.	6.36E-02	2.77E-06
		Suelos Residuales (Qsr)	Principalmente compuesto por limos y arcillas casi impermeable. En algunas zonas se presentan arenas y limos. Espesor entre 10 y 30 m.	4.39E-03	1.66E-03
C.2.	Estratos o rocas sin recurso de agua subterránea (acuicludos).	Formación Volcánica (Kv) Roca Sana	Lava basáltica, diques de diabasa, cantidades menores de brecha volcánica muy consolidada y compactas. Constituye el basamento hidrogeológico.	3.05E-04	2.77E-07
K (m/d): Conductividad Hidráulica; S: Coeficiente de Almacenamiento.					

6.1.1 Rocas y Sedimentos con Flujo Esencialmente Intergranular (A.2.)

Dentro de la unidad hidrogeológica A.2. se encuentran los acuíferos con una porosidad primaria (intergranular), producción moderada y de carácter local. Pertenecen a esta clasificación los Conos Aluviales (Qca) y los Depósitos Aluviales (Qal).

Los Conos Aluviales (Qca) constituidos principalmente por intercalaciones de arenas, limos y arcillas y en el fondo gravas medias a gruesas permiten transmitir y almacenar aguas subterráneas. Basados en las características de surgencia y en los valores de conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, se define que esta unidad presenta un comportamiento de tipo confinado al oriente del valle y al occidente se comporta como libre.

El acuífero confinado desarrolla una Transmisividad de $9.53 \text{ m}^2/\text{día}$ (asumiendo un espesor saturado de 17.5 m), una Conductividad Hidráulica promedio de $5.45\text{E}-01 \text{ m/día}$ y un Coeficiente de Almacenamiento de $2.71 \text{ E}-04$. En la zona que se comporta como acuífero libre la Transmisividad es de $6.64 \text{ m}^2/\text{día}$ (asumiendo un espesor saturado de 17.5 m), una Conductividad Hidráulica de $3.79 \text{ E}-01 \text{ m/día}$, con un Coeficiente de Almacenamiento de $2.52 \text{ E}-02$.

Los Depósitos Aluviales (Qal), asociados al Río Pavas y los cuales se presentan en la margen suroccidental al final del valle, dada su composición litológica donde predominan las arenas y gravas se clasifica como un acuífero de tipo libre.

6.1.2 Rocas y sedimentos con limitado recurso de agua subterránea (C.1.)

Esta unidad hidrogeológica (C.1.) agrupa las rocas o sedimentos con limitado recurso de agua subterránea, por lo cual la conforman los Suelos Residuales (Qsr), dada su composición litológica donde predominan los limos arcillosos y arcillas producto de la meteorización de la roca volcánica. En algunas zonas se pueden presentar arenas, limos y fragmentos de roca embebidos en saprolito.

Los Suelos Residuales ocupan la mayoría del área de estudio puede llegar a desarrollar un espesor de hasta 30.0 m, siendo en las zonas de ladera o la parte alta de las colinas donde su espesor es menor y donde puede estar en contacto con algunas zonas de fracturamiento de la roca volcánica permitiendo la recarga de agua precipitada.

Se caracteriza por tener una Conductividad Hidráulica de $4.39 \text{ E-}03 \text{ m/día}$, un Coeficiente de Almacenamiento $1.66 \text{ E-}3$ y una Transmisividad de $4.39 \text{ E-}02 \text{ m}^2/\text{día}$ calculada con un espesor saturado de 10 metros, dadas sus propiedades hidráulicas su comportamiento hidrogeológico es de acuitardo de extensión regional y continuo de tipo confinado a semi-confinado.

Dentro de esta unidad hidrogeológica también se clasifican las rocas de la Formación Volcánica (Kv) con un moderado grado de fracturamiento, las cuales permiten la recarga del agua precipitada en las partes altas donde aflora. Presenta una Conductividad Hidráulica de 6.36 m/d y un Coeficiente de Almacenamiento de $2.77\text{E-}06$, con un comportamiento de acuitardo.

6.1.3 Rocas y sedimentos con limitado recurso de agua subterránea (C.2.)

La unidad hidrogeológica C.2., está conformada por rocas o sedimentos sin recurso de agua subterránea, dentro de la que se clasifica la Formación Volcánica (Kv), con bajo a nulo grado de fracturamiento. Hidrogeológicamente constituye el basamento hidrogeológico, dado su característica impermeable donde presenta bajo a nulo fracturamiento. Sus valores promedios de Conductividad Hidráulica son de $3.05\text{E-}04 \text{ m/día}$ y un Coeficiente de Almacenamiento de $2.77\text{E-}07$.

Basados en la definición de las unidades hidrogeológicas se elabora el mapa hidrogeológico de la zona de estudio, el cual busca simplemente obtener una visión global de la potencialidad de

las unidades hidrogeológicas en cuanto al almacenamiento de agua subterránea, la dinámica de su recarga y tránsito. Ver Figura 28.

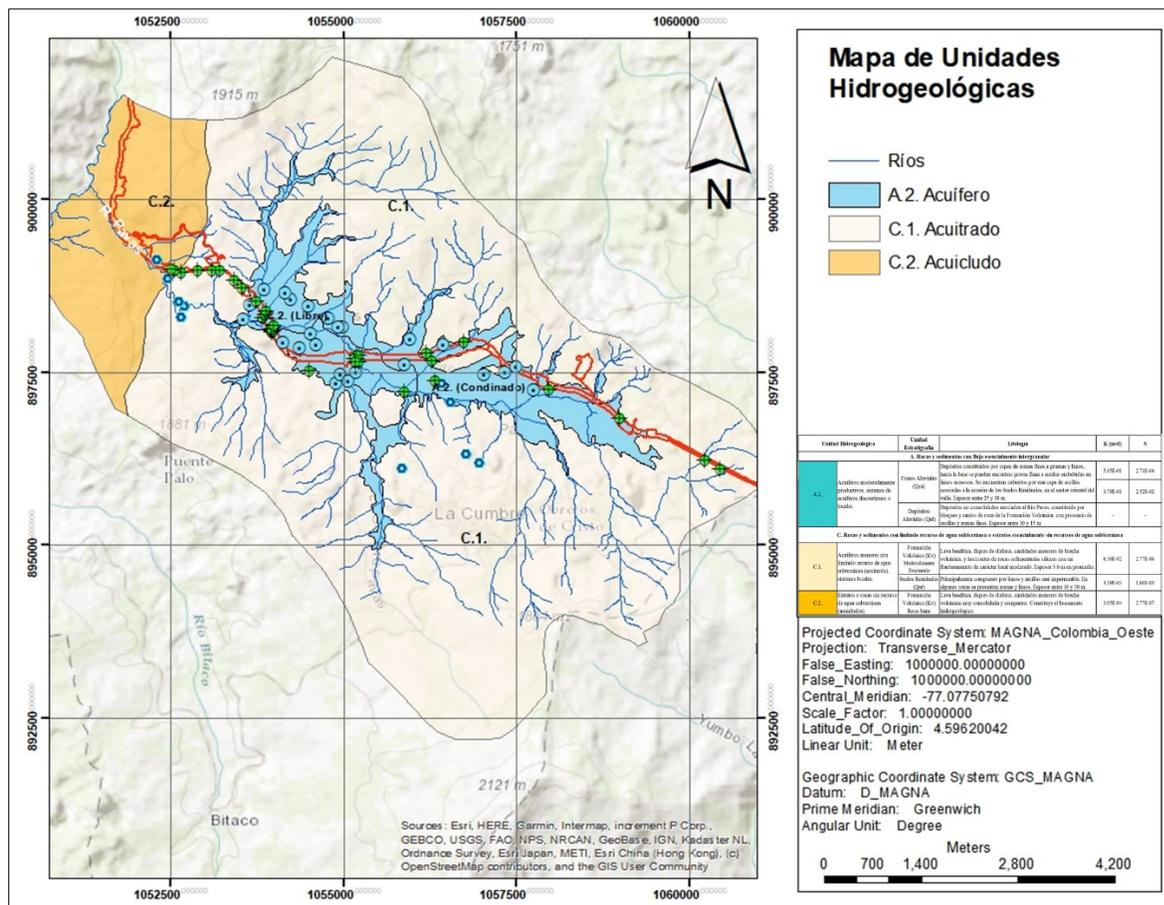


Figura 28. Mapa hidrogeológico para la cuenca del Río Pavas

6.1.4 Sistemas de flujo subterráneo

Con base en los niveles estáticos registrados durante los trabajos de campo se elaboró el mapa de isopiezas para la unidad hidrogeológica A.2., la cual representa el único acuífero en la cuenca del Río Pavas, base para la elaboración de la red de flujo de aguas subterráneas. (Ver Figura 29)

Los flujos de agua subterránea se clasifican en:

- Flujos de escala local: Estos flujos son poco profundos y están localizados en las cuencas hidrográficas que coinciden con las zonas de recarga de los acuíferos. Los recorridos de los flujos del agua subterránea son del orden de decenas de metros, nunca excediendo 1 km. Los flujos de escala local son dominantes y representan la mayor parte del flujo de agua subterránea en el área de estudio de la cuenca del Río Pavas.

- Flujos de escala intermedia: Estos flujos están asociados con sistemas de aguas subterráneas más profundas. Los recorridos de aguas subterráneas son típicamente del orden de cientos de metros a varios kilómetros nunca excediendo los 10 km. Los flujos de escala intermedia no están presentes dado las características de acuitardo y acuicludo de las unidades hidrogeológicas presentes en esas profundidades.

- Flujos de escala regional: Se considera que estos son característicos de los sistemas acuíferos de escala regional, donde los recorridos del flujo de agua subterránea pueden superar varias decenas de kilómetros de longitud. No hay flujos de aguas subterráneas de esta naturaleza en el área estudiada de la cuenca del Río Pavas debido a los tipos de acuíferos presentes, con una prevalencia de descarga proveniente de aguas subterráneas locales.

- Flujos geotérmicos: En el área del proyecto no se observan manantiales con temperatura elevada (agua termal) ni pozos artesianos con altos contenidos de minerales y temperaturas elevadas.

Los flujos de agua subsuperficiales son dominantes en los depósitos aluviales, coluviales y suelos residuales presentes en el área hidrogeológica estudiada, se consideran de importancia ya que corresponde a agua lluvia que se infiltra temporalmente al suelo y vuelve a manifestarse en la superficie a manera de nacederos por un cambio en la pendiente del terreno o en la permeabilidad del suelo. Estos flujos no alcanzan el nivel freático, pero se comportan como un recurso temporal que puede aportar flujo subsuperficial a los cauces superficiales.

En la Figura 29 se observa que los flujos del agua subterránea en la unidad hidrogeológica A.2., presentan una dirección general al noroccidente, siguiendo la dirección de la principal corriente superficial en el Valle del Río Pavas. Se observa que algunos flujos proceden de la vertiente norte (sector la pinera) y la vertiente sur (sector La Cumbre). Dada su profundidad y comportamiento representan flujos locales.

Dado que no se cuenta con información sobre los Suelos Residuales (Qsr), se infiere que los flujos subterráneos en la unidad hidrogeológica que los representa (C.1.), presentan una dirección siguiendo la topografía en dirección al valle.

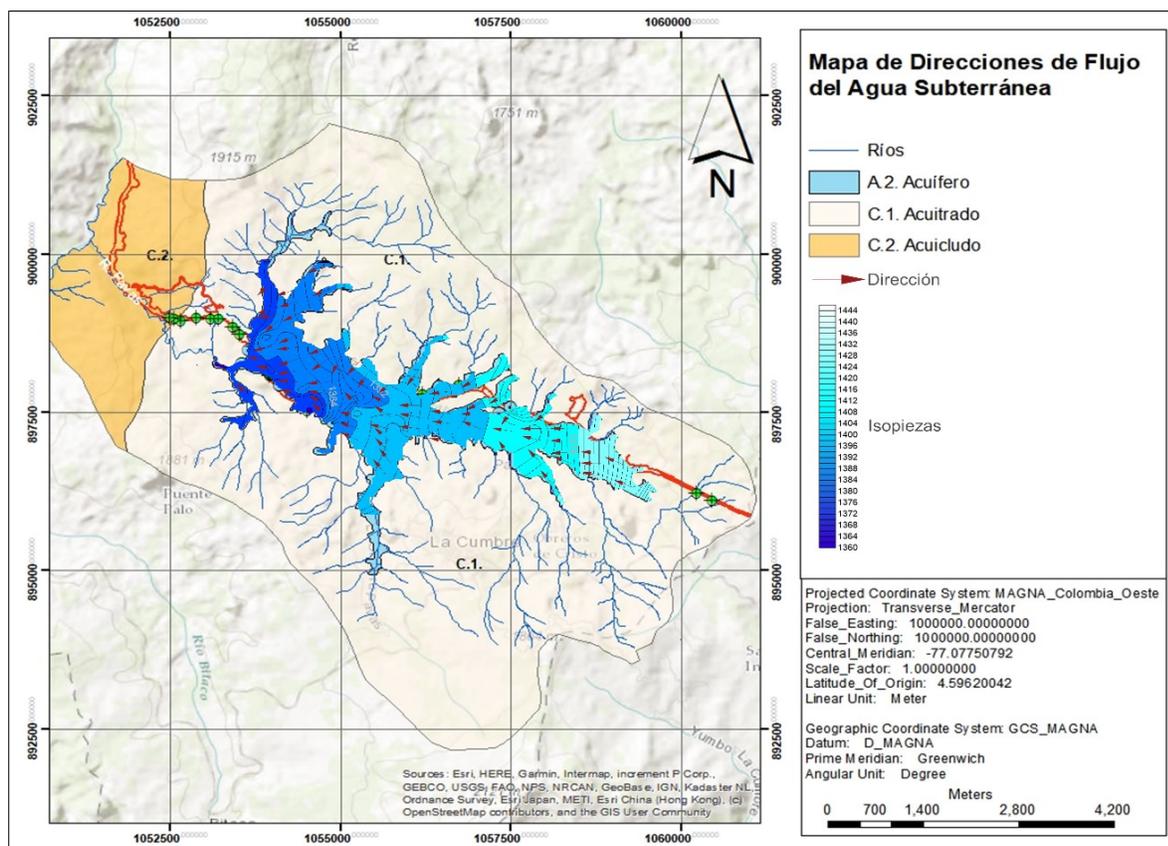


Figura 29. Mapa de direcciones de flujo para la unidad hidrogeológica A.2.

6.2 ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO

Con base en los análisis de laboratorio de las muestras tomadas se realiza la caracterización hidrogeoquímica e isotópica para la cuenca del Río Pavas.

6.2.1 Caracterización Hidrogeoquímica

Mediante la realización del balance iónico (%CBE, por sus siglas en inglés: *percent charge-balance error*) se validaron los reclutados de las muestras presentado por el laboratorio. El balance iónico consiste en el cálculo porcentual de las diferencias entre los cationes y los aniones (Fritz, 1994; Murray & Wade, 1996), que de acuerdo a Freeze & Cherry (1979) es definida como:

$$\%CBE = \left| \frac{\sum z \cdot m_c - \sum z \cdot m_a}{(\sum z \cdot m_c + \sum z \cdot m_a)} \cdot 100\% \right|$$

Donde:

z: valor absoluto de la carga del ion

m_c y m_a: Concentraciones en meq-g/L de cationes y aniones

Se aceptan muestras que cuyo error analíticos sea de ± 10%, ya que es un error aceptable dadas las técnicas y determinación de parámetros en el laboratorio, así como por los valores medios de la conductividad eléctrica, acorde a lo establecido por Custodio & Llamas (1983). (Ver Tabla 21).

Tabla 21. Error admisible para análisis de muestras de agua

ECw (μS/cm)	50	200	500	2000	>2000
%CBE (%)	30	10	8	4	4

Fuente: Custodio & Llamas (1983)

De la aplicación del %CBE, se encuentra que el 100% de las muestras presentan errores menores al 10% ($(|\%CBE|) = 5.8 \pm 2.7 \%$).

Tabla 22. Balance iónico para los datos fisicoquímicos obtenidos de los puntos de muestreo obtenidos en la primera campaña

Punto de Muestreo	%CBE	Punto de Muestreo	%CBE	Punto de Muestreo	%CBE
PM21_ALJ3	7.4%	PM35_MN9	4.2%	PM29_PZ10	4.1%
PM22_ALJ4	9.4%	PM36_MN10	9.2%	PM33_PZ11	4.0%
PM30_ALJ5	3.2%	PM44_MN11_AcuP arraga	6.9%	PM45_PZ14_TUNE L4	3.0%
PM32_ALJ6	9.9%	PM17_PZ4	2.4%	PM46_PZ13_TUNE L4	9.8%
MA_01_El Porvenir_Cresta de gallo	4.9%	PM20_PZ5	9.7%	PM18_Q6_Timbío	3.2%
MA_02_La Primavera_La Cumbre	8.8%	PM23_PZ6	5.4%	PM19_R1_Pavas	5.7%
MA_03_Santafe_La Pinera	7.6%	PM25_PZ7	5.2%	PM28_R2_Pavas	0.1%
PM24_MN7_2_Acu Pavas	1.9%	PM26_PZ8	6.2%	PM31_Q7_Cordobit as	8.7%
PM24_MN7_AcuPa vas	6.2%	PM27_PZ9	6.3%	PM37_R3_Pavas	3.2%
PM34_MN8	5.7%	Promedio		$5.8 \pm 2.7 \%$	

6.2.1.1 Análisis Exploratorio de los Datos

Para las muestras de agua subterránea y agua superficial se realizó un análisis exploratorio de los datos, excluyendo las muestras de agua lluvia (MA_01_El Porvenir_Cresta de gallo, MA_02_La Primavera_La Cumbre y MA_03_Santafe_La Pinera). En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 23. Análisis exploratorio de las muestras de agua subterránea, superficial y lluvia tomadas en el área de estudio

Var.	n	\bar{x}	SD	skew	Var.	n	\bar{x}	SD	skew
pH	25	6.99	0.56	-0.64	CO ₃ ²⁻	25	0	0	NaN
T	25	22.76	2.37	0.66	Cl ⁻	25	6.9	14.71	2.72
STD	25	171.76	79.05	0.72	SO ₄ ²⁻	25	8.46	8.03	2.46
ECw	25	252.76	141.58	0.68	N-NO ₃ ⁻	25	0.31	0.46	1.85
OD	25	3.56	1.52	0.26	N-NO ₂ ⁻	25	0	0.01	4.42
Na ⁺	25	9.98	11.64	2.4	Col.F	25	2322.16	7028.01	4.02
K ⁺	25	2.21	3.31	1.15	Col.T	25	15503.24	35779.5	2.99
Ca ²⁺	25	24.04	12.18	0.24	E.Coli	25	1973.15	6980.37	4.22
Mg ²⁺	25	11.14	6.95	0.9	¹⁸ O	14	-9.38	1.97	1.11
Fe	25	0.83	1.02	1.72	² H	14	-65.08	15.56	1.12
Mn	25	0.37	0.98	3.49					
HCO ₃ ⁻	25	124.24	63.53	0.47					

Var.: variable; n: número de muestras; \bar{x} : media; SD: desviación estándar; Skew: coeficiente de asimetría; pH: potencial de hidrógeno; T: temperatura; STD: sólidos totales disueltos; ECw: conductividad eléctrica; OD: oxígeno disuelto; Na+: sodio; K+: potasio; Ca²⁺: calcio; Mg²⁺: magnesio; Fe: hierro total; Mn: manganeso total; HCO₃⁻: bicarbonatos; CO₃²⁻: carbonatos; Cl⁻: cloruro; SO₄²⁻: sulfato; N-NO₃⁻: Nitratos; N-NO₂⁻: Nitritos; Col.F: coliformes fecales; Col.T: coliformes totales; E.Coli: Escherichia coli; ¹⁸O: oxígeno 18; ²H: deuterio.

Los parámetros analizados presentan un coeficiente de asimetría de Fisher: $\eta_1 > 0$, (Ver Figura 30) caracterizada por una distribuciones asimétricas a la derecha. Se presenta como mayor concentración la variable Coliformes Totales con un valor medio de 15503.24 ± 35779.5 NMP/100 mL y con menor valor, la variable deuterio con una abundancia media de -65.08 ± 15.56 %.

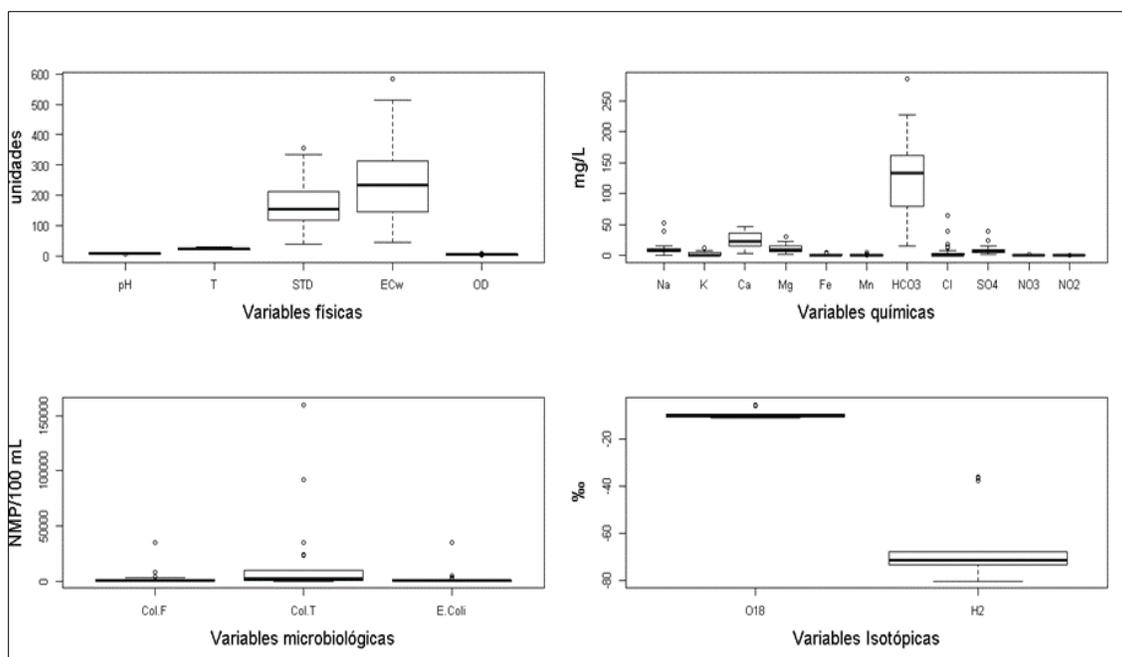


Figura 30. Boxplot de las variables fisicoquímicas, microbiológicas e isotópicas analizadas de los puntos de muestreo para la primera campaña en la Valle del Río Pavas.

6.2.2 Interpretación hidrogeoquímico

La interpretación de los resultados hidrogeoquímico se realizó mediante los diagramas de Piper, Shoeller y Stiff mediante el Trial del Aquachem 2011.

6.2.2.1 Diagrama de Piper

Es un procedimiento basado en el gráfico de Piper que permite la selección analítica de los datos teniendo en cuenta las concentraciones de los disueltos en el agua, las modificaciones en las características del agua al pasar por diferentes áreas o unidades geológicas y los problemas hidrogeoquímicos asociados (Piper, 1944). Este proceso se fundamenta en un diagrama triangular trilinear múltiple, el cual grafica las concentraciones de los aniones constituyentes mayoritarios, expresado en sus equivalentes por millón o miliequivalentes por litro (meg-g/L); por la parte de los

aniones se tienen en cuenta el “ácido conjugado débil” bicarbonato (HCO_3^-) y dos “ácidos conjugados fuertes”: sulfato (SO_4^{2-}) y cloruro (Cl^-). Respecto a los cationes, se tiene en cuenta los dos cationes más abundantes de los elementos alcalinotérreos, calcio (Ca^{2+}) y Magnesio (Mg^{2+}) y un elemento alcalino: sodio (Na^+); el potasio (K^+) también puede tenerse en cuenta, pero ordinariamente es mucho menos abundante que el sodio (Piper, 1944).

El diagrama de Piper consta de dos diagramas ternarios para representar las proporciones de cationes y aniones, junto con un diagrama de rombos en el medio (Teng *et al.*, 2016). El triángulo para cationes tiene 100% de Ca^{2+} en la esquina izquierda, 100% $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ hacia la derecha y 100% Mg^{2+} hacia arriba (tradicionalmente, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ se combinan porque estos iones se analizaron conjuntamente en un precipitado con uranio) (Appelo & Postma, 1993). Para los aniones, el triángulo tiene 100% de carbonato a la izquierda, Cl^- a la derecha y SO_4^{2-} en la parte superior. La suma de las concentraciones de los tres iones, se recalcula al 100% y la composición relativa se representa en el triángulo (Appelo & Postma, 1993). Los dos puntos de datos en los triángulos se unen dibujando líneas paralelas al límite exterior hasta que se unan en el diamante central (Appelo & Postma, 1993).

Este gráfico es utilizado principalmente para determinar las facies hidroquímicas de agua, así mismo, ayuda a comprender los procesos hidroquímicos tales como la interacción agua-roca, el intercambio iónico y la mezcla de diferentes cuerpos de agua (Avci *et al.*, 2018; Piper, 1944). En general, las posiciones absolutas de las muestras diagramadas y proyectadas al rombo central, permite la identificación de los tipos de agua que se están analizando: 1) Ca- HCO_3 , 2) Na-Cl, 3) Ca-Mg-Cl, 4) Ca-Na- HCO_3 , 5) Ca-Cl y 6) Na HCO_3 . Además, las posiciones relativas de las muestras proporcionarán información sobre los procesos a lo largo de la ruta del flujo, como la mezcla de diferentes cuerpos de agua, intercambio iónico e interacción con diferentes tipos de rocas (Avci *et al.*, 2018).

Acorde al diagrama presentado en la Figura 31, se evidencia que en general las muestras analizadas para el área de estudio corresponden a aguas con facies bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas (Ca/Mg-HCO₃), característica de aguas de flujos locales o de cortos tiempos de residencia, con una alta influencia de aguas meteóricas (Al-khashman, 2005; Custodio & Llamas, 1983), así como la presencia de minerales de caliza que se encuentran en los depósitos cuaternarios del área de estudio. Adicionalmente, se encuentra la muestra de agua lluvia MA_01_El Porvenir_Cresta de gallo, con facie bicarbonatada sódica.

Al analizar la Tabla 24, se encuentra que la totalidad de las muestras presentan una facie bicarbonatada, con una diferenciación en el catión dominante, encontrando que el 57% (16 puntos de muestreo) cuentan con una facie cálcico-magnésica, 25% (7 puntos de muestreo) cuentan con una facie sin catión dominante, 7% (2 puntos de muestreo) cuentan con una facie magnésico-cálcica, 4% (1 puntos de muestreo) con facie cálcico-manganesa, 4% (1 puntos de muestreo) con facie cálcica y 4% (1 puntos de muestreo) con facie sódico-potásica.

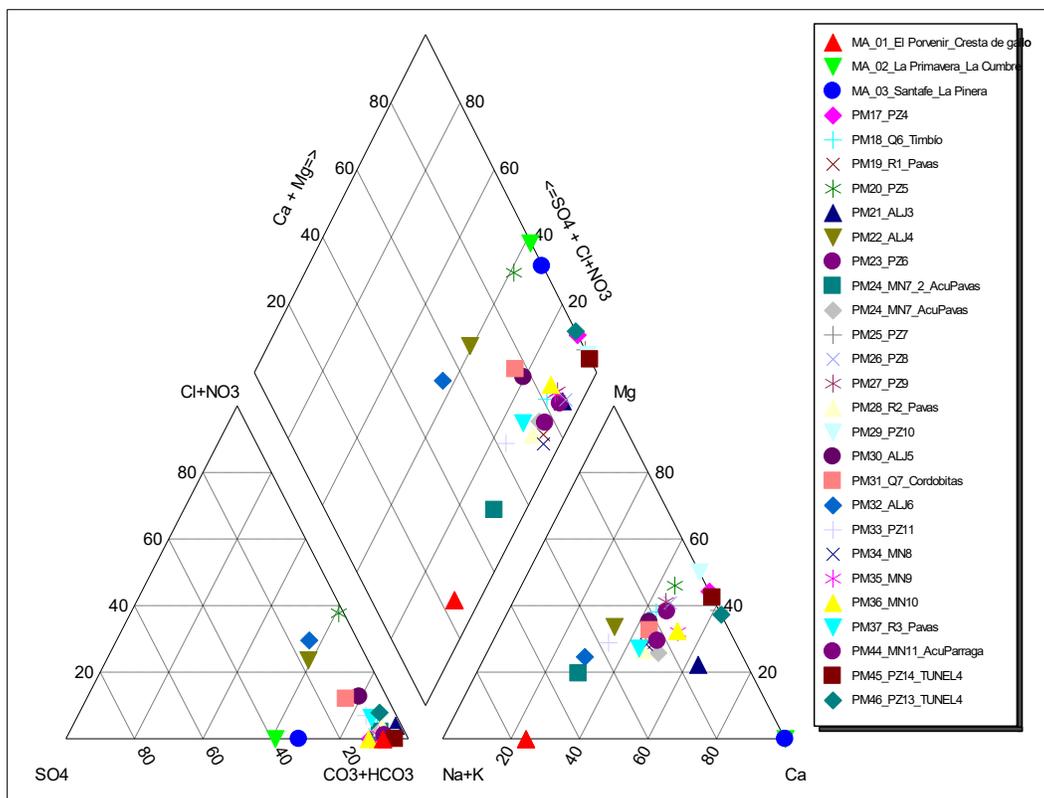


Figura 31. Diagrama de Piper para las muestras obtenidas en la primera campaña en la Valle del Río Pavas.

Tabla 24. Facies de cada uno de los puntos muestreados

Punto de Muestreo	Cuenca	Facies	Anión	Catión
MA_01_El Porvenir_Cresta de gallo	Pavas	Na-K-Ca- HCO ₃	Bicarbonatada	Sódico-potásica
MA_02_La Primavera_La Cumbre	Pavas	Mg-Ca-HCO ₃	Bicarbonatada	Magnésico- cálcica
MA_03_Santafe_La Pinera	Pavas	Mg-Ca-HCO ₃	Bicarbonatada	Magnésico- cálcica
PM17_PZ4	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico- magnésica
PM18_Q6_Timbio	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico- magnésica

Punto de Muestreo	Cuenca	Facie	Anión	Catión
PM19_R1_Pavas	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico-magnésica
PM20_PZ5	Pavas	Mg-Ca-HCO ₃	Bicarbonatada	Magnésico-cálcica
PM21_ALJ3	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico-magnésica
PM22_ALJ4	Pavas	Mg-Ca-Na-HCO ₃	Bicarbonatada	Sin catión dominante
PM23_PZ6	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico-magnésica
PM24_MN7_2_AcuPavas	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico-magnésica
PM24_MN7_AcuPavas	Pavas	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Bicarbonatada	Sin catión dominante
PM25_PZ7	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico-magnésica
PM26_PZ8	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico-magnésica
PM27_PZ9	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico-magnésica
PM28_R2_Pavas	Pavas	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Bicarbonatada	Sin catión dominante
PM29_PZ10	Pavas	Mg-Ca-HCO ₃	Bicarbonatada	Magnésico-cálcica
PM30_ALJ5	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico-magnésica
PM31_Q7_Cordobitas	Pavas	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Bicarbonatada	Sin catión dominante
PM32_ALJ6	Pavas	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Sin catión dominante

Punto de Muestreo	Cuenca	Facie	Anión	Catión
PM33_PZ11	Pavas	Na-Ca-Mg- HCO ₃	Bicarbonatada	Sin catión dominante
PM34_MN8	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico- magnésica
PM35_MN9	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico- magnésica
PM36_MN10	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico- magnésica
PM37_R3_Pavas	Pavas	Ca-Mg-Na- HCO ₃	Bicarbonatada	Sin catión dominante
PM44_MN11_AcuParra ga	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico- magnésica
PM45_PZ14_TUNEL4	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico- magnésica
PM46_PZ13_TUNEL4	Pavas	Ca-Mg-HCO ₃	Bicarbonatada	Cálcico- magnésica

6.2.2.2 Diagrama de Shoeller

El diagrama de Schoeller permite representar los iones mayoritarios de muchas muestras en un solo gráfico, en el que se pueden distinguir fácilmente muestras con patrones similares. Para su representación, los cationes mayoritarios ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} y Mg^{2+}) se ubican en el lado izquierdo del diagrama y los aniones mayoritarios (SO_4^{2-} , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, y Cl^-) en el lado derecho (Babanezhad *et al.*, 2018; Thin *et al.*, 2018).

Por medio de este diagrama se representaron las distintas muestras de agua obtenidas de la Valle del Río Pavas, analizadas acorde al tipo de muestra según código de color: azul para

piezómetros, naranja para aguas superficiales, verde para aljibes, amarillo para manantiales y morado para aguas lluvia.

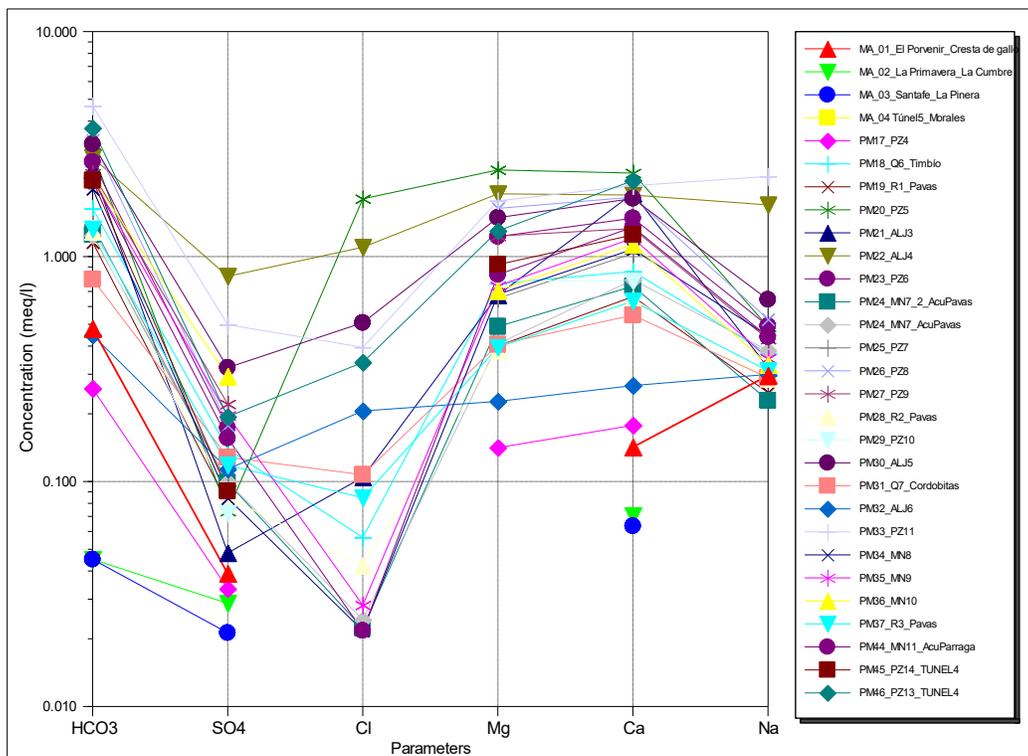


Figura 32. Diagrama de Shoeller-Berkalof para las muestras de agua tomadas en la Valle del Río Pavas.

Los puntos de muestreo en el Valle del Río Pavas, presenta en general facies bicarbonatadas sin una dominancia catiónica. Respecto a las aguas superficiales (Ríos, Quebradas y Manantiales) gráficamente muestra una forma de “V”, propia de aguas de cortos tiempos de residencia o flujos locales con amplia influencia de aguas meteóricas. Entorno a las muestras de agua obtenidas de los piezómetros, se evidencia un comportamiento heterogéneo con una presencia mayoritaria de aguas asociadas a flujos locales o de corto tiempo de tránsito, sin embargo, se presentan los puntos PM20_PZ5, PZ33_PZ11, PM46_PZ13, que evidencian un comportamiento disímil propio de aguas con mayor tiempo de residencia (i.e. aguas de tránsito) en el acuífero dadas las concentraciones de

iones cloruro y sulfato presentes. Frente a las muestras de agua obtenidas de aljibes, presentan un comportamiento homogéneo que gráficamente muestran un aplanamiento de la curva producto de un enriquecimiento iónico, en particular del anión sulfato propio de aguas con un mayor tránsito por el acuífero.

6.2.2.3 Diagrama de Stiff

El diagrama de Stiff consiste en tres o cuatro ejes horizontales que muestran los componentes seleccionados. En cada eje se traza un catión en el eje izquierdo y un anión en el eje derecho, expresada su concentración en miliequivalentes por litro (meg-g/L). El eje superior tiene Na^+ a la izquierda y Cl^- a la derecha y refleja una posible influencia marina (por dominancia del NaCl). El segundo eje tiene Ca^{2+} a la izquierda y HCO_3^- a la derecha y este eje está destinado a mostrar la disolución de CaCO_3 ; El tercer eje tiene Mg^{2+} a la izquierda y SO_4^{2-} a la derecha, presentando los dos componentes principales restantes en la mayoría de las aguas. El cuarto eje es opcional y sus variables pueden cambiar de un estudio a otro (Appelo & Postma, 1993). Los valores en cada eje están conectados por líneas y emerge una forma típica para una composición de agua dada.

Como se puede observar en la Figura 33 en el Valle del Río Pavas se encuentra que la totalidad de puntos de muestreo cuenta con facie bicarbonatada cálcico-magnésica, bicarbonatada magnésico-cálcica o bicarbonatada sin catión dominante, propia de aguas de corto tiempo de tránsito a través del medio geológico y sedimentario que conforma la cuenca y una relación con aguas de recarga meteórica. Al analizar las características hidroquímicas analizadas de cada muestra, teniendo en cuenta que las corrientes superficiales presentan una correlación con los sistemas hídricos subterráneos, así como su ubicación dentro del área de estudio, se encuentran que

los puntos de muestreo: PM32_ALJ6, PM31_Q7_Cordobitas, PM19_R1_Pavas, y PM17_PZ4, ubicados en el sector sur (S) sureste (SE) y este (E) del acuífero pavas, presentan características bicarbonatadas cálcico-magnésicas o bicarbonatadas magnésico-cálcicas con bajas concentraciones de STD en comparación con las demás muestras presentes en el área de estudio ($STD < 101 \text{ mg/L}$; $\overline{STD} = 81 \pm 30 \text{ mg/L}$), cuyas características asocian a estos puntos de muestreo con áreas de recarga del acuífero Pavas.

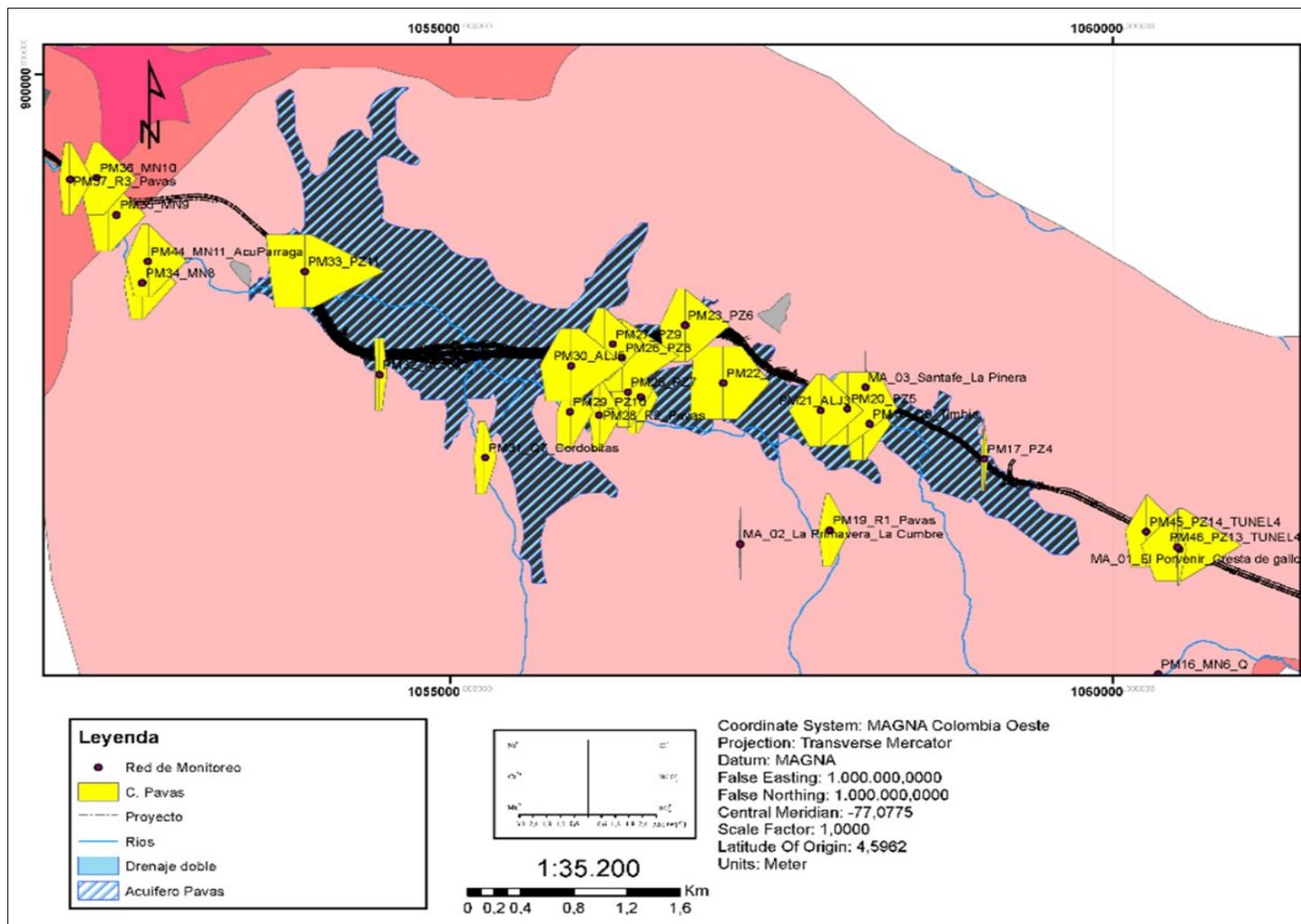


Figura 33. Diagramas de Stiff para los puntos de muestreo localizados en la Valle del Río Pavas.

En coherencia con lo anterior, los puntos de muestreo PM24_MN7_AcuyPavas, PM25_PZ7, y PM29_PZ10, localizados en el borde S así como el punto PM18_Q6_Timbío localizado en el borde este del acuífero Pavas, del cual aflora o extraen sus aguas, los cuales presentan características similares respecto a sus facies, así como concentraciones de STD ligeramente mayores en comparación a las aguas de recarga ($\overline{STD} = 121 \pm 11 \text{ mg/L}$), producto de su interacción con los sedimentos que conforman el acuífero Pavas. Este comportamiento hidroquímico implicaría que estos puntos de muestreo se ubican en sectores donde se están generando procesos de recarga lateral sobre el acuífero.

Al analizar los puntos de muestreo que extraen agua subterránea ubicados sobre el “centro” del acuífero Pavas, estos presentan facies similares a las aguas de recarga, sin embargo sus concentraciones de STD son mayores a las que se presentan en las zonas de recarga lateral ($STD > 182 \text{ mg/L}$; $\overline{STD} = 257 \pm 64 \text{ mg/L}$), lo cual las caracterizaría como aguas de corto a mediano tiempo de residencia dado su incremento en las concentraciones de STD y de las concentraciones de iones sulfato el cual crece en el sentido E-W (PM20_PZ5 = $3.57 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ → PM22_ALJ4 = $39.2 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ → PM26_PZ8 = $8.53 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ → PM33_PZ11 = $23.9 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$), lo cual denotaría que la dirección de flujo del agua subterránea en el acuífero Pavas, basada en datos hidroquímicos, presentaría esta misma dirección; la reducción en la concentración del ion sulfato en el punto de muestreo PM26_PZ8 se asocia con la influencia de la zona de recarga lateral que presenta el acuífero en el sector S.

Por último, en el sector norte se ubicaría la zona de descarga del acuífero Pavas, denotada por la presencia del punto de muestreo PM33_PZ11 el cual cuenta con la mayor concentración de STD de la Valle del Río Pavas ($STD = 356 \text{ mg/L}$), y discurre hacia el Río Pavas, en dirección a

la cuenca Loboguerrero. Esta descarga sobre el río Pavas, se evidencia por la mineralización que presentan los manantiales analizadas a través de los puntos de muestreo PM34_MN8 (154 mg STD/L) → PM44_MN11_AcuParraga (180 mg STD/L) → PM35_MN9 (138 mg STD/L) → PM36_MN10 (180 mg STD/L).

6.2.3 Caracterización Isotópica

Respecto a los isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y δD , su uso permite identificar las diferentes fuentes de recarga, origen del agua subterránea (meteórico, agua marina, fósil, magmática y metamórfica) y poder conocer aguas cuya composición química sea similar, al ser trazadores ideales dado hacen parte de la composición molecular del agua, sin que reaccionen como otros elementos disueltos en esta (Valenzuela et al., 2013; Vélez & Rhenals, 2008).

Para su análisis e interpretación, se requiere hacer uso de parámetros de referencia, como la línea meteorológica mundial (LMM), la cual fue determinada inicialmente por Craig, (1961) y posteriormente refinada al introducir el patrón VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water) por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) que a través de la red global para isótopos presentes en la precipitación, ha establecido la siguiente expresión (Valenzuela et al., 2013; Vélez & Rhenals, 2008)

$${}^2\delta = 8.13^{18}\delta + 10.8\text{‰ VSMOW}$$

Adicionalmente, se hace uso de la línea meteorológica local para Colombia, la cual fue determinada por Rodríguez (2004), mediante información obtenida en más de 20 estudios y 800 análisis isotópicos realizados en muestras de agua lluvia, agua superficial (ríos y lagos) y subterránea. La línea meteórica de Colombia (LML), definida por regresión lineal (Fig. 2) posee la siguiente ecuación.

$${}^2\delta = (8.13 \pm 0.28){}^{18}\delta + 9.6\text{‰ VSMOW}$$

Con $r_{pearson} = 0.994$ he intervalo de confianza de 99% para la pendiente de la recta, la cual coincide con la línea meteórica mundial y la de Sudamérica y por lo tanto, puede ser aprovechada como base para la interpretación y evaluación de estudios de hidrología isotópica en áreas en donde no se dispone de análisis isotópicos previos (Rodríguez, 2004).

Además, dada la probabilidad de presentarse procesos de fraccionamiento provocado por la evapotranspiración que se presentan en la cuenca, que provocará un leve aumento en la abundancia isotópica del oxígeno-18, por la pérdida de vapor de agua empobrecido que abandona el reservorio (subterráneo o superficial), lo cual induciría a que el agua remanente se enriquezca (Carretero, 2011; Geyh *et al.*, 2001). De acuerdo a lo anterior, es posible comparar los valores isotópicos con la línea de evaporación, la cual será analizada haciendo uso de la línea de evaporación local (LEL) obtenida por Rodríguez (2004) en el lago de Tota, cuya ecuación es la siguiente.

$${}^2\delta = 5.54{}^{18}\delta - 17\text{‰ VSMOW}$$

Al comparar los catorce (14) puntos de muestreo con información isotópica disponible, y la LMM, LML y la LEL, se presenta que la totalidad de las muestras analizadas se encuentran sobre las líneas LMM y LML, como se puede observar en la Figura 34, presentando una alta correlación entre los datos de las muestras analizadas ($r_{pearson} = 0.99$)

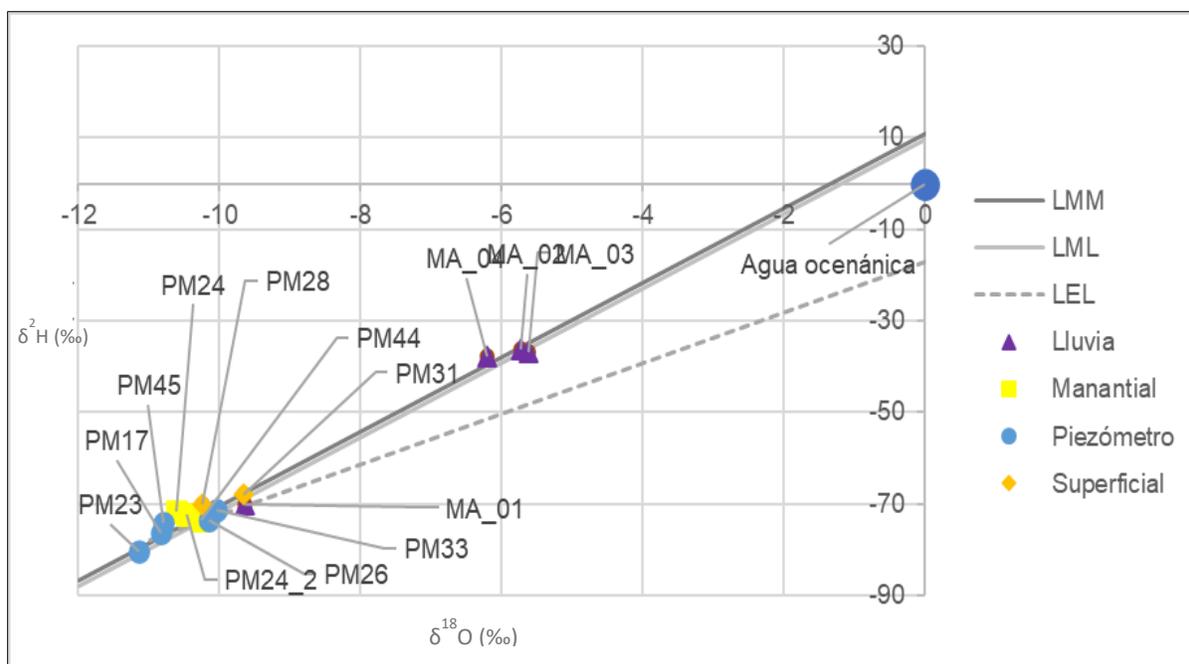


Figura 34. Composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ / δD) correspondiente a la precipitación, aguas superficiales y subterráneas del área de estudio.

Respecto a las muestras de agua de lluvia (triángulos morados) las cuales se presenta en Figura 34, se evidencia una disminución progresiva de la abundancia de los isótopos δD y $\delta^{18}\text{O}$ en dirección Noroeste – Suroriente producto del movimiento de masas de vapor de sectores de menor (*MA_04 Túnel5_Morales* ~ 1405 m. s. n. m) a mayor altitud (*MA_01_El Porvenir_Cresta de gallo* ~ 1555 m. s. n. m), lo cual genera un empobrecimiento isotópico gradual de las masas de vapor y por ende de la precipitación (Gat *et al.*, 2001). Frente a la composición isotópica de los puntos de muestreo de agua superficial (ríos), sus abundancias isotópicas se aproximan a la LMM y la LML, lo cual indica que la influencia de la evaporación que se presenta en la cuenca es insignificante frente a la composición isotópica de estas aguas (Rozanski *et al.*, 2001).

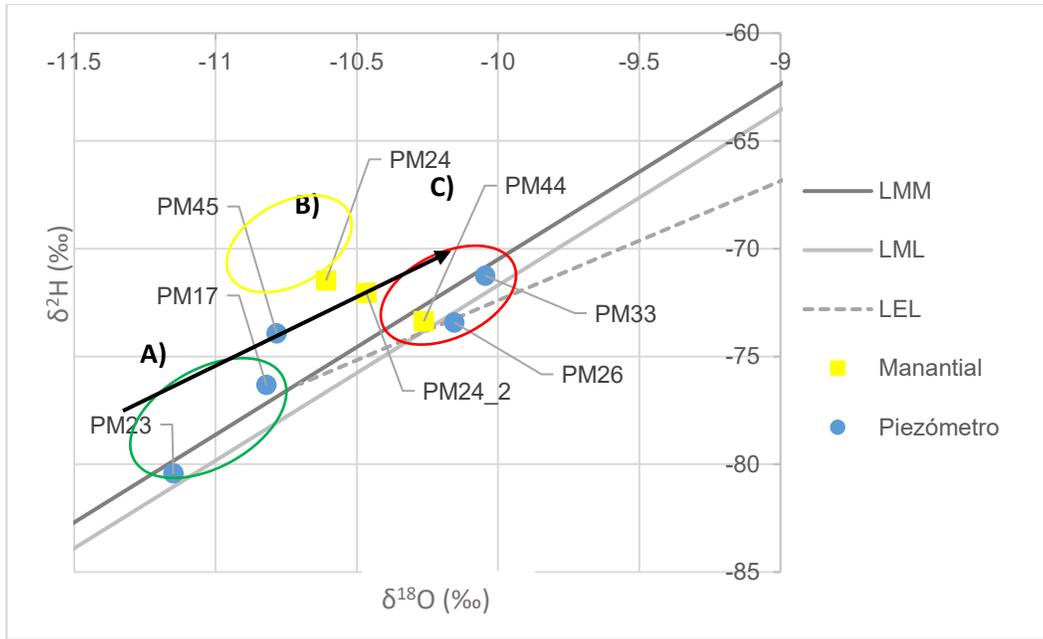


Figura 35. Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a las aguas subterráneas (manantiales y extraídas por piezómetro) del área de estudio para temporada seca.

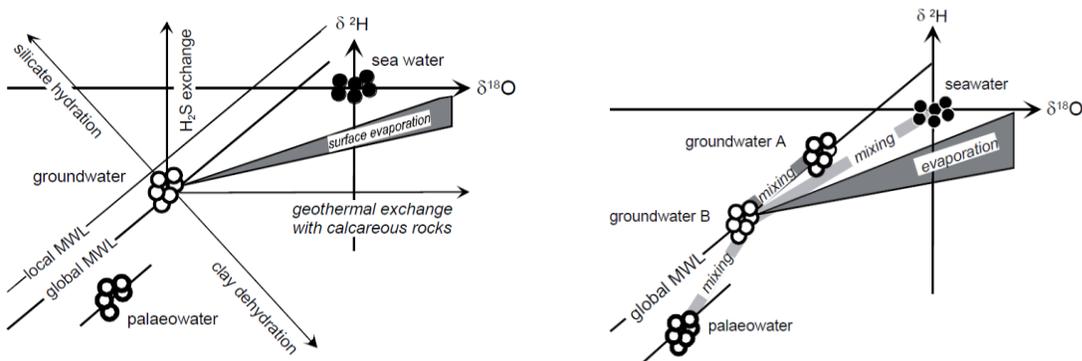


Figura 36. Varios procesos fisicoquímicos que desvían los valores $^{18}\delta$ y $^2\delta$ de la LMM (*Silicate hydration*: hidratación de silicatos; *H₂S exchange*: intercambio H₂S; *Sea water*: agua de mar; *Surface evaporation*: superficie de evaporación; *Geothermal exchange with calcareous rocks*: Intercambio geotérmico con rocas calcáreas; *Clay dehydration*: deshidratación de arcillas; *Palaeowater*: paleoagua; *Groundwater*: agua subterránea.

Fuente: Geyh & Stichler (2001)

Por su parte, las aguas subterráneas asociadas a piezómetros y manantiales que se presentan en la Figura 35, en general se aproximan a la LMM y LML. Basados en la diferencia que presentan las muestras en la abundancia isotópica se pueden diferenciar tres grupos: el grupo A lo conforman los puntos de muestreo PM17_PZ4 y PM23_PZ6, el grupo B los puntos PM24_MN7_AcuPavas y PM45_PZ14_TUNEL4 y el grupo C los puntos PM44_MN11_AcuParraga, PM26_PZ8 y PM33_PZ11.

Los grupos A y C, son aguas subterráneas que en general muestran alineamiento con la línea meteórica mundial y local, dado que las aguas de las cuales se originaron (aguas de recarga de origen meteórico) fueron precipitadas en periodos de baja humedad relativa en comparación con el valor medio actual (régimen hidrometeorológico de baja precipitación: $EvT > P$) favoreciendo los procesos de evaporación, lo cual le da una naturaleza meteórica a su origen.

El grupo B, muestra posible fraccionamiento entre agua y minerales, lo cual puede ser el resultado de aguas enriquecidas en H y agotadas en ^{18}O ubicándolas a la izquierda de la línea meteórica mundial. Esto se puede dar por dos reacciones de intercambio dominantes: el intercambio retrógrado entre agua y minerales de silicato primario o hidratación de silicatos primarios (Clark y Fritz, 1997) posiblemente asociado al alto grado de meteorización de las rocas volcánicas y flujos locales.

Adicionalmente es posible observar una línea de tránsito y mezcla en el medio geológico entre puntos de muestreo ubicados en los límites del acuífero coligados a áreas de recarga que involucra los piezómetros PZ4 y PZ6 localizados en el costado nororiental (piedemonte de la vertiente de La Pinera), con aguas pertenecientes a áreas de tránsito como las captadas en el piezómetro PZ14 y el manantial del acueducto de pavas MN7 y las zonas de descarga localizada principalmente al finalizar la cuenca al noroccidente en el piezómetro PZ11 y el manantial MN11.

7. MODELO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del Río Pavas, busca describir el comportamiento del recurso hídrico subterráneo que se presenta en el Valle asociado al Río Pavas, de forma tal que permita establecer si el trazado del proyecto Vial Mulaló – Loboguerrero en su paso por el valle, pudiera generar alguna alteración al comportamiento del recurso hídrico subterráneo.

La cuenca del Río Pavas presenta una topografía entre los 1100 metros sobre el nivel del mar (msnm), alturas que se asocia con la desembocadura del Rio Bitaco y el cañón que recibe el mismo nombre, la mayor altura (1900 msnm) se presenta en el sector de la pinera en las laderas por las que se encuentra el trazado de la vía Pavas – Restrepo.

En la parte central de la cuenca se presenta el Valle del Río Pavas, un valle semi plano a plano con una altura promedio de 1410 msnm, este valle de ambiente fluvial originado por sedimentos depositados por las corrientes que descienden desde las laderas aledañas, con sedimentos monótonos en su composición ya que se originan a partir de las rocas de la Formación Volcánica (Kv). En la Figura 37, se presenta la topografía para la cuenca del Río Pavas.

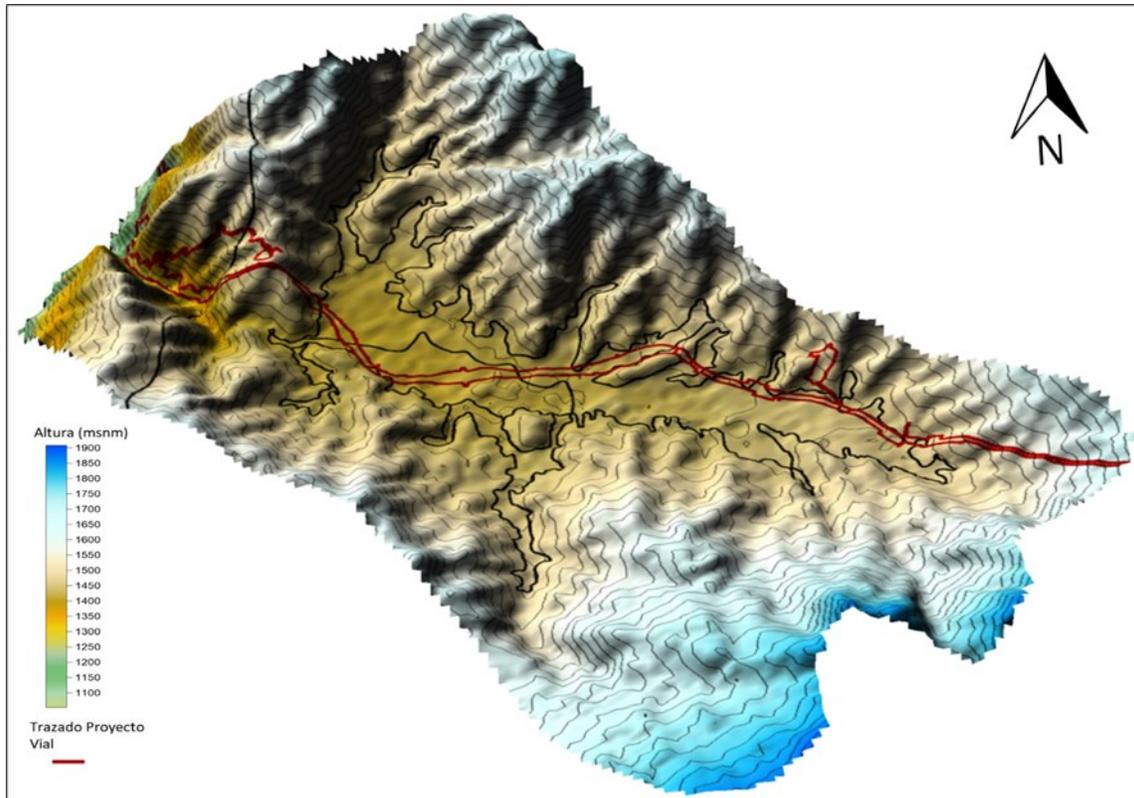


Figura 37. Topografía de la cuenca del Río Pavas.

Basados en el modelo geológico, el inventario de puntos de agua, la caracterización hidrológica, la caracterización hidráulica y la caracterización hidrogeoquímica e isotópica, se establecieron las unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca del Río Pavas, siguiendo el estándar propuesto por la (IAH, 1995).

De base a techo se presentan la unidad hidrogeológica C.2. Estrato o rocas sin recurso de agua subterránea; la cual se convierte en el basamento hidrogeológico. Esta unidad está conformada por las rocas de la Formación Volcánica (Kv), las cuales se encuentran muy consolidada, compactas y con un bajo a nulo grado de fracturamiento. Esta unidad fue caracterizada mediante pruebas hidráulicas en la cuenca adyacente, registrando una Conductividad Hidráulica de $3.05E-04$ m/d y un coeficiente de almacenamiento de $2.77E-07$.

Esta es la única unidad hidrogeológica de la cuenca que es afectada por las fallas Mulaló, La Cumbre – Aguas Claras y Pavas – Quebrada Seca, sin que se tengan indicios que interactúen o tengan influencia con el sistema hídrico subterráneo. La Figura 38 presenta la unidad hidrogeológica C.2. y la ubicación de las fallas presentes en la zona.

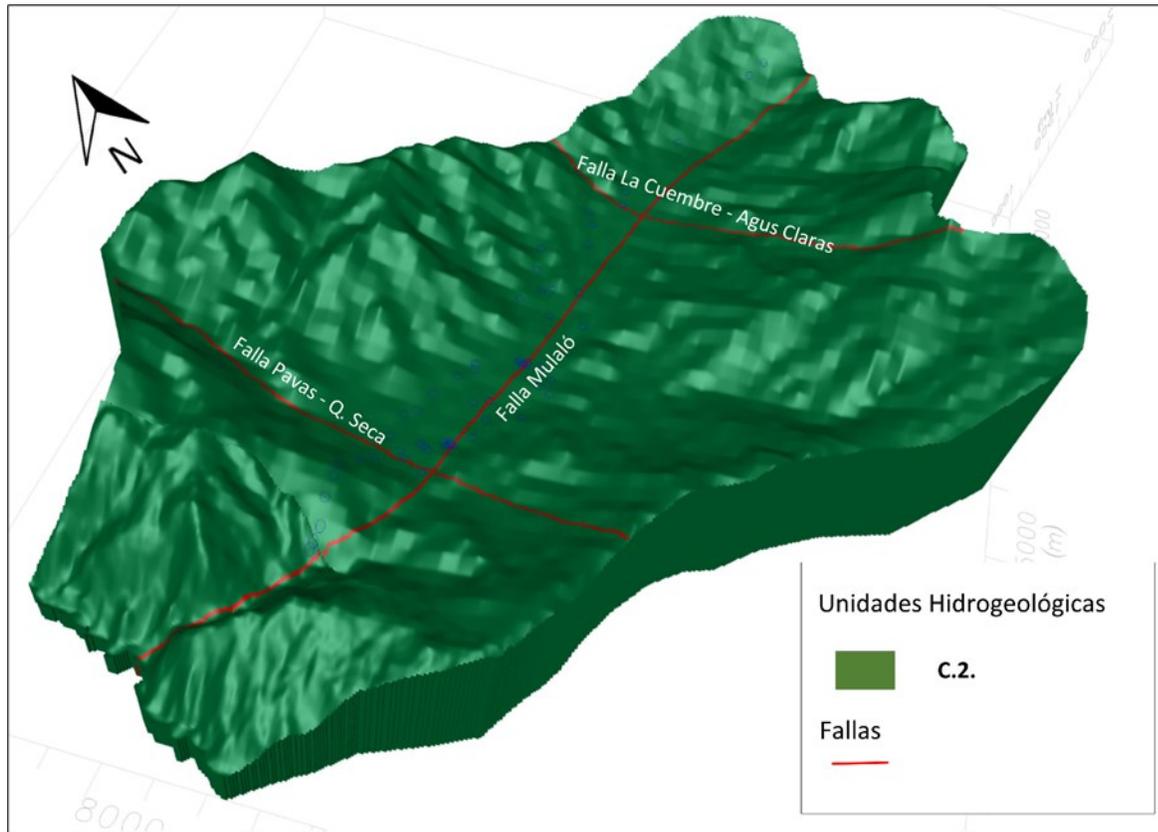


Figura 38. Unidad hidrogeológica C.2., basamento hidrogeológico.

La unidad hidrogeológica acuíferos menores con limitado recurso de agua subterránea y local C.1., se encuentra sobreyaciendo la unidad C.2., la conforma un espesor aproximado de 5.0 metros de rocas de la Formación Volcánica con un grado de fracturamiento moderado a alto y Suelos Residuales originados por la meteorización y descomposición de la lava basáltica y diabasas de la Formación Volcánica.

Hidrogeológicamente la unidad C.1. permite el almacenamiento de agua, pero dados sus valores de conductividad hidráulica ($3.36E-02$ m/d a $4.39E-03$ m/d) presenta dificultad para

trasmitirla, presentando propiedades de acuitardo. Dada su composición de arenas y limos en algunas zonas y sus espesores reducidos (hasta 4 m) en las partes altas y posible contacto con zonas de moderado a alto fracturamiento se presenta como zona potencialmente alta de recarga en las laderas de La Pinera y La Cumbre como lo muestra el análisis hidrogeoquímico e isotópico, así como en la zona de contacto con los Conos Aluviales (Qca). La Figura 39, presenta la geomorfología y disposición de la unidad hidrogeológica C.1.

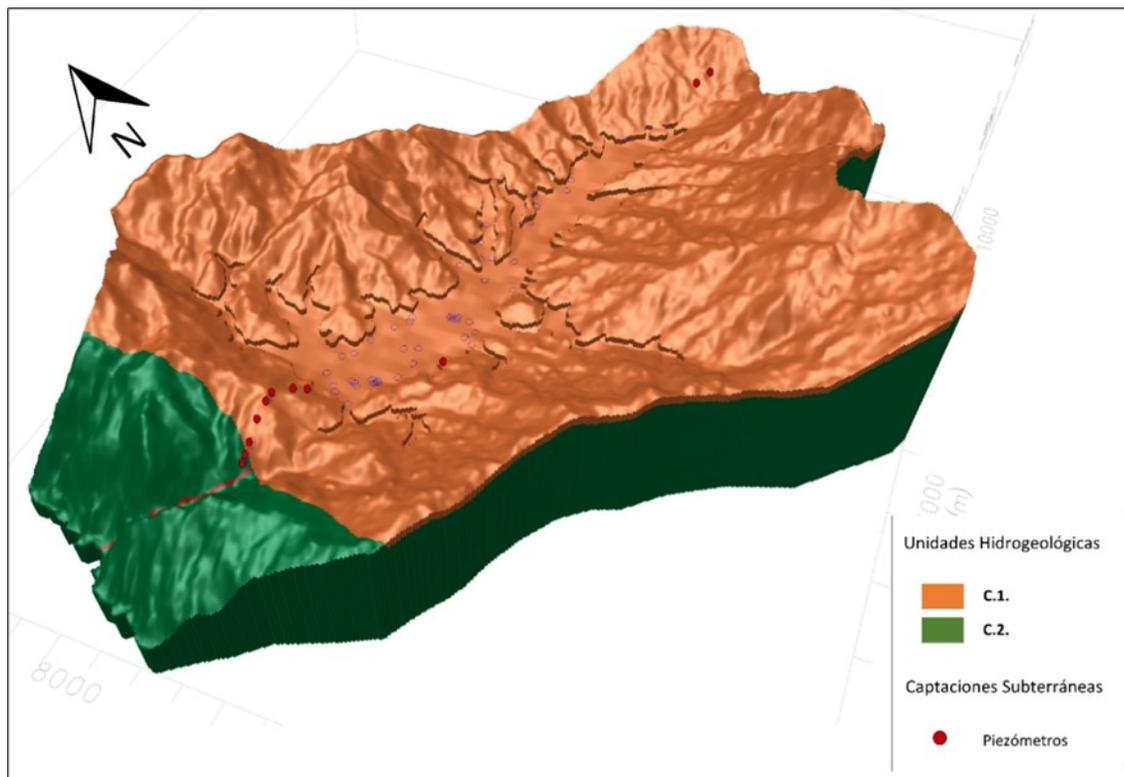


Figura 39. Unidad hidrogeológica C.1., caracterizado como acuitardo.

El único sistema acuífero que se presenta en la cuenca del Río Pavas, se encuentra asociado a los depósitos de Conos Aluviales (Qca) y los Depósitos Aluviales (Qal), se clasifican como la unidad hidrogeológica de acuíferos moderadamente productivos, se carácter local o discontinuos, identificado como A.2.

Este acuífero está conformado por depósitos intercalados de arcillas, capas de arenas finas a gruesas, limos, en su base se presentan gravas finas a medias. Presenta un espesor entre 25 y 30 metros y dada su paleotopografía y una cubierta de arcilla en promedio de 3.0 metros en el sector oriental del valle, esta unidad presenta un comportamiento de acuífero confinado con valores de conductividad hidráulica de $5.45E-01$ m/d y coeficiente de almacenamiento de 2.71. En el sector occidental presenta un comportamiento de acuífero libre desarrollando una conductividad hidráulica de $3.79E-01$ m/d y un coeficiente de almacenamiento de $2.52E-02$.

La unidad hidrogeológica A.2., presenta una dirección de flujo hacia el noroccidente, siguiendo la dirección del Río Pavas y la pendiente topografía. Basados en la composición hidrogeoquímica que muestra que el agua almacenada es de tipo Bicarbonatada - cálcica - magnésica, se puede afirmar que el agua almacenada en el acuífero pertenece a flujos locales, con tiempos de tránsito y recargas relativamente recientes. Por otra parte, las relaciones isotópicas muestran una interacción directa con las aguas superficiales del Río Pavas.

La Figura 40 presenta la unidad hidrogeológica de acuíferos moderadamente productivos, se carácter local o discontinuos, identificado como A.2.

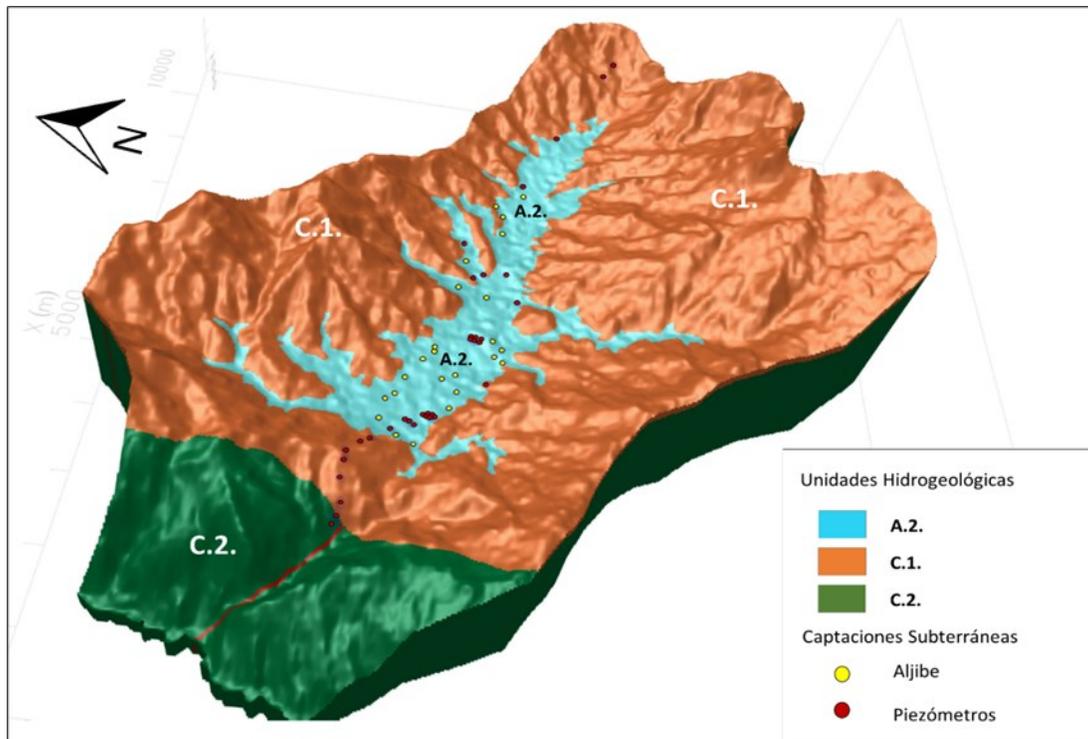


Figura 40. Unidad hidrogeológica A.2., acuífero local en el Valle del Río Pavas.

Las principales corrientes superficiales en la zona son el Río Pavas, corriente superficial que nace en la parte alta de las laderas de La cumbre y atraviesa el valle del suroriente al noroccidente, este es un río perene a lo largo del año y el cual presenta una interacción directa con la unidad hidrogeológica A.2., recargando el acuífero en época invernal y en época de estiaje su flujo base es sostenido por el acuífero.

La otra corriente perene es la Quebrada Cordobitas, la cual nace en las laderas suroccidentales de la cuenca, igual que el río pavas presenta una interacción directa con la unidad A.2., por su parte la Quebrada Timbío es de carácter intermitente, presentado caudal en época de lluvias. La localización de estas tres corrientes superficiales se presenta en la Figura 41.

Basado en el mapa de zonas potenciales de recarga, el cual presenta como zonas con alto y moderado potencial de recarga las laderas de La Cumbre y La Pinera y el análisis hidrogeoquímico e isotópico, los cuales muestran que el agua lluvia en estas mismas dos laderas es de composición

Bicarbonatada - magnésica – cálcica, permite establecerlas como las dos zonas con potencial alto de recarga.

Adicionalmente en estas dos vertientes es donde el espesor de los Suelos Residuales disminuye favoreciendo los procesos de infiltración. La infiltración potencial se estima que en estas dos zonas corresponde aproximadamente al 35% de la precipitación.

En la Figura 42, se presenta un corte a la altura del acueducto de Pavas, representado los flujos locales procedente de las zonas de recarga, identificando la zona saturada y una vista de la zona oriental (acuífero confinado A.2.).

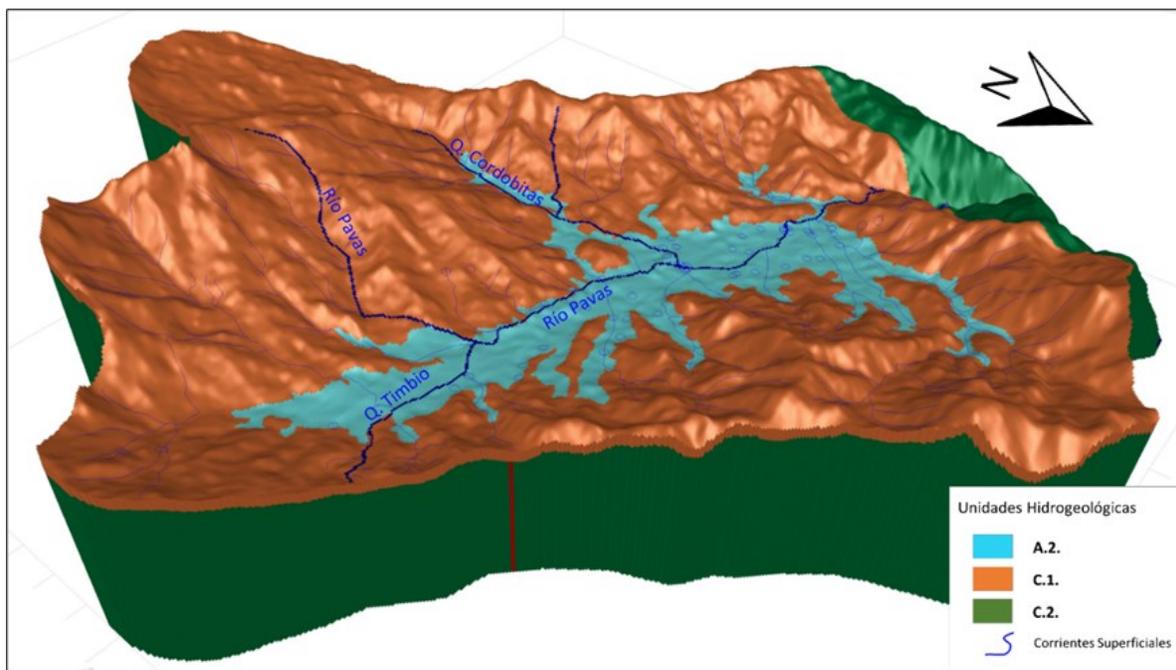


Figura 41. Principales corrientes superficiales.

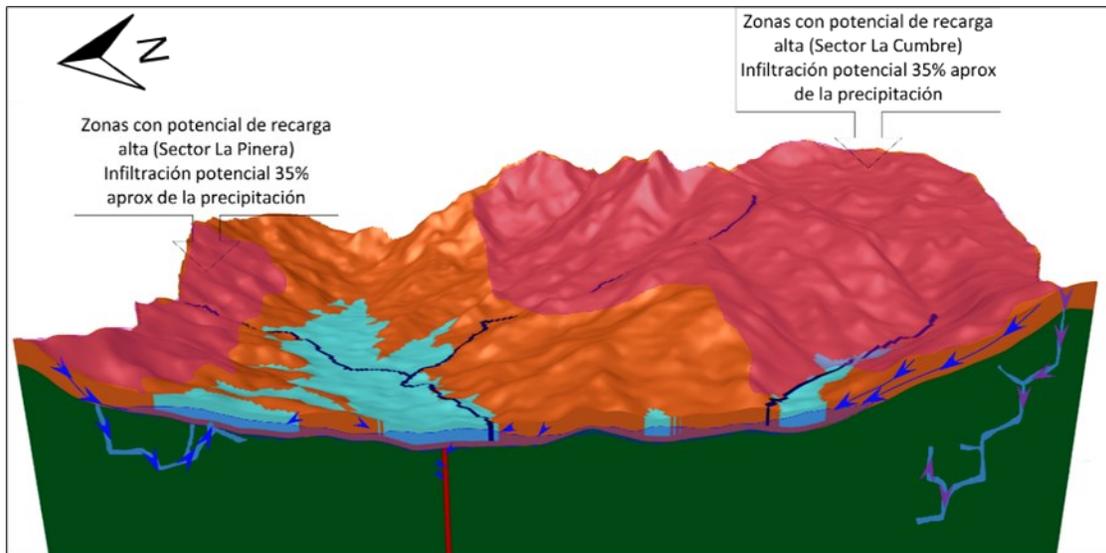


Figura 42. Comportamiento de flujos subterráneos y zonas de recarga.

Hidrogeoquímicamente se evidencia que las aguas en la cuenca del Río Pavas presentan facies bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas (Ca/Mg-HCO₃) primordialmente, características propias de flujos locales, de cortos tiempos de residencia y con una alta influencia de aguas meteóricas.

Se evidencian relaciones hidrogeoquímica entre las muestras de agua lluvia de las zonas de recarga, las aflorantes en el manantial del acueducto de Pavas y las del Río Pavas.

Isotópicamente se presenta una disminución progresiva de la abundancia de los isótopos δD y $\delta^{18}O$ en dirección NE-SW producto del movimiento de masas de vapor de sectores de menor altura (Serranía de Morales) a mayor altitud sector Cresta de Gallo, lo cual genera un empobrecimiento isotópico gradual de las masas de vapor y por ende de la precipitación. La Figura 43 presenta un corte mostrando la parte occidental de la cuenca con los tipos de agua de las muestras de agua lluvia, el acueducto de Pavas y el Río Pavas, así como su abundancia isotópica. Las cuales representa flujos locales con poco tiempo de tránsito.

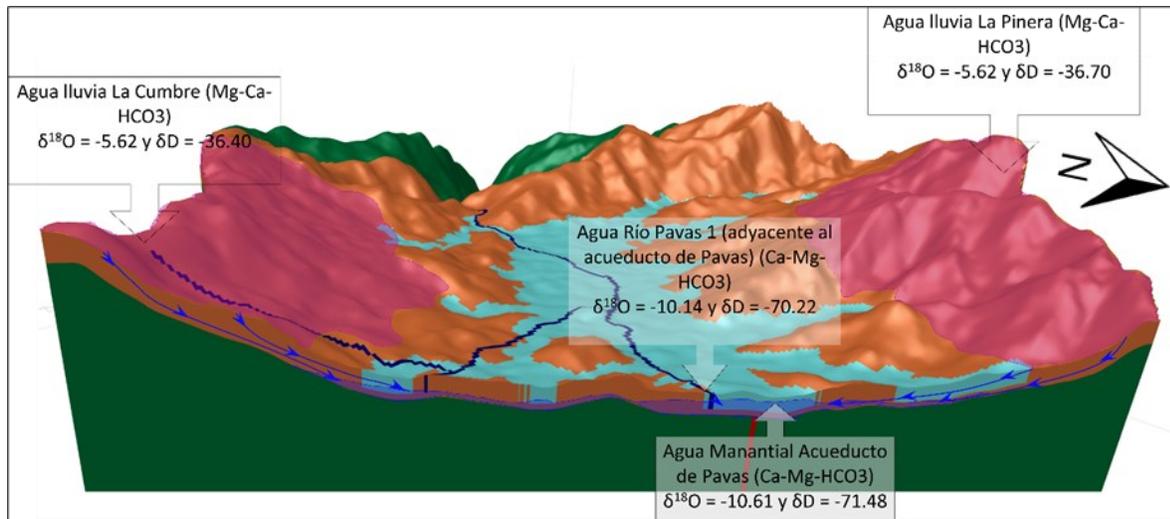


Figura 43. Relación hidrogeoquímica e isotopos δD , $\delta^{18}O$ en el Valle del Río Pavas.

El modelo hidrogeológico conceptual para la cuenca del Río Pavas, establece que el comportamiento hidrogeológico en la unidad hidrogeológica A.2., está asociado con flujos locales de poco tránsito con zonas de recarga adyacentes a la localización de acuífero y que dadas las condiciones paleotopográficas y de depositación de los sedimentos se presenta un comportamiento confinante en el sector oriental del acuífero, lo que permite una fácil recarga frente a eventos de precipitación y con aporte de las corrientes superficiales.

Teniendo en cuenta el comportamiento hidrogeológico, donde los flujos de agua subterránea presentes en el Valle del Río Pavas son netamente de carácter local y que el paso del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero, en su paso por el Valle de Pavas, se hará en vía a cielo abierto soportada sobre un terraplén y a una distancia cercana a los 400 metros del acueducto de Pavas y no tiene interferencia con las zonas de recarga, se puede establecer que el proyecto vial (bajo los diseños actuales) no tendrá influencia sobre el comportamiento hidrogeológico natural del acuífero presente en el Valle de Pavas, sin que se pueda llegar a alterar el régimen que alimenta el sistema de manantiales que abastece el acueducto del Corregimiento de Pavas.

En la Figura 44 se presenta un bloque diagrama del modelo hidrogeológico conceptual generalizado, mostrando las zonas de recarga, los flujos locales, las direcciones de flujo preferentes del agua subterránea y el trazado del proyecto vial, el cual no tiene incidencia en el comportamiento hidrogeológico del acuífero A.2.

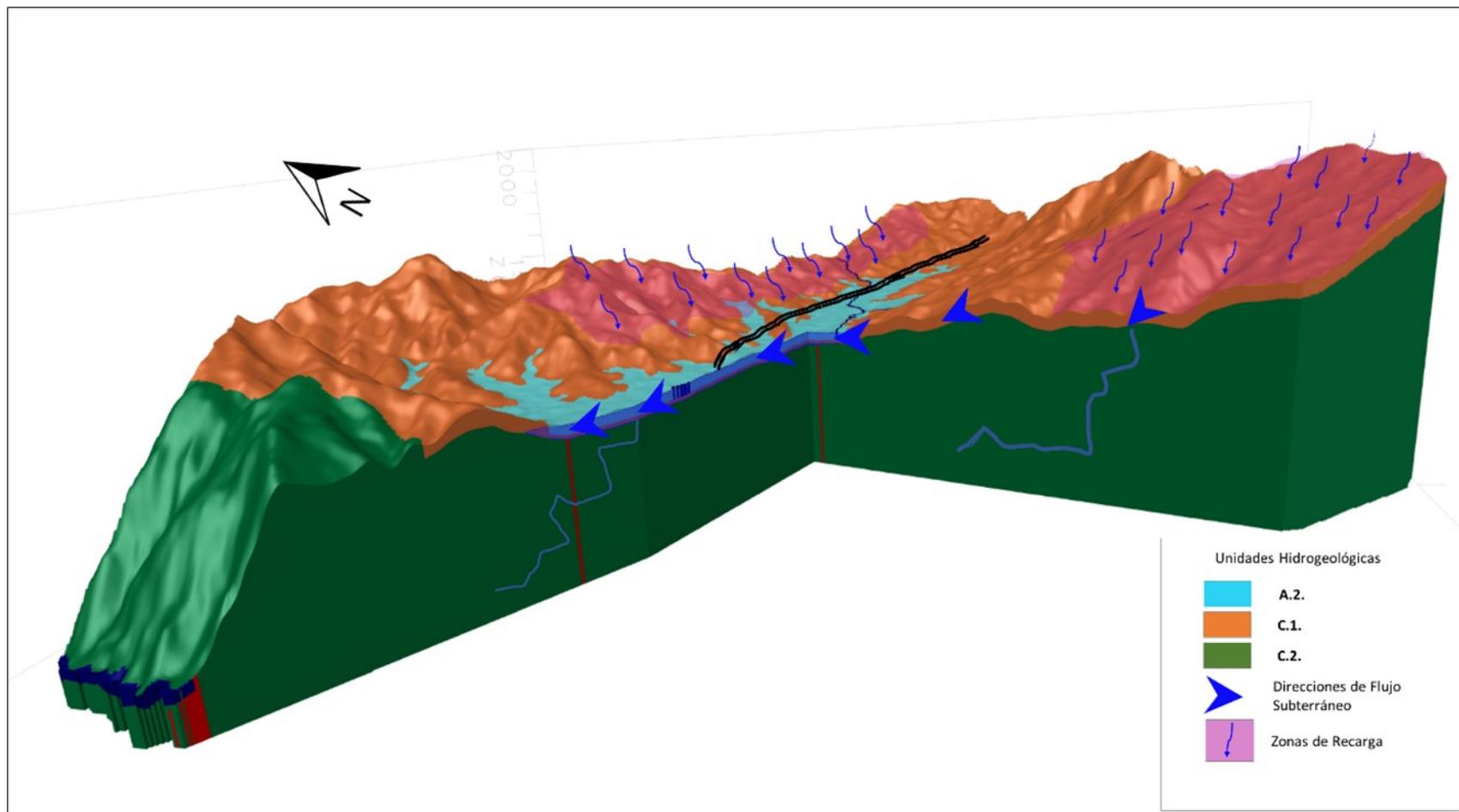


Figura 44. Modelo conceptual generalizado mediante bloque diagrama.

8. CONCLUSIONES

El modelo hidrogeológico conceptual para la cuenca del Río Pavas está sustentado en la información geológica de la Plancha 279-Dagua (INGEOMINAS 1984) a escala 1:100.000, elaborado por Aspden *et al.*, (1984), el mapa geológico elaborado por el Servicio Geológico Colombiano (2015), los datos de la hidrología de las estaciones de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y el IDEAM, las pruebas hidráulicas existentes para el Valle del Río Pavas y el complemento de la información con datos de campo.

Basados en los mapas geológicos oficiales existentes de la cuenca del Río Pavas, el trabajo de campo y las correlaciones geológicas de las perforaciones exploratorias existentes en la zona se elaboró el modelo geológico para la cuenca del Río Pavas, en el cual se actualizó la cartografía geológica a una escala 1:5000, identificando a nivel litoestratigráfico la Formación Volcánica (Kv), Suelos Residuales (Qsr), Conos Aluviales (Qca) y Depósitos Aluviales (Qal).

A partir de los datos existentes en las estaciones meteorológicas de la CVC y el IDEAM se elaboró la caracterización hidrológica de la cuenca del Río Pavas, estableciendo a partir de la metodología del *Soil Conservation Service* que la infiltración potencial equivale al 35% del volumen precipitado, igualmente se definió que las zonas con potencial alto y moderado de recarga corresponden a las vertientes del sector de La Pinera y La cumbre.

A partir de catorce pruebas de bombeo y ocho pruebas slug, distribuidas en la Formación Volcánica, los Suelos Residuales y los Conos Aluviales se realizó la caracterización hidráulica de las rocas y sedimentos presentes en la cuenca del Valle del Río Pavas.

Las pruebas de bombeo recopiladas y las pruebas hidráulicas realizadas en campo arrojaron para la Formación Volcánica (Kv), una Conductividades Hidráulicas entre $6.36E-2$ m/d (para la

zona de mayor fracturamiento) y de $3.05E-4$ m/d (en la zona con bajo grado de fracturamiento), con valores promedio de $2.24E-2$ m/d, la Transmisividad (estimando un espesor saturado de 5.0 m) se encuentra entre 0.318 m²/d y 0.002 m²/d con valor promedio de 0.112 m²/d. El Coeficiente de Almacenamiento promedio es de $1.6E-6$.

Los Suelos Residuales (Qsr), se caracterizan por un valor de Conductividad Hidráulica entre $8.40E-3$ m/d y $3.71E-4$ m/d con un valor promedio de $4.39E-3$ m/d, una Transmisividad entre 0.084 m²/d y 0.004 m²/d (con un espesor saturado de 10 m), con valores promedio de 0.044 m²/d y un Coeficiente de Almacenamiento de $1.66E-3$.

Los Conos Aluviales (Qca), presentan valores de Conductividad Hidráulica entre $9.0E-1$ m/d y $6.35E-4$ m/d, una Trasmisividad entre 15.75 m²/d y 0.011 m²/d (con espesor saturado de 17.5 m) y un Coeficiente de Almacenamiento entre $6.05E-2$ y $4.50E-6$.

A partir de la caracterización hidrogeoquímica se establece una red de monitoreo hidrogeológica con: diez (10) piezómetros, cuatro (4) aljibes, cinco (5) manantiales, cinco (5) puntos en corrientes superficiales y tres (3) muestras de agua lluvia. Con el fin de darle seguimiento al estado y la dinámica hidrogeológica y de calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

La caracterización hidrogeoquímica del área de estudio muestra que las aguas analizadas presentan facies bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas (Ca/Mg-HCO₃), característica de aguas de flujos locales o de cortos tiempos de residencia, con una alta influencia de aguas meteóricas, así como la presencia de minerales que se encuentran en los depósitos cuaternarios del área de estudio.

Las aguas almacenadas en la unidad hidrogeológica A.2. presentan facies similares a las aguas de recarga, con un aumento de STD con respecto a las aguas de recarga lateral, caracterizándolas como aguas de corto a mediano tiempo de residencia dado su incremento en las concentraciones de STD y de la concentración de iones sulfato el cual crece en el sentido oriente – occidente.

La relación de los isótopos δD y $\delta^{18}O$ en agua lluvia presentan una disminución en dirección NE-SW producto del movimiento de masas de vapor de sectores de menor a mayor altitud (desde la Serranía de Morales hacia el sector Cresta de Gallo), lo cual genera un empobrecimiento isotópico gradual de las masas de vapor y por ende de la precipitación. Frente a la composición isotópica de los puntos de muestreo de agua superficial (ríos), sus abundancias isotópicas se aproximan a la LMM y la LML, lo cual indica que la influencia de la evaporación que se presenta en la cuenca es insignificante en la composición isotópica de las aguas superficiales.

El grupo de muestras que se encuentra a la izquierda de la LMM, representa un posible fraccionamiento entre agua y minerales, lo cual puede ser el resultado de aguas enriquecidas en 2H y agotadas en ^{18}O , lo cual puede ser originada por el intercambio retrógrado entre agua y minerales de silicato primario o hidratación de silicatos primarios asociado posiblemente al alto grado de meteorización de las rocas volcánicas y flujos locales.

Isotópicamente se puede establecer una línea de tránsito y mezcla entre la zona de recarga desde la pinera (piezómetros PZ4 y PZ6), zona de tránsito en la parte oriental (PZ14) y central (MN7) del valle del Río Pavas y las zonas de descarga localizada principalmente al finalizar la cuenca al noroccidente en el piezómetro PZ11 y el manantial MN11.

El modelo hidrogeológico conceptual para la cuenca del Río Pavas, establece que el comportamiento hidrogeológico en la unidad hidrogeológica A.2., está asociado con flujos locales de poco tránsito con zonas de recarga adyacentes a la localización de acuífero y que dadas las condiciones paleotopográficas y de depositación de los sedimentos se presenta un comportamiento confinante en el sector oriental del acuífero, lo que permite una fácil recarga frente a eventos de precipitación y con aporte de las corrientes superficiales.

Teniendo en cuenta el comportamiento hidrogeológico antes descrito y que el paso del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero, en su paso por el Valle de Pavas, se hará en vía a cielo abierto

soportada sobre un terraplén y a una distancia cercana a los 400 metros del acueducto de Pavas y no tiene interferencia con las zonas de recarga, se puede establecer que el proyecto vial (bajo los diseños actuales) no tendrá influencia sobre el comportamiento hidrogeológico natural del acuífero presente en el Valle de Pavas.

9. RECOMENDACIONES Y POSIBLES INVESTIGACIONES FUTURAS

Como investigaciones futuras y posibles temas de investigación complementaría al presente trabajo se recomienda:

Ejecución de pruebas de bombeo de larga duración en los pozos construidos como parte de la red de monitoreo hidrogeológica, con el fin de afinar los parámetros hidráulicos de la unidad hidrogeológica A.2.

Complementar la caracterización hidrogeoquímica e isotópica para periodo de lluvia, incluyendo la datación de las aguas subterráneas mediante isotopo radiogénico (H3) tritio, con el fin de determinar la edad del agua, las tasas de renovación y validar los tiempos de tránsito.

A partir del modelo hidrogeológico conceptual desarrollado, realizar el modelo hidrogeológico numérico encaminado a simular diversos escenarios (estacionario y transitorio) de la dinámica hidrogeológica, teniendo en cuenta la implementación de las obras ingenieriles asociadas al trazado vial y dar validación a las conclusiones obtenidas.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Al-khashman, O. A. (2005). Study of chemical composition in wet atmospheric precipitation in Eshidiya area, Jordan. *Atmospheric Environment*, 39, 6175–6183. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.056>
- Alfaro, P. E. M., & Santos, P. M. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (1993). Geochemistry, groundwater and pollution. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90585-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90585-1)
- Aspden, J. A., Nivia, G. Á., & Millward, D. (1984). *Plancha 279-Dagua*. 3215.
- Avci, H., Dokuz, U. E., & Avci, A. S. (2018). Hydrochemistry and groundwater quality in a semiarid calcareous area: an evaluation of major ion chemistry using a stoichiometric approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7021-8>
- Babanezhad, E., Qaderi, F., & Salehi Ziri, M. (2018). Spatial modeling of groundwater quality based on using Schoeller diagram in GIS base: a case study of Khorramabad, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77(9), 339. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7541-0>
- Beatriz López, L. (2006). La búsqueda bibliográfica: componente clave del proceso de investigación. *DIAETA (Buenos Aires)*, 24(115), 31–37.
- Bicalho, C. C., Batiot-Guilhe, C., Taupin, J. D., Patris, N., Van Exter, S., & Jourde, H. (2017). A conceptual model for groundwater circulation using isotopes and geochemical tracers coupled

- with hydrodynamics: A case study of the Lez karst system, France. *Chemical Geology*.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.08.014>
- Brassington, F. C., & Younger, P. L. (2010). A proposed framework for hydrogeological conceptual modelling. *Water and Environment Journal*, 24(4), 261–273.
<https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00173.x>
- Bu, F., & Xu, Z. (2020). Geological modeling of combined incised channel system in deep-water gravity flow sedimentation: The case of OML130 in Niger delta basin, West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 162(November 2019), 103704.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103704>
- Carretero, S. C. (2011). *Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires*. Universidad Nacional de la Plata.
- Clark, I., & Fritz, P. (2003). Environmental isotopes in hydrogeology. *Environmental Geology*, 43(5), 532. <https://doi.org/10.1029/99eo00169>
- COVIMAR, C. N. V. A. M. (2018). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Vial Mulaló-Loboguerrero* (Issue 001).
- Crafts, N. (2009). Transport infrastructure investment: Implications for growth and productivity. *Oxford Review of Economic Policy*, 25(3), 327–343. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grp021>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea Tomo I* (2da ed.). Ediciones Omega.
- DNP. (2014). *Plan nacional de desarrollo 2014-2018*.
- Fernández, N. F. N., López, A. T., Menes, H. E. F., Quiroz, M. R. M., & Enríquez, J. F. (2010).

Estimación Del Escurrimiento Superficial Con El Método Scs-Cn En El Trópico Subhúmedo De México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71–78.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.

Fritz, S. J. (1994). A Survey of Charge-Balance Errors on Published Analyses of Potable Ground and Surface Waters. *Ground Water*, 32(4), 539–546. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00888.x>

Galeano, J., Bulding, M. V., & Arango, A. F. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial E.O.T Municipio de la Cumbre- Valle*.

Gat, J. R., Mook, W. G., & Meijer, H. A. J. (2001). Sección II. Agua Atmosférica. In Willem G Mook (Ed.), *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones* (1ra ed., p. 60). UNESCO – IAEA.

Geyh, M., D' amore, F., Darling, G., Paces, T., Pang, Z., & Šilar, J. (2001). *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle Principles and Applications. Groundwater Saturated and Unsaturated Zone* (UNESCO & IAEA (eds.); Vol. 4). UNESCO - IAEA.

Geyh, M., & Stichler, W. (2001). Sección IV. Agua subterránea: zona saturada y no saturada. In Willem G Mook (Ed.), *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones* (1ra ed., p. 105). UNESCO – IAEA.

Gillespie, J., Nelson, S. T., Mayo, A. L., & Tingey, D. G. (2012). Why conceptual groundwater flow models matter: a trans-boundary example from the arid Great Basin, western USA. *Hydrogeology Journal*, 20(6), 1133–1147. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0848-0>

- González-Abraham, A., Fagundo-Castillo, J. R., Carrillo-Rivera, J. J., & Rodríguez-Estrella, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 319–333.
- Hernández, G. A. S., Ferreira, H. E. J., Robles, W. A., Trinidad, J. G., Capetillo, C. B., & Herrera Zamarrón, G. D. S. (2017). Optimización del monitoreo del nivel del agua subterránea para una frecuencia fija. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(5), 19–38. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2017-05-02>
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2010). Metodología de la investigación. In *Metodología de la investigación*. <https://doi.org/>- ISBN 978-92-75-32913-9
- IAH. (1995). *Hydrogeological Maps A Guide and a Standard Legend* (Vol. 17).
- IDEAM, & INVEMAR. (2017). *Protocolo de Monitoreo del Agua - Colombia*. 587. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023773/PROTOCOLO_MONITOR_EO_AGUA_IDEAM.pdf
- IGME. (1985). *Composición química de las aguas subterráneas naturales*.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ghahraman, B., Sadeghi, M., & Moghaddamnia, A. (2012). Application of “panel-data” modeling to predict groundwater levels in the Neishaboor Plain, Iran. *Hydrogeology Journal*, 20(3), 435–447. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0814-2>
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A. N., Alipoor, A., Joodavi, A., & Brusseau, M. L. (2014). A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Arabian Journal*

of Geosciences, 7(9), 3611–3631. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0971-9>

Johnson, A. I. (1967). Specific Yield Compilation of Specific Yields for Various Materials-- Hydrologic properties of earth materials. *Geological Survey Water-Supply Paper 1662-D*, 80. <https://pubs.usgs.gov/wsp/1662d/report.pdf>

Kazakis, N., Vargemezis, G., & Voudouris, K. S. (2016). Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of the Total Environment*, 550, 742–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.133>

Kolm, K. E. (1996). Conceptualization and characterization of ground-water systems using Geographic Information Systems. *Engineering Geology*, 42(2–3), 111–118. <https://doi.org/10.1520/stp18262s>

Kpegli, K. A. R., Alassane, A., van der Zee, S. E. A. T. M., Boukari, M., & Mama, D. (2018). Development of a conceptual groundwater flow model using a combined hydrogeological, hydrochemical and isotopic approach: A case study from southern Benin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 18, 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.06.002>

Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data. *Journal of Hydrology*, 12(3), 281–282. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(71\)90015-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90015-1)

Li, H., Liu, Y., & Peng, K. (2018). Characterizing the relationship between road infrastructure and local economy using structural equation modeling. *Transport Policy*, 61, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.10.002>

López Velandia, C. C. (2016). *Evaluación química ambiental de recurso hídrico subterráneo de la cuenca del Río Chicú, Sabana de Bogotá, Colombia*. Universidad Nacional de La Plata.

- Mary P., A., William W., W., & Randall J., H. (2015). Modeling Purpose and Conceptual Model. In *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-058103-0.00002-2>
- Matus, S. O. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas , aplicada a la subcuenca del río Jucuapa , Matagalpa Nicaragua*. 247.
- Mook, Willem G. (2000). *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico Principios y Aplicaciones* (W. G. Mook (ed.)). El Organismo Internacional de Energía Atómica.
- Murray, K., & Wade, P. (1996). Checking anion-cation charge balance of water quality analyses: Limitations of the traditional method for non-potable waters. *Water SA*, 22(1), 27–32.
- OIEA/GNIP. (2014). *Guía para el muestreo de la precipitación*. 19.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6), 914. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Rodríguez, C. O. (2004). Línea meteórica isotópica de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 8, 43–51.
- Rozanski, K., Froehlich, K., Mook, W. G., & Stichler, W. (2001). Sección III. Agua superficial. In Willem G Mook (Ed.), *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones* (1ra ed., p. 65). UNESCO – IAEA.
- Sánchez Cohen, I., Velázquez Valle, M., Jasso Ibarra, R., & Gonzalez Barrios, J. L. (2003).

Caracterización de la retención potencial máxima de humedad en el suelo del método SCS-CN. Aplicación a una cuenca de México. *Ingeniería Hidráulica En México*, 18(3), 111–117.

Sánchez San Román, J. (2012). *Evolución geoquímica de las aguas subterráneas*.

Teng, W. C., Fong, K. L., Shenkar, D., Wilson, J. A., & Foo, D. C. Y. (2016). Piper diagram – A novel visualisation tool for process design. *Chemical Engineering Research and Design*, 112, 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.06.002>

Thin, P. P., Hendrayana, H., Wilopo, W., & Kawasaki, S. (2018). Assessment of groundwater facies in Wates Coastal Area, Kulon Progo, Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 5(4), 1389–1401. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2018.054.1389>

Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico. Causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111(4), 9–26.

Ushijima, T. T., & Yeh, W. W. G. (2015). Experimental design for estimating unknown hydraulic conductivity in an aquifer using a genetic algorithm and reduced order model. *Advances in Water Resources*, 86, 193–208. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.029>

Valenzuela, L., Ramírez-Hernández, J., & Palomares, R. B. (2013). Composición Isotópica del Agua Subterránea y su Relación con la Salinidad en el Valle de San Luis Río Colorado Sonora Mexico . *Información Tecnológica*, 24(2), 57–66. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200008>

Vélez, M. V., Ortiz, P. C., & Vargas, M. C. (2004). *Las aguas subterráneas un enfoque práctico*.

Vélez, M. V., & Rhenals, R. L. (2008). Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fé de Antioquia. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 24, 18.

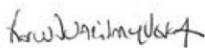
Anexo A. Resultados de laboratorio para análisis hidrogeoquímico.

Nº de Referencia:	A-20/001667	Registrada en:	AGQ Prodycon	Cliente:	INGENIERÍA CORREA CORREA S.A.S.
Análisis:	143280A-6	Centro Análisis:	AGQ Prodycon	Domicilio:	Calle 147 No. 95-34
Tipo Muestra:	AGUA SUBTERRANEA	Fecha Recepción:	08/01/2020	Contrato:	PD19-1655
Fecha Inicio:	08/01/2020	Fecha Fin:	20/01/2020	Cliente 3º:	----
Descripción:	PM30 ALJ 5				

Fecha/Hora	07/01/2020 15:42	Muestreado por:	Personal Prodycon		
Muestreo:					
Lugar de Muestreo:	MONITOREO PUNTUAL DE AGUAS			Coordenadas x,y:	076.57420 03.67000
Punto de Muestreo:	PM30 ALJ 5				

A continuación se exponen el Informe de Ensayo y Anexo Técnico asociados a la muestra, en los cuales se pueden consultar toda la información relacionada con los ensayos realizados.

Los Resultados emitidos en este informe, no han sido corregidos con factores de recuperación. Siguiendo el protocolo recogido en nuestro manual de calidad, AGQ guardará bajo condiciones controladas la muestra durante un periodo determinado después de la finalización del análisis. Una vez transcurrido este periodo, la muestra será eliminada. Si desea información adicional o cualquier aclaración, no dude en ponerse en contacto con nosotros.



FIDSON JUARISMY VESGA PEREZ



LEIDY CAROLINA JAIMES ARIAS

FECHA EMISIÓN: 21/01/2020

OBSERVACIONES:

Nº de Referencia:	A-20/001667	Tipo Muestra:	AGUA SUBTERRANEA
Descripción:	PM30 ALJ 5	Fecha Fin:	20/01/2020

RESULTADOS ANALITICOS				
Parámetro	Resultado	Unidades	Incert	CMA
Mediciones In Situ				
Conductividad Eléctrica In Situ Medido MA	403	µS/cm	-	
Oxígeno Disuelto In Situ Medido MA	1,57	mg/L	-	
pH In Situ Medido MA	6,7	Unidades de pH	-	
Temperatura In Situ Medido MA	23,4	°C	-	
Parámetros Físico-Químicos				
Aceites y Grasas	< 4,0	mg/L	±0,04%	
Acidez Total	36,3	mg/L CaCO3	±0,045%	
Alcalinidad Total	193	mg/L CaCO3	±0,036%	
Bicarbonatos	193	mg/L CaCO3	-	
Carbonatos	< 5,00	mg/L	-	
Dureza Cálctica	101	mg/L	±0,032%	
Dureza Total	181	mg/L	±0,052%	
Sólidos Totales Disueltos	240,0	mg/L	±0,012%	
Aniones -				
Cloruros	18	mg/L	±0,01%	
Fosfatos	< 0,100	mg/L	±0,018%	
Nitratos	< 0,30	mg/L	±0,02%	
Nitritos	0,063	mg/L	±0,023%	
Sulfatos	15,4	mg/L	±0,012%	
Metales Totales				
Calcio Total	36,3	mg/L	±0,031%	
Hierro Total	0,611	mg/L	±0,029%	
Magnesio Total	18,1	mg/L	±0,018%	
Manganeso Total	0,2130	mg/L	±0,0176%	
Potasio Total	11,4	mg/L	±0,019%	
Sodio Total	14,8	mg/L	±0,025%	
Microbiología				
Coliformes Fecales por NMP	2,00	NMP/100mL	±0,32%	
Coliformes Totales por NMP	2,40 x 10 ²	NMP/100mL	-	
Escherichia coli	< 1,90	NMP/100mL	±0,06%	
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales	< 4,000000	mg/L	±0,0366%	

Nota: Los Resultados de este informe solo afectan a la muestra tal como es recibida en el laboratorio. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. Las incertidumbres están indicadas a lo largo del informe. El cliente proporciona todos los datos asociados a la Toma de Muestras, cuando esta ha sido realizada por él. A: Ensayo subcontratado y acreditado. N: Ensayo subcontratado y no acreditado. RE: Recuento en placa estimado. Para los parámetros de radiactividad el valor inferior del rango corresponde al AMD.

Nº de Referencia: A-20/001667
 Descripción: PM30 ALJ 5

 Tipo Muestra: AGUA SUBTERRANEA
 Fecha Fin: 20/01/2020

ANEXO TECNICO

Parámetro	PNT	Técnica	Ref. Norma.	Rango
Mediciones In Situ				
Conductividad Eléctrica In Situ Medido MA	SM 2510 B	Electrometría		0,33 - 40.000 µS/cm
Oxígeno Disuelto In Situ Medido MA	SM 5210 B / ASTM D-888-12	Electrometría		0,020 - 20,0 mg/L
pH In Situ Medido MA	SM 4500 H+B	Electrometría		1,0 - 14 Unidades de pH
Temperatura In Situ Medido MA	SM 2550 B	Electrometría		0,20 - 80,0 °C
Parámetros Físico-Químicos				
Aceites y Grasas	SM 5520 C	Espect FTIR		4,0 - 20.000 mg/L
Acidez Total	SM 2310 B	Volumetría		5,00 - 1.000 mg/L CaCO3
Alcalinidad Total	SM 2320 B	Calculado		5,00 - 1.000 mg/L CaCO3
Bicarbonatos	SM 2320 B	Calculado		5,00 - 1.000 mg/L CaCO3
Carbonatos	SM2320B Cálculo	Calculado		5,00 - 1.000 mg/L
Dureza Cálcica	SM 3500 Ca-B	Titrición		5,00 - 1.000 mg/L
Dureza Total	SM 2340 C	Volumetría		5,00 - 1.000 mg/L
Sólidos Totales Disueltos	SM 2540 C / 180°C	Gravimetría		10,00 - 20.000 mg/L
Aniones -				
Cloruros	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica		0,70 - 100 mg/L
Fosfatos	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica		0,100 - 1,00 mg/L
Nitratos	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica		0,30 - 7,0 mg/L
Nitritos	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica		0,030 - 0,200 mg/L
Sulfatos	SM 4110 B Modificado	Cromatog Iónica		0,800 - 100 mg/L
Metales Totales				
Calcio Total	EPA 200.7	ICP-OES		1,00 - 20,0 mg/L
Hierro Total	EPA 200.7	ICP-OES		0,100 - 2,00 mg/L
Magnesio Total	EPA 200.7	ICP-OES		1,00 - 20,0 mg/L
Manganeso Total	EPA 200.7	ICP-OES		0,0700 - 2,000 mg/L
Potasio Total	EPA 200.7	ICP-OES		4,00 - 50,0 mg/L
Sodio Total	EPA 200.7	ICP-OES		4,00 - 50,0 mg/L
Microbiología				
Coliformes Fecales por NMP	SM 9221 E	Tubos Múltiples		1,84 - 1,60 x 10 ³ NMP/100mL
Coliformes Totales por NMP	SM9221B Modificado	Tubos Múltiples		1,80 - 1,60 x 10 ³ NMP/100mL
Escherichia coli	SM9221F Modificado	Tubos Múltiples		1,90 - 100.000.000.000 NMP/100mL
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales	SM 5520 C,F	Espect FTIR		4,000000 - 20.000,0 mg/L

Los parámetros marcados con asterisco (*) no están incluidos en el Alcance de Acreditación.

(1) El rango mínimo se corresponde con el límite de determinación, a partir del cual cuantificamos. Para los parámetros de radiactividad el valor del rango corresponde al AMD.

Nº de Referencia:	A-20/001667	Tipo Muestra:	AGUA SUBTERRANEA
Descripción:	PM30 ALJ 5	Fecha Fin:	20/01/2020

Los resultados emitidos han sido aprobados por Laura Milena Castrillon Valbuena, Profesional: Química, Matricula: PQ-4351. Si desea calcular la incertidumbre realice la siguiente operación: $(U=k*uc*y)$, siendo k Factor de cobertura= 2; uc: incertidumbre del método; y: Resultado del método

(1) El rango mínimo se corresponde con el límite de Determinación, a partir del cual cuantificamos. Para los parámetros de radiactividad el valor del rango corresponde al AMD.

Anexo B. Resultados de laboratorio para isótopos estables ambientales δD y $\delta^{18}O$.

Client: Correa
 Ingenieria Correa Correa S.A.S
 Project: Mulaló-Loboguerrero COVIMAR
 PO: 108020

ISO# 2020035
 Location:
 14 for 180, 2H, 3H

Environmental Isotope Lab
 2020-01-24
 1 of 1

#	Sample	Date	Lab#	$\delta^{18}\text{O}$		$\delta^2\text{H}$		3H	Result $\pm 1\sigma$	Repeat $\pm 1\sigma$	pH	EC	AZD	
				H ₂ O	VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	H ₂ O	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$							
1	pm17_pz4	2020-01-07	435637	X	-10.88	-10.76	X	-76.60	-76.03	X		5.55	44.4	
2	pm23_pz6	2020-01-08	435638	X	-11.15		X	-80.43		X		6.67	313	
3	pm24_mn7_AcuPavas	2020-01-07	435639	X	-10.61		X	-71.48		X		7.69	141.5	
4	pm26_pz8	2020-01-07	435640	X	-10.15		X	-73.42		X		7.5	370	
5	pm28_R2_pavas	2020-01-09	435641	X	-10.14	-10.33	X	-70.22	-69.95	X		7.07	145.7	
6	pm31_Q7_cordobitas	2020-01-08	435642	X	-9.66		X	-68.00		X		6.8	125.9	
7	pm33_pz11	2020-01-08	435643	X	-10.05		X	-71.25		X		6.78	583	
8	pm44_mn11_acuparraga	2020-01-09	435644	X	-10.26		X	-73.37		X		7.21	253	
9	pm45_pz14tunel 4	2020-01-07	435645	X	-10.78		X	-73.92		X		7.21	234	
10	MA_02_La Primavera La Cumbre	2019-12-30	435646	X	-5.62	-5.83	X	-36.40	-35.94	X		4.86	31	
11	MA_01_El Porvenir Cresta de gallo	2020-01-02	435647	X	-9.64		X	-70.11		X		4.86	19	
12	MA_03_Santafe La Pinera	2020-01-02	435648	X	-5.62		X	-36.70		X		4.74	26	
13	MA_04_Tunel 5 Morales	2020-01-07	435649	X	-6.20		X	-37.87		X		4.38	40	
14	pm24_mn7_AcuPavas (Duplicado)	2020-01-07	435650	X	-10.45	-10.48	X	-71.91	-72.21	X		7.69	141.5	

Tritium is reported in Tritium Units.
 1TU = 3.221 Picocuries/L per IAEA, 2000 Report.
 1TU = 0.11919 Becquerels/L per IAEA, 2000 Report.

To Contact uwEILAB:
 519 888 4732

Rick Heemsker
 uwEILAB Manager
 rkmskrk@uwaterloo.ca
 519 888 4567 ext 35838