Proyecto Mulaló - Loboguerrero

Contrato de Concesión No 001 DE 2015

Financiación, Construcción, Rehabilitación, Mejoramiento, Operación, Mantenimiento y Reversión del Corredor Mulaló - Loboguerrero

Concesionaria Nueva Vía al Mar S.A.S - COVIMAR

INGENIERÍA CORREA CORREA SAS.

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA EL TÚNEL 5 EL VALLE DEL RÍO PAVAS MUNICIPIO DE LA CUMBRE DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA PROYECTO VIAL MULALÓ - LOBOGUERRERO

07/04/2017

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 7
1.1 OBJETIVOS 7
1.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 8
1.3 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO 10
2. VULNERABILIDAD Y RIESGO POTENCIAL A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS EN EL VALLE DEL RÍO PAVAS 11
2.1 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS 11
2.1.1 Metodología GOD 11
2.1.1.1 Evaluación de la Vulnerabilidad intrínseca a la Contaminación del Acuicludo Depósitos Coluviales (Qc) 13
2.1.1.2 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Acuífero Depósitos Aluviales Recientes (Qal) 14
2.1.1.3 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Acuífero Depósitos Fluviolacustres zona occidental (Qfl) 14
2.1.1.4 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Acuífero Confinado de los Depósitos Fluviolacustres (Qfl) 15
2.1.1.5 Evaluación de la vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Acuitardo Suelos Residuales (Qsr) 15
2.1.1.6 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Formación Volcánica (Kv) 16
2.1.1.7 Resumen de la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Materiales Geológicos del Valle del Río Pavas 16
3. ANÁLISIS DE RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS EN EL VALLE DEL RÍO PAVAS 17
3.1 CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA CARGA CONTAMINATE 17
3.1.1 Evaluación del Riesgo a la Contaminación 21
4. EVALUACIÓN HIDRÁULICA 24
4.1 PRUEBAS HIDRÁULICAS EN LOS DEPÓSITOS FLUVIOLACUSTRES (Qfl) 28
4.1.1 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Piezómetro PZ-1 28
4.1.2 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Piezómetro PZ-3 29
4.1.3 Pruebas Slug de Vaciado y Llenado en el Piezómetro SPPV-05 30
4.1.4 Pruebas Slug de Vaciado y Llenado en el Piezómetro SPPV-10 31
4.2 PRUEBAS HIDRÁULICAS EN LOS SUELOS RESIDUALES (Qsr) 32
4.2.1 Pruebas Slug de Llenado en el Piezómetro ST4-05 32
4.2.2 Pruebas Slug de Llenado en el Piezómetro ST5-02B 33
4.2.3 Pruebas Slug de Llenado en el Piezómetro ST5-04B 34
4.2.4 Prueba de Bombeo a Caudal Constante en el Pozo PS4 35
4.3 PRUEBAS HIDRÁULICAS RECOPILADAS 35
4.3.1 Pruebas Hidráulicas Recopiladas en los Depósitos Fluviolacustres 36
4.3.1.1 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el PZ-4 36
4.3.1.2 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el PZ-5 36
4.3.1.3 Prueba de Bombeo a Caudal Constante en el PZ-6 37
4.3.1.4 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Pozo PO-2 37
4.3.1.5 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Pozo PO-3 37
4.3.1.6 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Aljibe A-1 38
4.3.1.7 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Aljibe A-2 38
4.3.1.8 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Aljibe A-13 39

4.3.1.9 Prueba Slug en el Piezómetro PZ-3 39
4.3.2 Pruebas Hidráulicas Recopiladas en los Suelos Residuales 39
4.3.2.1 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Pozo PO-5 39
4.3.2.2 Prueba Slug en el Piezómetro PZ-1 40
4.3.2.3 Prueba Slug en el Piezómetro PZ-2 40
4.3.3 Pruebas Hidráulicas Recopiladas para la Formación Volcánica 40
4.3.3.1 Prueba Slug de Llenado en el Piezómetro ST1-01 40
4.3.3.2 Prueba Slug de Llenado en el Piezómetro ST2-02 41
4.3.3.3 Prueba Slug de Llenado en el Piezómetro ST4-02 41
4.4 Análisis de Resultados 41
5. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 43
6. MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO 52
6.1 CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO. 52
6.2 CAUCES SUPERFICIALES Y CUERPOS DE AGUA 54
6.3 TIPOS DE ACUÍFEROS Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS 54
6.3.1 Acuífero Depósitos Fluviolacustres 54
6.3.2 Acuífero Depósitos Aluviales 55
6.3.3 Acuitardo Suelos Residuales 55
6.3.4 Acuitardo Formación Volcánica 55
6.3.5 Parámetros Hidráulicos de Unidades Hidrogeológicas 56
6.4 SIMULACIONES 58
6.4.1 Simulación en Estado Estacionario 58
6.4.1.1 Calibración del Modelo en Estado Estacionario 59
6.4.1.2 Dirección de flujo del Agua Subterránea 61
6.4.1.3 Comportamiento de las Corrientes Superficiales 63
6.5 SIMULACIONES EN ESTADO TRANSITORIO 64
6.5.1 Estado Transitorio - Escenario con Túnel 5 y Terraplén para Vía a Cielo Abierto 64
6.5.1.1 Caudales de Ingreso al Túnel 5 65
6.5.1.2 Variación de los niveles piezométricos 66
6.5.1.3 Posibles impactos sobre las corrientes superficiales y Manantiales 66
6.5.2 Estado Transitorio – Escenario con Túnel Impermeabilizado 69
6.5.2.1 Caudales de Ingreso al Túnel 5 con Impermeabilización 70
6.5.2.2 Variación de los Niveles Piezométricos 70
6.5.2.3 Posibles impactos sobre las corrientes superficiales 71
7. MONITOREO Y CONTROL 72
7.1.1 RED DE MONITOREO 72
7.1.2 SEGUIMIENTO Y MONITOREO 73
8. CONCLUSIONES 75
9. RECOMENDACIONES 78
ANEXO A. 79
ANEXO B. 80
ANEXO C. 81
ANEXO D. 82
ANEXO E. 83

FIGURAS

Figura 1. Localización del Área de Estudio 9
Figura 2.1. Metodología GOD (Foster, 1987). 12
Figura 3.1. Esquema Conceptual del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas. 22
Figura 4.1. Ubicación de las pruebas hidráulicas realizadas para el Túnel 5 en el Valle de Pavas. 27
Figura 5.1. Bloque diagrama del modelo conceptual para el área del Corregimiento de Pavas y el túnel 5, dentro del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero. 44
Figura 5.2. Topografía y relieve de la zona de estudio. 45
Figura 5.3. Corrientes superficiales de la zona de estudio. 46
Figura 5.4. Conformación geológica del área de estudio para el proyecto vial Mulaló-Loboguerrero túnel 5, Corregimiento de Pavas. 47
Figura 5.5. Depósitos cuaternarios presentes en la zona de estudio. 49
Figura 5.6. Disposición de las unidades geológicas de la zona de estudio. 50
Figura 5.7. Direcciones de flujo y comportamiento del agua subterránea corte longitudinal. 51
Figura 5.8. Direcciones de flujo y comportamiento del agua subterránea corte transversal. 51
Figura 6.1. Configuración espacial del modelo numérico en la capa 1. 53
Figura 6.2. Configuración espacial del modelo numérico en la capa 5. 53
Figura 6.3. Corte en la fila 120, por el trazado del túnel 5. 54
Figura 6.4. Vista en planta de los parámetros hidráulicos asignados a la capa 1. 57
Figura 6.5. Zonas de balance en la capa 1. 57
Figura 6.6. Grafica de la calibración del modelo en estado estacionario. 61
Figura 6.7. Direcciones de flujo en la capa 2, en condiciones naturales (Estado Estacionario). 62
Figura 6.8. Direcciones de flujo en la capa 5, en condiciones naturales (Estado Estacionario). 62
Figura 6.9. Comportamiento de los flujos verticales a la altura del acueducto de Pavas. 63
Figura 6.10. Comparación corte fila 110, evidenciando la simulación del terraplén para la vía a cielo abierto. 65
Figura 6.11. Comportamiento de los niveles piezométricos para el túnel 5, sin proceso de impermeabilización 66
Figura 6.12. Comportamiento de los caudales de los manantiales por la construcción del túnel 5. 68
Figura 6.13. Comportamiento de los caudales del manantial del acueducto de Pavas por la construcción de la vía a cielo abierto y el túnel 5. 68
Figura 6.14. Comportamiento de los niveles piezométricos para el túnel 5, con proceso de impermeabilización. 71
Figura 7.1. Flujo para el seguimiento de una Red de Monitoreo. 72

FOTOGRAFÍAS

Fotografía 4.1. Piezómetro SPPV-05, localizado margen derecho del Río Pavas, sobre Depósitos Fluviolacustres. 25
Fotografía 4.2. Piezómetro SPPV-10, localizado en la margen izquierda del Río Pavas, sobre Depósitos Fluviolacustres. 25
Fotografía 4.3. Piezómetro ST4-02, localizado en portal salida del Túnel 4, sobre Suelos Residuales (Saprolito). 25
Fotografía 4.4. Piezómetro ST5-02B, localizado al noroccidente del casco urbano de Pavas, sobre Suelos Residuales. 25
Fotografía 4.5. Piezómetro ST5-04B, localizado en portal salida del Túnel 5, sobre Suelos Residuales (Saprolito). 25
Fotografía 4.6. Piezómetro PZ-3, localizado en el callejón por la parte suroccidente del Acueducto de Pavas, sobre Depósitos Fluviolacustres. 25
Fotografía 4.7. Toma de nivel inicial en el PZ-1 antes del inicio de la prueba de bombeo. 29
Fotografía 4.8. Ejecución de la prueba de bombeo a caudal constante en el PZ-1. 29
Fotografía 4.9. Instalación de tubería para prueba de bombeo en el PZ-3. 30
Fotografía 4.10. Bombeo durante la ejecución de prueba de bombeo PZ-3. 30
Fotografía 4.11. Ejecución de prueba Slug de vaciado en el SPPV-05. 31
Fotografía 4.12. Ejecución de prueba Slug de llenado en el SPPV-05. 31
Fotografía 4.13. Toma de niveles antes del inicio de la prueba Slug de vaciado en el piezómetro SPPV-10. 32
Fotografía 4.14. Ejecución prueba Slug de llenado en el piezómetro SPPV-10. 32
Fotografía 4.15. Toma de profundidad e instalación de Mini-Diver en el piezómetro ST4-05. 33
Fotografía 4.16. Prueba Slug de llenado en el piezómetro ST4-05. 33
Fotografía 4.17. Instalación de Mini-Diver en el piezómetro ST5-02B. 34
Fotografía 4.18. Prueba Slug de llenado en el piezómetro ST5-02B. 34
Fotografía 4.19. Instalación de Mini-Diver en el piezómetro ST5-02B. 34
Fotografía 4.20. Prueba Slug de llenado en el piezómetro ST5-02B. 34
Fotografía 4.21. Instalación Equipo de Bombeo y Mini-Diver en el Pozo PS4. 35
Fotografía 4.22. Ejecución de la prueba de bombeo en el Pozo PS4. 35

TABLAS

Tabla 2.1. Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad de las unidades hidrogeológicas mediante la metodología - GOD. 16
Tabla 3.1. Actividades potencialmente generadoras de contaminación en el subsuelo. 18
Tabla 3.2. Clasificación de cargas contaminantes de fuentes puntuales asociadas a las actividades contaminantes en el Valle del Río Pavas y las asociadas a la construcción del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero. 19
Tabla 3.3. Clasificación de cargas contaminantes de fuentes difusas asociadas a las actividades contaminantes en el Valle del Río Pavas 20
Tabla 3.4. Concentración Relativa del Contaminante. 20
Tabla 3.5. Probabilidad de Carga Contaminante. 21
Tabla 3.6. Determinación grado de riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas en el Valle del Río Pavas. 23
Tabla 4.1. Características de las perforaciones en las que se realizaron las pruebas hidráulicas. 24
Tabla 4.2. Características de las perforaciones de Pruebas Hidráulicas recopiladas. 27
Tabla 4.3. Resultados de las Pruebas Hidráulicas Realizadas y Recopiladas. 42
Tabla 4.4. Parámetros promedios de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio. 43
Tabla 5.1. Principales parámetros hidráulicos y características de las corrientes superficiales. 47
Tabla 6.1. Parámetros hidráulicos asignados a las corrientes superficiales del área de estudio. 54
Tabla 6.2. Parámetros hidráulicos asignados al modelo numérico hidrogeológico. 56
Tabla 6.3. Piezómetros y niveles utilizados en la calibración del modelo numérico hidrogeológico. 58
Tabla 6.4. Niveles observados y calculados en estado estacionario 60
Tabla 6.5. Interacción de las corrientes superficiales en estado estacionario 63
Tabla 6.6. Interacción de las corrientes superficiales en estado estacionario 64
Tabla 6.7. Caudales de ingreso al túnel 5, sin mitigación. 65
Tabla 6.8. Balance de las corrientes superficiales al final de la construcción del túnel 5 y la vía a cielo abierto. 67
Tabla 6.9. Balance de las corrientes superficiales al final del periodo simulado (10 años) con la construcción del túnel 5 y la vía a cielo abierto. 67
Tabla 6.10. Sistema de clasificación del macizo rocoso (Bieniawski 1989) 69
Tabla 6.11. Caudal de ingreso al túnel por cada 10 metros para la simulación del túnel sin impermeabilizar. 69
Tabla 6.12. Caudales de ingreso al túnel 5, con tratamiento de impermeabilización. 70
Tabla 6.13. Balance de las corrientes superficiales 71
Tabla 7.1. Red de monitoreo propuesta para el Valle del Río de Pavas. 73

1. INTRODUCCIÓN

La firma INGENIERÍA CORREA CORREA SAS suscribe un Contrato de Prestación de Servicio con la firma PROINSA LTDA, para la realización del Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico para el Túnel 5 en el Valle del Río Pavas en el Municipio de la Cumbre Departamento del Valle del Cauca, basado en la recopilación y análisis de la información geológica e hidrogeológica secundaria suministrada e incluyendo la ejecución en campo de pruebas hidráulicas de bombeo y slug. El Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico está dirigido a evaluar los probables impactos que pueda ocasionar en el recurso hídrico subterráneo y superficial, la construcción del proyecto Vial Mulaló – Loboguerrero en el Valle del Río Pavas en un área 38.9 Km^2, abarcando la construcción del Túnel 5.

La acción constructiva de los túneles puede ocasionar impactos significativos en los sistemas hídricos subterráneos y superficiales, originando variaciones de los niveles freáticos como también cambios localizados en el caudal de los manantiales y la dirección del flujo subterráneo, causando con ello el decrecimiento o desaparición del caudal base de algunas corrientes superficiales, al convertirse la obra en colector de aguas. En cuanto a la construcción como tal, los flujos asociados a las aguas subterráneas son vinculados a aspectos negativos durante la edificación de túneles, debido a que el manejo de estas aguas puede afectar tanto la estabilidad de la obra como los tiempos de ejecución de la misma.

Se hace evidente que además de la conservación, debe tenerse en consideración la prevención a la desaparición y disminución de caudales de manantiales, debido a que gran parte de ella se comporta como una zona de recarga y descarga natural de acuíferos que contribuyen al flujo base de las corrientes superficiales. El estudio geológico e hidrogeológico es la base para desarrollar los Modelos Conceptual y Numérico, que se convierte en una herramienta imprescindible para la toma de decisiones preliminares. En teoría, en la medida que un modelo se aproxime a las condiciones actuales de la naturaleza, mejores resultados se obtendrán de acuerdo al detalle de la información primaria y secundaria disponible.

1.1 OBJETIVOS

Cuantificar los impactos que pueden generarse por el paso del proyecto Vial Mulaló – Loboguerrero por el Valle del Río Pavas y la construcción del Túnel 5, mediante la elaboración de Modelo Conceptual y Numérico del área de estudio.

Para dar cumplimiento se definieron los siguientes objetivos específicos:

Analizar la información secundaria existente, relacionada con estudios geológicos actualizados, otorgados por la empresa contratante, desarrollados para la zona de estudio del Valle del Río Pavas.

Ejecutar pruebas hidráulicas en los piezómetros existentes para obtener los parámetros hidráulicos tales como Conductividad, Transmisividad y Coeficiente de almacenamiento.

Actualizar el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación teniendo como base los resultados de las pruebas hidráulicas.

Realizar el análisis de riesgo a la contaminación de los acuíferos de la zona de estudio.

Establecer el modelo conceptual para el área de estudio y el comportamiento del recurso hídrico.

Elaborar el modelo hidrogeológico numérico, que permita evaluar los posibles impactos que se cause al recurso hídrico subterráneo y superficial de la zona, así como el volumen de agua que se infiltrara al interior del túnel durante su construcción.

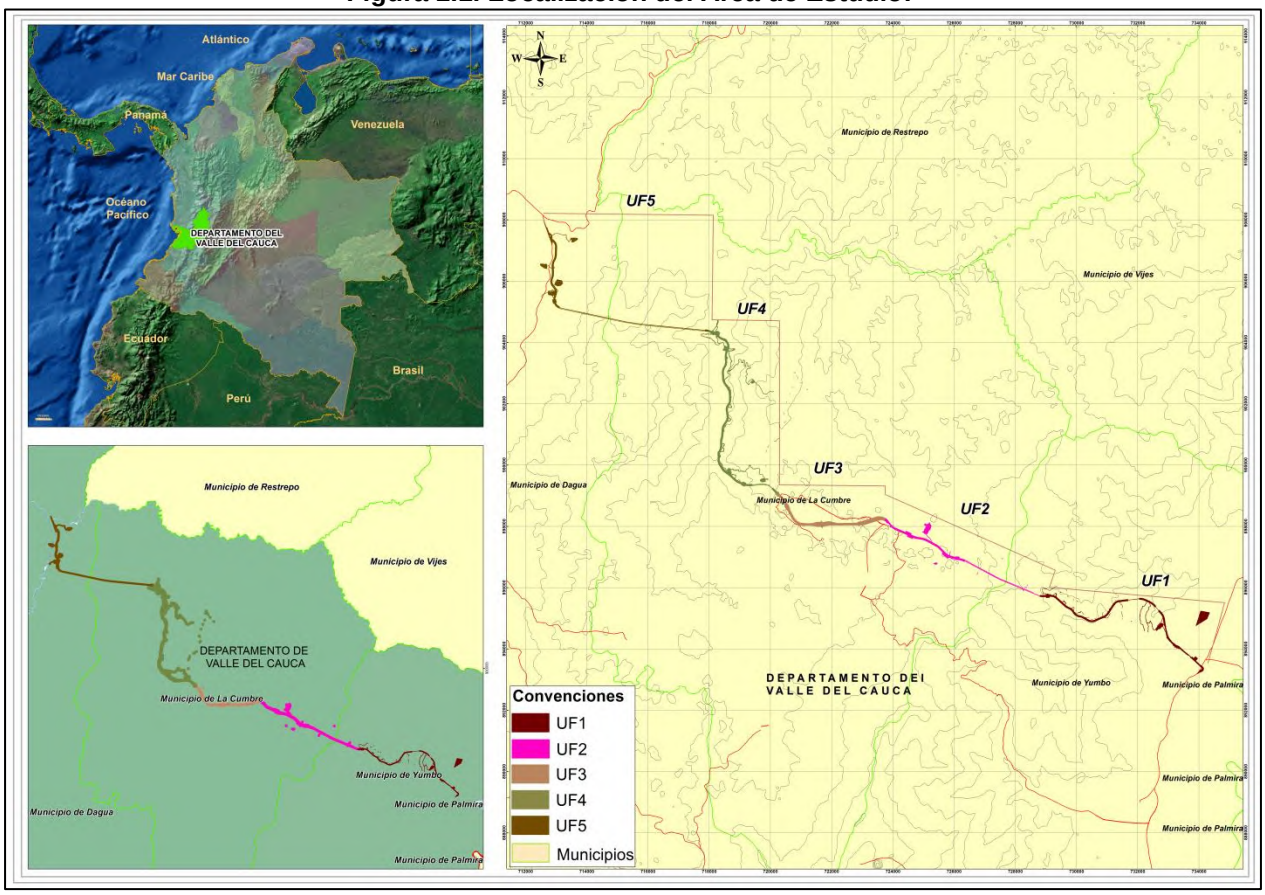
Establecer la Red de Monitoreo para el área de estudio.

1.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la región Sur-Occidental de la Cordillera Occidental en la Sub-Cuenca del Río Pavas, aproximadamente a 50.0 Km al SE de la ciudad de Cali, en la jurisdicción del Corregimiento de Pavas perteneciente al Municipio de La Cumbre, en el Departamento del Valle del Cauca.

El área total del proyecto se encuentra limitada al Norte por las estribaciones de rocas volcánicas meteorizadas aledañas al Carreteable que conduce a la población de Pavas, al Sur por las estribaciones meridionales del valle igualmente constituidas por suelo residual o saprolito producto de la alteración de las rocas volcánicas, al Oriente por las estribaciones que conducen a la cabecera municipal de La Cumbre y al Occidente por las colinas sub-redondeadas que conforman el cierre del mencionado Valle.

Figura 1.1. Localización del Área de Estudio.



Fuente: Proinsa Ltda., 2017.

1.3 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

La elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico para el proyecto Vial Mulaló – Loboguerrero en el paso por el Valle del Río Pavas y la construcción del Túnel 5, está dirigido a conocer el comportamiento de las diferentes unidades hidrogeológicas y las relaciones existentes con el agua superficial, con el fin de determinar los posibles impactos que se pueda causar al recurso hídrico y principalmente sobre los manantiales que abastecen el acueducto de Pavas.

INGENIERÍA CORREA CORREA S.A.S, planteo una serie de actividades encaminadas al cumplimiento de los objetivos propuestos, se dio inicio con la recopilación y análisis de información existente obteniendo la información para la elaboración del Modelo Conceptual del área de estudio, detectando las carencias e incompatibilidades en la información para ser complementadas en las etapas siguientes de la investigación.

Para la recopilación y análisis de información se tuvo en cuenta toda la información que sobre investigación de aguas subterráneas exista en el área de estudio tales como: estudios geológicos, columnas estratigráficas de pozos, perfiles geológicos, inventario de captaciones de agua subterránea, estudios hidrológicos, prospección geoeléctrica, registros eléctricos de pozos, y modelos hidrogeológicos. La información recopilada es filtrada y analizada con base en criterios técnicos de acuerdo a cada una de las actividades a desarrollar.

Posteriormente se realizó la inspección y selección de los piezómetros y pozos para la ejecución de pruebas hidráulicas encaminadas a establecer los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio.

Para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación se empleó la metodología GOD, desarrolladas por Foster y Aller et al. (1987). Para el método GOD se consideran tres (3) parámetros de evaluación: el parámetro “G” (Groundwater) referido a la condición de confinamiento del acuífero, el parámetro “O” (Overall o Substrato Litológico) que incluye una caracterización de la zona que suprayace al acuífero, en cuanto a la naturaleza litológica y al grado de consolidación y fracturamiento de la roca y por último el parámetro “D” (Depth) que representa la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados. Se otorga un puntaje a cada variable de acuerdo con su capacidad de atenuación. Una vez valorado cada parámetro, se calcula el Índice de Vulnerabilidad total multiplicando los valores asignados a cada parámetro, obteniéndose valores de 0 a 1, donde el índice cero “0” indica una vulnerabilidad despreciable, mientras que el índice “1”, revela una vulnerabilidad extrema a la contaminación.

Basados en la información recopilada y los resultados del procesamiento de la información recopilada en campo se procedió a establecer las interacciones que se presentan entre los diferentes componentes del sistema hidrogeológico de la zona con el fin de conformar el modelo Hidrogeológico Conceptual, en el cual se explica de forma cualitativa y conceptual el comportamiento del sistema hídrico subterráneo mediante bloques diagrama construidos en el software Visual Modflow 3D.

Con el fin de poder cuantificar y buscar una representación lo más aproximada a la realidad se transforma el Modelo Conceptual en un Modelo Hidrogeológico Numérico, el cual integra cada uno de los componentes y representa el sistema hidrogeológico de la zona bajo las condiciones actuales (naturales), para posteriormente realizar simulaciones que representen la intervención por la construcción del terraplén en el Valle de Pavas y la construcción del Túnel 5, permitiendo cuantificar los posibles impactos y las medidas de mitigación de los mismos. El modelo se realiza

en el software Visual Modflow 2011.1.

2. VULNERABILIDAD Y RIESGO POTENCIAL A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS EN EL VALLE DEL RÍO PAVAS

La evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo potencial a la contaminación de los acuíferos, se basa en el análisis del índice de vulnerabilidad de los acuíferos mediante la metodología GOD (Foster, 1987) y la caracterización de las obras o actividades que se desarrollaran dentro del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero, así como las actividades que actualmente se desarrollan en el Valle del Río Pavas que puedan generar contaminación potencial al sistema hídrico subterráneo, clasificando la carga contaminante mediante el método POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*). Estas dos variables se relacionan para determinar el riesgo a la contaminación de los acuíferos del Valle del Río Pavas.

2.1 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

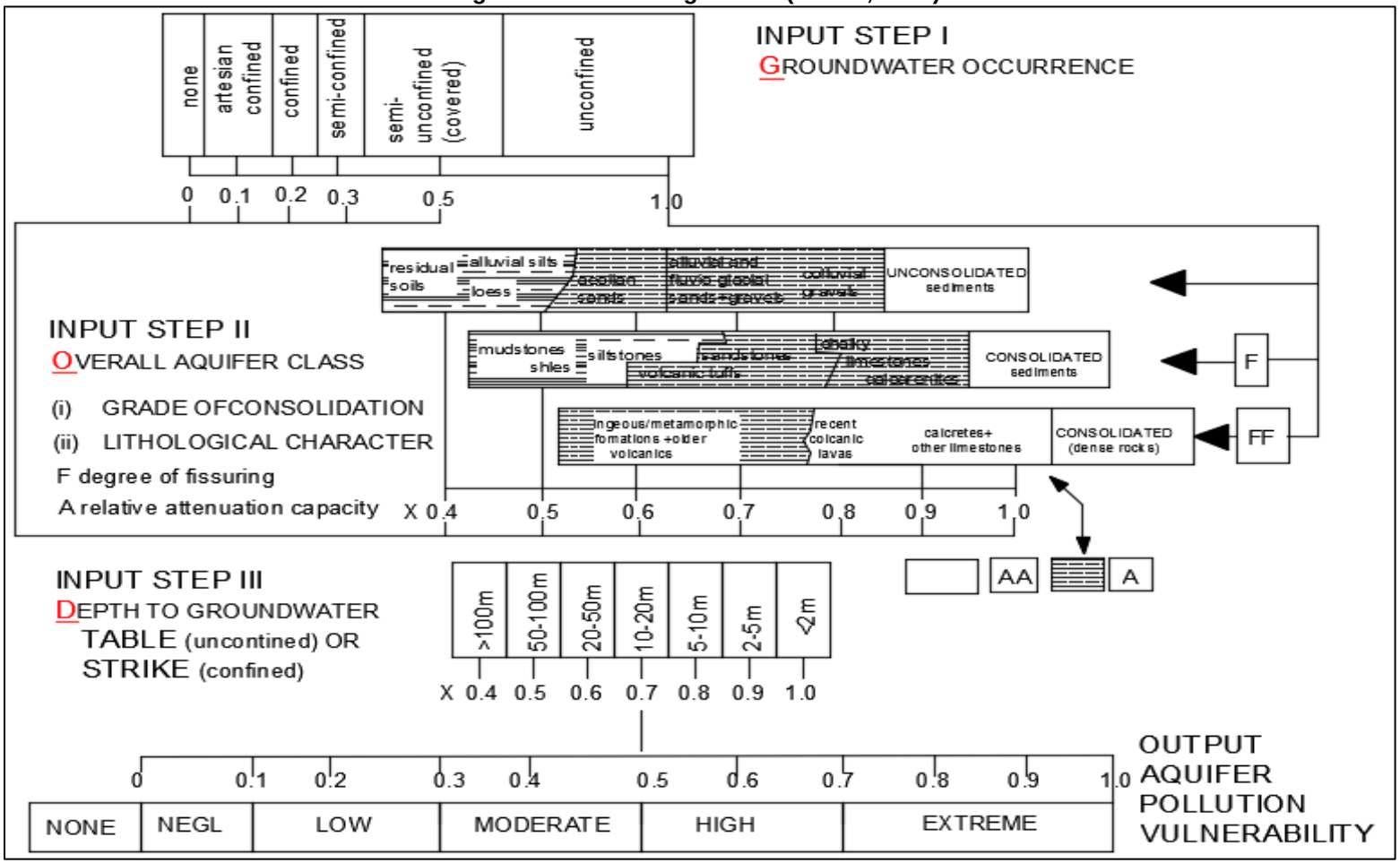
La vulnerabilidad ante la contaminación del agua subterránea es una propiedad cualitativa, relativa, no medible y adimensional, que tiene por objeto establecer el grado de defensa natural del sistema ante la alteración potencial de la calidad del agua subterránea, establecida por las propiedades físicas del medio no saturado, que lo convierten en una herramienta para la toma de decisiones frente a la protección del mencionado recurso. De forma genérica, el cálculo de la vulnerabilidad de un acuífero se puede realizar cualitativamente, estableciendo un índice de vulnerabilidad muy alta, alta, media, baja o nula.

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación establece la facilidad con la cual ingresan las sustancias que puedan degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración directa a través del suelo o de la zona no saturada. Foster (1987) define la vulnerabilidad como la susceptibilidad del agua subterránea a ser afectada adversamente por cargas contaminantes aplicadas en la superficie.

2.1.1 Metodología GOD

El método GOD, es un método sencillo y sistemático, usándose cuando se cuenta con escasos datos o no cubren la totalidad del territorio que se estudia. Considera tres parámetros de evaluación: “G” Ocurrencia del agua subterránea, hace relación al tipo de acuífero (confinado, semiconfinado, inconfinado.) o confinamiento hidráulico de las aguas subterráneas, en el acuífero considerado; “O” para los estratos suprayacentes (zona vadosa o lechos confinantes) en términos de carácter litológico y grado de consolidación que determinan la capacidad de atenuación de contaminantes; y, “D” para la profundidad a la que se halla el nivel del agua subterránea desde la superficie. El índice GOD da un puntaje a cada variable, una vez valorado cada parámetro se calcula el Índice de Vulnerabilidad total, multiplicando los valores asignados a cada parámetro, obteniéndose valores de cero “0” a uno “1”, donde un índice cero “0” indica una vulnerabilidad despreciable y un índice “1” una vulnerabilidad extrema a la contaminación. En la Figura 2.1, se muestra la Metodología GOD desarrollada por Foster (1987) para evaluar el Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de los Acuíferos.

Figura 2.1. Metodología GOD (Foster, 1987).



Fuente: Foster 1987.

- **Ocurrencia del Agua Subterránea. - Parámetro "G"**

La condición de confinamiento de los Acuíferos es una función que interviene directamente en la vulnerabilidad natural del agua subterránea ante una contaminación potencial, ya que en general en acuíferos confinados o cautivos, con un espesor considerable de capa confinante el acceso de posibles contaminantes es más restringido.

- **Substrato Litológico Suprayacente. - Parámetro "O"**

Este parámetro incluye una caracterización global de la zona que suprayace al acuífero o zona no saturada, evaluando el grado de consolidación y el tipo de litología que conforma la cobertura del acuífero considerado y teniendo en cuenta también el grado de fisuramiento y la capacidad de atenuación relativa del material geológico de la zona de aireación, evaluando indirectamente características como porosidad, permeabilidad y retención específica de humedad.

La importancia de la zona no saturada en la evaluación de la vulnerabilidad radica en su potencial para la intercepción, sorción y eliminación de bacterias y virus patógenos; para la atenuación de minerales pesados y químicos orgánicos a través de precipitación, para la sorción e intercambio catiónico y para la sorción y biodegradación de algunos compuestos orgánicos de origen natural o sintético. Sin embargo, la zona no saturada puede en ocasiones actuar sólo como un retardante del efecto contaminante, cuando se enfrenta a contaminantes móvil y persistente.

- **Profundidad de la Tabla de Agua o Techo del Acuífero Confinado. - Parámetro "D"**

Esta hace referencia a la profundidad del nivel del agua subterránea o nivel freático para acuíferos libres y el techo del acuífero, si éste es confinado. Para lo cual Foster (1987) ha definido estos rangos:

< 2 metros = calificación de 1
2 – 5 m = calificación de 0.9
5 – 10 metros = calificación de 0.8
10 – 20 m = calificación de 0.7
20 – 50 metros = calificación de 0.6
50 – 100 m = calificación de 0.5
> 100 metros = calificación de 0.4

De forma lógica entre más profunda se encuentre la superficie freática el Acuífero es menos vulnerable a la contaminación.

2.1.1.1 Evaluación de la Vulnerabilidad intrínseca a la Contaminación del Acuicludo Depósitos Coluviales (Qc)

Los Depósitos Coluviales (Qc), se clasifica como acuicludo por no permitir el almacenamiento del agua subterránea, esta característica se le asigna al Parámetro "G" un valor de 0, teniendo en cuenta que el material geológico que cubre dicho acuífero está conformado por fragmentos y cantos subredondeados de rocas volcánicas, embebidos en una matriz arcillosa y limo-arcillosa, para el parámetro "O" se le confiere un valor de 0.4, por ser un acuicludo no posee ninguna retención de agua y los niveles estáticos son nulos,

por lo cual para el Parámetro “D” no se le fija ningún valor, ya que no tiene ninguna importancia hidrogeológica.

De esta manera se tiene la siguiente operación:

$$IV = Ocurrencia\ del\ agua\ subterranea\ \times\ Sustrato\ litológico \times\ Distancia\ al\ agua$$

$$\boldsymbol{IV = 0.0 \times 0.4 \times 0.0 = 0.0}$$

De acuerdo a la ecuación del índice de vulnerabilidad, los Depósitos Coluviales tienen un índice de 0.00, indicando con ello que la vulnerabilidad a la contaminación es nula.

2.1.1.2 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Acuífero Depósitos Aluviales Recientes (Qal)

El acuífero Depósitos Aluviales Recintos (Qal), está constituido por depósitos heterogéneos de materiales desde arcillas hasta arenas, siendo este un acuífero de tipo libre muy local, basados en su clasificación se le confiere un valor de 1.0 al Parámetro “G”. Al Parámetro “O” se le asigna un valor de 0.5, dado que la composición del material está conformada por arcillas, arenas y algunos bloques de rocas de la formación volcánica; así mismo se estiman unos niveles estáticos de 2.0 m, esto implica que para el Parámetro “D” se le otorga un valor de 0.9. Según lo anterior obtenemos la siguiente operación:

$$IV = Ocurrencia\ del\ agua\ subterránea\ \times\ Sustrato\ litológico \times\ Distancia\ al\ agua$$

$$\boldsymbol{IV = 1.0 \times 0.5 \times 0.9 = 0.45}$$

El resultado final del cálculo para el índice de GOD es de 0.45, lo cual indica que el grado de vulnerabilidad para esta unidad hidrogeológica es moderado.

2.1.1.3 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Acuífero Depósitos Fluviolacustres zona occidental (Qfl)

El acuífero Depósitos Fluviolacustres zona occidental, se clasifica hidrogeológicamente como un acuífero de tipo libre, ante lo cual el valor asignado para el parámetro “G” es de 1.0. La parte superior de esta unidad hidrogeológica se identifican capas de arcilla, limos arcillosos y en algunas zonas suelos orgánicos, en espesores de 5 a 10 metros, subyaciendo se presentan arenas finas y gruesas, a la base de estos depósitos se encuentran intercalaciones de gravas finas con limos arenosos, se le otorga al Parámetro “O” el valor de 0.7, de acuerdo a las medidas tomadas en campo la profundidad del nivel del agua subterránea en esta unidad hidrogeológica se encuentra entre 14.5 y 2 m, por lo cual se asigna un valor de 0.9 al Parámetro “D”.

De esta manera se tiene la siguiente operación:

$$IV = Ocurrencia\ del\ agua\ subterranea\ \times\ Sustrato\ litológico \times\ Distancia\ al\ agua$$

$$\boldsymbol{IV = 1.0 \times 0.7 \times 0.9 = 0.63}$$

Considerando el resultado de la valoración de los tres parámetros para el índice de Vulnerabilidad del Acuífero, se obtiene un valor de 0.63. Dicho resultado muestra que la vulnerabilidad a la contaminación, de los Depósitos Fluviolacustres con comportamiento libre, es ALTO.

2.1.1.4 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Acuífero Confinado de los Depósitos Fluviolacustres (Qfl)

El acuífero Depósitos Fluviolacustres zona oriental, se clasifica como un acuífero confinado, ante lo cual el valor asignado para el parámetro "G" es de 0.2. Se identifican capas de arcilla, limos arcillosos y en algunas zonas suelos orgánicos, subyaciendo se presentan arenas finas y gruesas, a la base de estos depósitos se encuentran intercalaciones de gravas finas con limos arenosos, se le otorga al Parámetro "O" el valor de 0.7 De acuerdo a las medidas tomadas en campo, la profundidad del nivel del agua subterránea en esta unidad hidrogeológica se encuentra entre 23.06 y -0,20 m, por lo cual se asigna el valor más restrictivo 1.0 al Parámetro "D".

De esta manera se tiene la siguiente operación:

$$IV = Ocurrencia\ del\ agua\ subterranea\ \times\ Sustrato\ litológico \times\ Distancia\ al\ agua$$

$$\boldsymbol{IV = 0.2 \times 0.7 \times 1.0 = 0.14}$$

Según el resultado final para el índice de vulnerabilidad del Acuífero confinado de los Depósitos Fluviolacustres zona oriental, se obtiene un valor de 0.14, indicando con ello que la vulnerabilidad a la contaminación es Baja.

2.1.1.5 Evaluación de la vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Acuitardo Suelos Residuales (Qsr)

Los Suelos Residuales (Qsr), se clasifican como un acuitardo de extensión regional de tipo confinado, ante lo cual el valor asignado para el parámetro "G" es de 0.2. Se identifican capas de debido a su composición de fragmentos de rocas volcánicas, embebidas en saprolito limo arcilloso, debajo de estas capas se presentan arenas y limos, diabasas meteorizadas, se le otorga al Parámetro "O" el valor de 0.6, de acuerdo a las medidas tomadas en campo, la profundidad del nivel del agua subterránea en esta unidad hidrogeológica se encuentra entre 28.0 y 0.05 m, por lo cual se asigna el valor más restrictivo 1.0 al Parámetro "D".

De esta manera se tiene la siguiente operación:

$$IV = Ocurrencia\ del\ agua\ subterranea\ \times\ Sustrato\ litológico \times\ Distancia\ al\ agua$$

$$\boldsymbol{IV = 0.2 \times 0.6 \times 1.0 = 0.12}$$

Según el resultado final para el índice de vulnerabilidad del Acuitardo Suelos Residuales, se obtiene un valor de 0.12, indicando con ello que la vulnerabilidad a la contaminación es baja.

2.1.1.6 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Formación Volcánica (Kv)

Esta unidad hidrogeológica se considera, por su alto grado de fracturamiento y afloramiento superficial como acuitardo de comportamiento libre, por lo cual se le asigna un valor de 1.0 para el parámetro “G”; en lo que respecta a la zona no saturada, el parámetro “O”, por su composición de lavas basálticas, brechas volcánicas, diabasas con un alto grado de fracturamiento se le confiere un valor 0.8. Se tiene que el nivel estático en esta unidad puede estar entre 20 m y 100 m, por lo que se le asigna un valor de 0.6 al Parámetro “D”.

Por tanto, tenemos la siguiente operación:

$$IV = Ocurrencia\ del\ agua\ subterranea\ \times\ Sustrato\ litológico \times\ Distancia\ al\ agua$$

$$\boldsymbol{IV = 1.0 \times 0.8 \times 0.6 = 0.48}$$

De acuerdo al resultado de la valoración de los tres parámetros para el índice de Vulnerabilidad de la Formación Volcánica se calcula en 0.48, lo cual indica que la vulnerabilidad a la contaminación es Moderada.

2.1.1.7 Resumen de la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Materiales Geológicos del Valle del Río Pavas

En la Tabla 2.1, se muestran los resultados del índice de vulnerabilidad, para las unidades hidrogeológicas presentes en el Valle del Río Pavas. En el ANEXO A se presenta el mapa de la vulnerabilidad obtenido a partir de la correlación de los parámetros de evaluación, para cada una de las unidades hidrogeológicas.

Tabla 2.1. Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad de las unidades hidrogeológicas mediante la metodología - GOD.

Unidad Hidrogeológica	Indicie de Vulnerabilidad
Depósitos Coluviales (Qc)	0.0
Depósitos Aluviales (Qal)	0.45
Depósitos Fluviolacustres zona occidental (Qfl)	0.63
Depósitos Fluviolacustres zona oriental (Qfl)	0.14
Formación Volcánica (Qsr)	0.12
Formación Volcánica (Kv)	0.48

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

3. ANÁLISIS DE RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS EN EL VALLE DEL RÍO PAVAS

El análisis del riesgo de la contaminación está orientado a determinar el posible efecto de las diferentes actividades que se desarrollan actualmente en el Valle del Río Pavas, así como de las futuras obras relacionadas con la construcción del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero sobre las aguas subterráneas del Valle del Río Pavas. Para la evaluación de la carga contaminante se aplicó el método POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*) propuesta por Foster y Hirita (1988) y revisado por Foster et al. (2001).

3.1 CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA CARGA CONTAMINATE

Con el fin de realizar un análisis del riesgo de contaminación de los acuíferos se debe iniciar con la caracterización de la carga contaminante, partiendo de la clasificación de las actividades antrópicas en el subsuelo, donde es clave la diferenciación entre la contaminación por fuentes puntuales o fuentes difusas. En la
Tabla **3.1**, se presentan las actividades potencialmente generadoras de contaminación al subsuelo.

Como tal no se han establecido actividades directamente relacionadas con la construcción de proyectos viales y túneles, por lo cual en la
Tabla **3.1**, se resalta en color gris las actividades potencialmente contaminantes que se pueden relacionar con la construcción del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero, como lo son:

- ✓ Construcción e instalación Campamentos
- ✓ Construcción de vías industriales
- ✓ Plantas (concreto y materiales de construcción)
- ✓ Parqueaderos, talleres y lavado de maquinarias
- ✓ Almacenamiento de combustibles, sustancias peligrosas y residuos peligrosos
- ✓ Puntos de vertimientos

Estas obras o actividades son fuentes de contaminación puntual y se clasifican como desarrollo urbano, industrial y extracción minera, como se puede observar en la
Tabla **3.1**, igualmente se presentan las actividades que actualmente se desarrollan en el Valle del Río Pavas, como cultivos extensivos, vertimientos y el trazado del poliducto que pueden ser fuentes de contaminación.

Tabla 3.1. Actividades potencialmente generadoras de contaminación en el subsuelo.

ACTIVIDAD	Característica de la Carga Contaminante			
	Categoría de Distribución	Principales Tipos de Contaminantes	Relativa Carga Hidráulica	Descarga bajo el subsuelo
DESARROLLO URBANO				
Saneamiento sin alcantarillado	u/r P-D	n f o t	+	*
Fugas de desagües	u P-L	o f n t	+	
Lagunas de oxidación de desagües	u/r P	o f n t	++	*
Descarga de aguas residuales en el suelo	u/r P-D	n s o f t	+	
Aguas residuales en ríos	u/r P-L	n o f t	++	**
Lixiviación de rellenos	u/r P	o s h t		*
Tanques de almacenamiento de combustible	u/r P-D	t		
Sumideros de drenaje de las carreteras	u/r P-D	s t	+	**
PRODUCCIÓN INDUSTRIAL				
Tanques o tuberías con fugas	u P-D	t h		
Derrames accidentales	u P-D	t h	+	
Lagunas de efluentes	u P	t o h s	++	*
Descarga de efluentes en el suelo	u P-D	t o h s	+	
Descarga de efluentes en los ríos	u P-L	t o h s	++	**
Lixiviación de Botaderos	u/r P	o h s t		
Drenaje por sumideros	u/r P	t h	++	**
Precipitaciones aéreas	u/r D	s t		
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA - CULTIVO DEL SUELO				
Con agroquímicos	r D	n t		
Con agroquímicos y riego	r D	n t s	+	
Con lodos	r D	n t s o		
Riego de aguas residuales	r D	n t o s f	+	
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA - CRÍA DE GANADO/PROCESOS DE COSECHA				
Lagunas de efluentes	r P	f o n t	++	*
Descarga de efluentes en el suelo	r P-D	n s o f t		
Descarga de efluentes al río	r P-L	o n f t	++	**
EXTRACCIÓN MINERA				
Alteración del régimen hidráulico	r/u P-D	s h		
Descarga de aguas de drenaje	r/u P-D	h s	++	**
Aguas de procesos	r/u P	h s	+	*
Lixiviación de Botaderos	r/u P	s h		

u/r: urbana/rural; P-L-D: puntual-lineal-difusa; n: compuestos de nutrientes; f: patógenos fecales; o: carga orgánica general; s: salinidad; h: metales pesados; t: microorganismos tóxicos

Fuente: Ingeniería Correa Correa SAS 2017, Basado en Foster et. al. 2001.

El método POSH establece una clasificación de actividades en tres niveles: reducido, moderado y elevado, basado en el tipo de compuestos químicos utilizados o manejados, la carga hidráulica asociada y la relación espacial como la localización de la actividad, el tipo de actividad y tamaño y en el uso o disponibilidad de agua. En la Tabla 3.2, se presentan las clasificaciones establecidas en el método POSH para las diferentes cargas

contaminantes actualmente presentes en el Valle del Río Pavas y las aplicables a la construcción del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero y en la Tabla 3.2 se presenta la clasificación de cargas contaminantes de fuentes dispersa.

Tabla 3.2. Clasificación de cargas contaminantes de fuentes puntuales asociadas a las actividades contaminantes en el Valle del Río Pavas y las asociadas a la construcción del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero.

Potencial de generación de carga contaminante	Fuente de contaminación			
	Industria	**Lagunas de efluentes**	**Urbanas**	**Explotación minera y petrolera**
Elevado (0.65 -1.0)	-Industrias tipo 3 -Cualquier actividad que maneje > 100 kg/día de sustancias químicas	-Efluentes de industria tipo 3 -Cualquier efluente (excepto aguas residenciales) si el área > 5 ha	-Terrenos abandonados	-Campos de pozos de petróleo -Minas metalíferas y de no inertes
Moderado (0.3 - 0.65)	-Industrias tipo 2	-Agua residencial si el área > 5 ha -Todos los demás casos	-Gasolineras -Rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	-Explotación de materiales inertes
Reducido (0 – 0.3)	-Industrias tipo 1	-Efluente residencial, urbano mixto, agroindustrial y minero no metalífero si el área < 1 ha	-Cementerios	
Industrias de tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos; Industrias de tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones; Industrias de tipo 3: talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufactura de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal.				

Fuente: Ingeniería Correa Correa SAS 2017, Tomado y modificado de Foster et. al. 2001.

Basados en las actividades potencialmente contaminantes (
Tabla **3.1**), se subraya en la Tabla 3.2, las diferentes clasificaciones aplicables a la construcción del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero, según la fuente de contaminación.

Actualmente en el Valle del Río Pavas se desarrollan actividades de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo; se desarrolla un centro poblado y sistemas de alcantarillado mediante pozos sépticos, por lo cual en la Tabla 3.3, se subrayan las actividades que actualmente se desarrollan en el Valle del Río Pavas y que pueden ser potencialmente contaminantes de las aguas subterráneas.

Tabla 3.3. Clasificación de cargas contaminantes de fuentes difusas asociadas a las actividades contaminantes en el Valle del Río Pavas

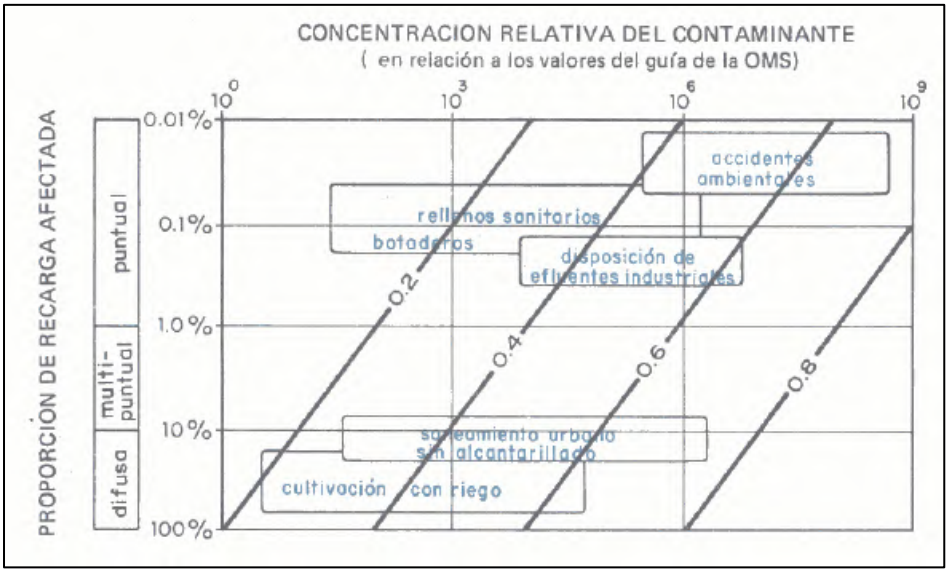
Potencial de generación de carga contaminante	Fuente de contaminación	
	Saneamiento in situ	Prácticas agrícolas
Elevado (0.65 -1.0)	Cobertura de la red de alcantarillado < 25 % Densidad poblacional > 100 hab/ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia en el riego, pastoreo intensivo sobre praderas altamente fertilizadas.
Moderado (0.3 - 0.65)	Intermedio	Los demás casos
Reducido (0 – 0.3)	Cobertura de la red de alcantarillado > 75 % Densidad poblacional < 50 hab/ha	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en tierras áridas (< 250 mm/año)

Fuente: Ingeniería Correa Correa SAS 2017, Tomado y modificado de Foster et. al. 2001.

En las diferentes actividades de construcción vial, así como en la operación de los proyectos viales se pueden dar incidentes ambientales con derrames de químicos con una alta concentración del contaminante. Estos incidentes son fuentes de contaminación puntual y se relacionan con la proporción de recarga afectada o la probabilidad de la carga en relación con el tiempo que se demore en subsanar el incidente.

Para poder obtener el valor de la carga contaminante se tendrán en cuenta las gráficas de probabilidad de carga y de concentración relativa del contaminante presentadas por Foster et. al. 2001.

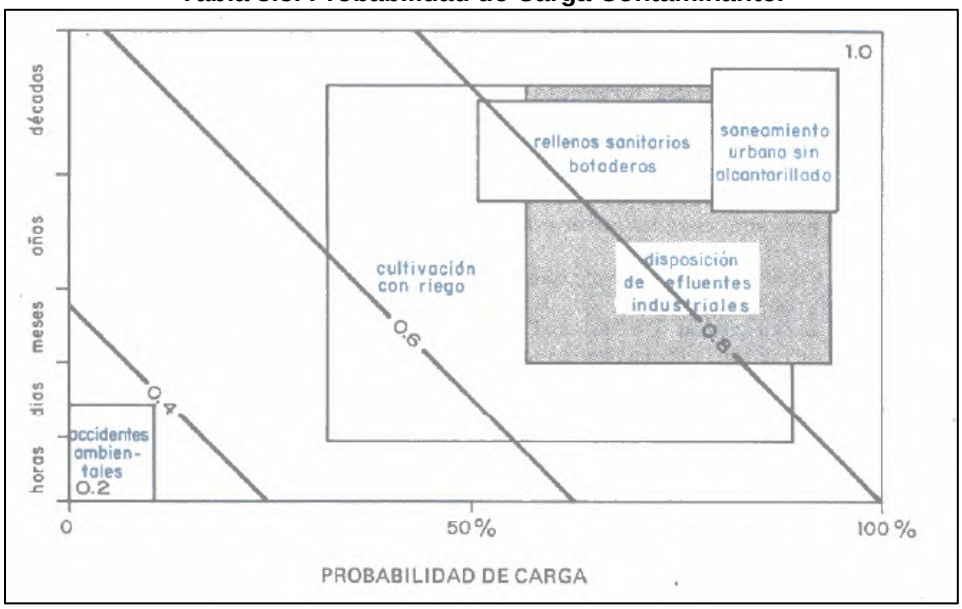
Tabla 3.4. Concentración Relativa del Contaminante.



Fuente: Foster et. al. 2001.

Se parte de la hipótesis que un derrame de químicos (incidente ambiental) en el área del Valle del Río Pavas, será una afectación puntual de la recarga y una concentración máxima del contaminante, por lo cual la carga contaminante seria catalogada como de 0,8 (elevada).

Tabla 3.5. Probabilidad de Carga Contaminante.



Fuente: Foster et. al. 2001.

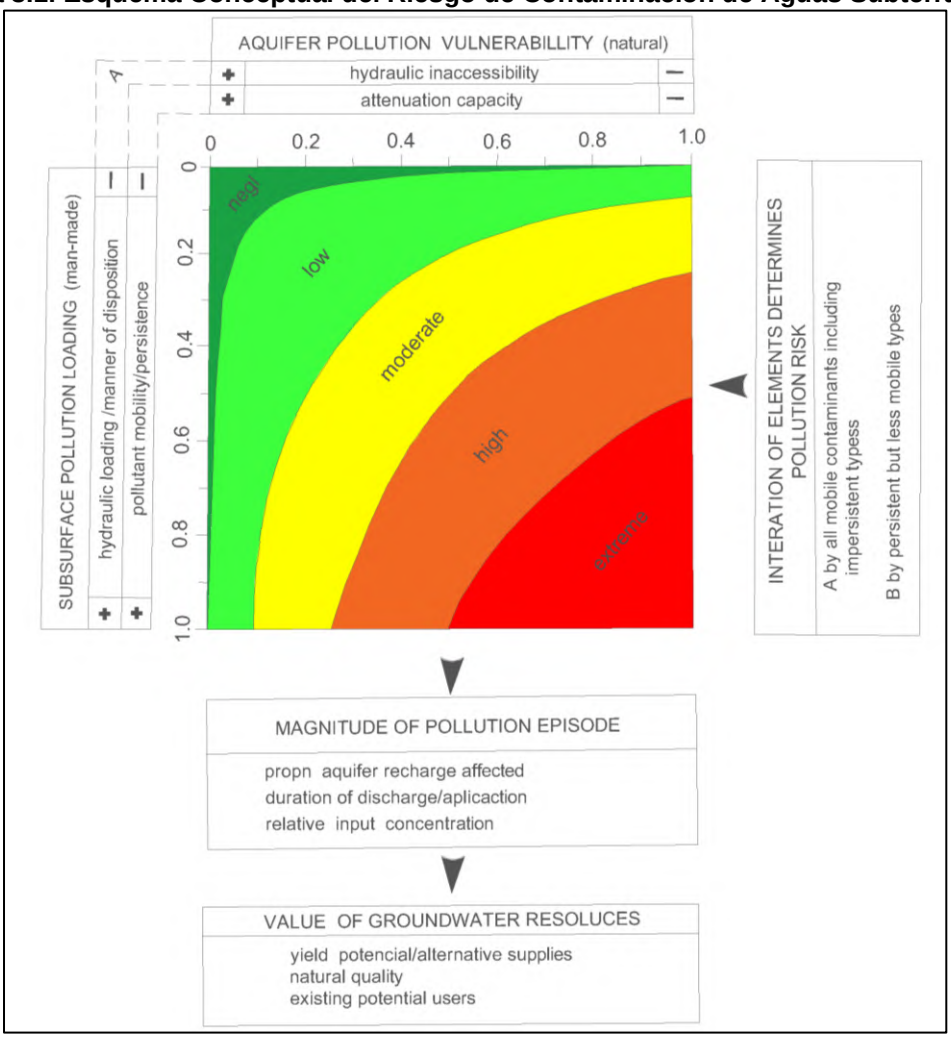
Con respecto a la probabilidad, se estima que el tiempo de acción para controlar el incidente ambiental será de máximo días y la probabilidad de la carga será alta, esto nos daría un valor de carga de 1.0 (Elevada), teniendo en cuanta los dos comportamientos de un incidente ambiental computamos estos dos valores obteniendo un valor final de carga contaminante de 0.8 (Elevada).

3.1.1 Evaluación del Riesgo a la Contaminación

Foster (1987) define el riesgo de contaminación como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua para consumo humano.

El riesgo de contaminación de los acuíferos en el Valle del Río Pavas se determina considerando la interacción entre la carga contaminante que se pueda presentar en el subsuelo como resultado de las diferentes actividades presentes en el Valle del Río Pavas y obras asociadas a la construcción del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero y la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos. Para lo cual se empleó el método plateado por Foster (1987), el cual consiste en un gráfico de doble entrada que relaciona por un lado la carga contaminante y por el otro la vulnerabilidad del acuífero, dando como resultado cinco grados (muy bajo, bajo, moderado, elevado y extremo) de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. En la Figura 3.1, se presenta el grafico para la evaluación del riesgo.

Figura 3.1. Esquema Conceptual del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas.



Fuente: Ingeniería Correa Correa SAS 2017, Tomado y modificado de Foster et. al. 1987.

Con el fin de realizar la correlación de cada una de las actividades u obras determinadas como potenciales fuentes de contaminación se procedió a sobreponer el mapa con la localización de estas actividades sobre el mapa de vulnerabilidad y de esta forma determinar y construir el mapa de riesgo a la contaminación de aguas subterráneas, mapa que se presenta en el ANEXO B.

En la Tabla 3.6, se hace la correlación para cada una de las obras o actividades establecidas como potenciales fuentes de contaminación según su grado de carga contaminante con los grados de vulnerabilidad del acuífero.

Tabla 3.6. Determinación grado de riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas en el Valle del Río Pavas.

Obra o Actividad	Fuente de contaminación	Potencial grado de carga contaminante	Grado de Vulnerabilidad	Grado de Riesgo
Centro Urbano Pavas	Intermedio	Moderado	Alto	Moderado
			Bajo	Moderado
Cultivos Tradicionales	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en tierras áridas (< 250 mm/año)	Reducido	Alto	Bajo
			Bajo	Bajo
Pastoreo intensivo		Reducido	Alto	Bajo
			Bajo	Bajo
Almacenamiento de combustibles (EDS)	-Gasolineras	Moderado	Alto	Moderado
Poliducto	-Cualquier actividad que maneje > 100 kg/día de sustancias químicas	Elevado	Alto	Alto
			Moderado	Alto
			Bajo	Moderado
Campamento (K10+150)	Urbana (-Gasolineras -Rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas)	Moderado	Bajo	Bajo
Zodme 1 (portal Salida T4)	-Explotación de materiales inertes	Moderado	Bajo	Bajo
Zodme 2 (Portal Entrada T5)		Moderado	Bajo	Bajo
Planta CVM-ML-S2	Industrial (-Industrias de tipo 3 -Cualquier actividad que maneje > 100 kg/día de sustancias químicas)	Elevado	Bajo	Moderado
Túnel 5	Explotación minera y petrolera (-Explotación de materiales inertes)	Moderado	Bajo	Bajo
Vías industriales	Urbana (-Gasolineras -Rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas)	Moderado	Moderado	Moderado
Vías industriales		Moderado	Bajo	Bajo
Vía		Moderado	Alto	Alto
Vía		Moderado	Moderado	Moderado
Vía		Moderado	Bajo	Bajo
Incidente ambiental	Cualquier actividad que maneje > 100 kg/día de sustancias químicas)	Elevado	Alto	Alto
Incidente ambiental		Elevado	Moderado	Alto
Incidente ambiental		Elevado	Bajo	Moderado

Fuente: Ingeniería Correa Correa SAS 2017.

4. EVALUACIÓN HIDRÁULICA

Para determinar los principales parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de influencia del Túnel 5, en el Valle de Pavas se ejecutaron tres (3) pruebas de bombeo y cinco (5) pruebas tipo slug de llenado y vaciado en los piezómetros construidos a lo largo del trazado vial y del túnel. Cuatro piezómetros se encuentran captando los Depósitos Fluviolacustre, tres piezómetros y un pozo de bombeo se encuentran captando los Suelos Residuales.

Igualmente se hace la recopilación de pruebas hidráulicas realizadas en 15 captaciones, 13 de ellas en el Valle de Pavas y tres sobre la Formación Volcánica en el área de Mulaló y Loboguerrero. Estas pruebas fueron realizadas para caracterizar hidráulicamente los Depósitos Fluviolacustres, los Suelos Residuales y la Formación Volcánica.

En la Tabla 4.1 y Fotografía 4.1 a Fotografía 4.6 se presentan las principales características de las perforaciones en las que se realizaron las pruebas hidráulicas; en la Figura **4.1** se presenta la ubicación de las perforaciones en las que se realizaron las pruebas de campo y en la Tabla 4.2, se presentan las pruebas recopiladas.

Tabla 4.1. Características de las perforaciones en las que se realizaron las pruebas hidráulicas.

ID	Coordenadas		Profundidad (m)	Nivel Estático (m)	Diámetro (Pulg)	Tipo de Prueba	Unidad Geológica Captada
	Norte	Este					
SPPV-05	897731.195	1055239.27	30.00	3.18	2.00	Slug Vaciado/ Llenado	Qfl
SPPV-10	897697.372	1055177.568	30.00	4.72	2.00	Slug Vaciado/ Llenado	Qfl
ST4-05	896581.749	1059514.11	35.63	Seco	1.50	Slug Llenado	Qsr
ST5-02b	898832.967	1053439.528	80.00	Seco	1.50	Slug Llenado	Qsr
ST5-04B	898967.662	1052575.383	80.00	38.00	1.50	Slug Llenado	Qsr
PZ-1	897375.492	1056344.268	23.40	-0.20	2.00	Bombeo	Qfl
PZ-3	897218.585	1055906.139	26.76	0.62	2.00	Bombeo	Qfl
Pozo PS4	896785.1	1059148.7	28.50	5.70	8.00	Bombeo	Qsr
Qfl: Depósitos Fluviolacustres, Qsr: Suelos Residuales.							

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Todos los piezómetros construidos por COVIMAR presentan un diseño conformado por tubería de PVC con tramos de filtros (tubería ranurada) de un metro intercalado con tramos de tubería ciega de igual longitud.

El diseño inicia con un metro de filtro en el fondo de la perforación, seguido de un metro de tubería ciega, luego un metro de filtro y continua con la intercalación hasta llegar al techo (superficie del terreno) de la perforación.

Fotografía 4.1. Piezómetro SPPV-05, localizado margen derecho del Río Pavas, sobre Depósitos Fluviolacustres.

Fotografía 4.2. Piezómetro SPPV-10, localizado en la margen izquierda del Río Pavas, sobre Depósitos Fluviolacustres.

Fotografía 4.3. Piezómetro ST4-02, localizado en portal salida del Túnel 4, sobre Suelos Residuales (Saprolito).

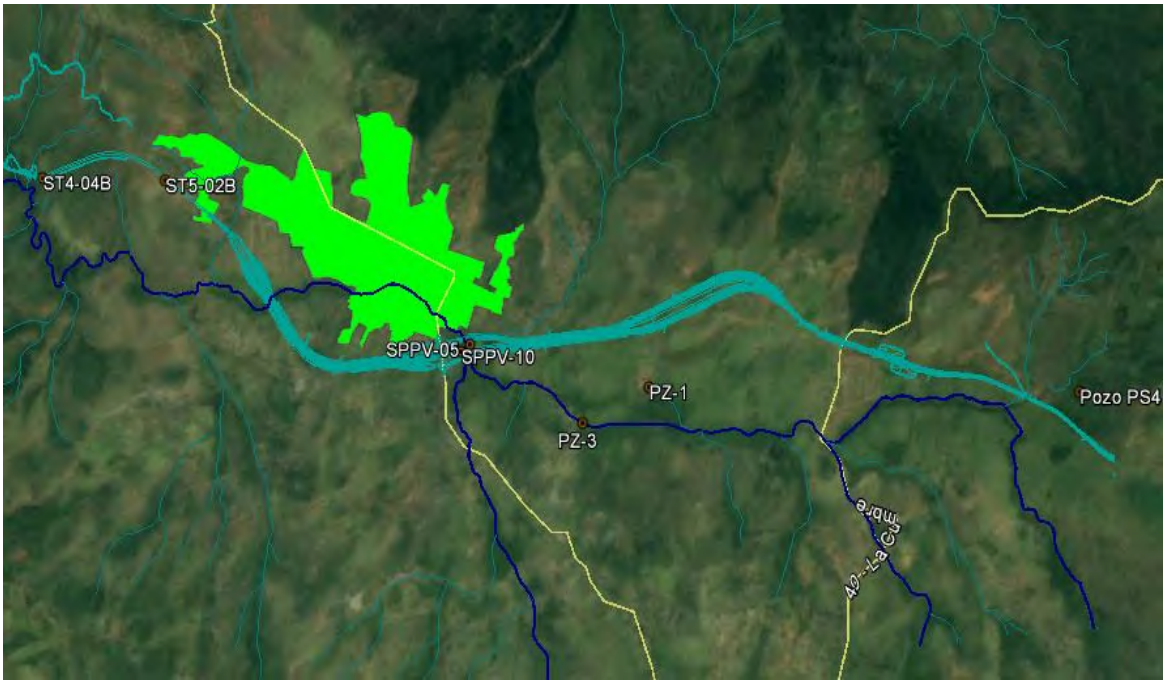
Fotografía 4.4. Piezómetro ST5-02B, localizado al noroccidente del casco urbano de Pavas, sobre Suelos Residuales.

Fotografía 4.5. Piezómetro ST5-04B, localizado en portal salida del Túnel 5, sobre Suelos Residuales (Saprolito).

Fotografía 4.6. Piezómetro PZ-3, localizado en el callejón por la parte suroccidente del Acueducto de Pavas, sobre Depósitos Fluviolacustres.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Figura 4.1. Ubicación de las pruebas hidráulicas realizadas para el Túnel 5 en el Valle de Pavas.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Tabla 4.2. Características de las perforaciones de Pruebas Hidráulicas recopiladas.

ID	Coordenadas		Profundidad (m)	Nivel Estático (m)	Diámetro (Pulg)	Tipo de Prueba	Unidad Geológica Captada
	Norte	Este					
PZ-4	897163	1055969	15.00	-0.32	2.00	Bombeo	Qfl
PZ-5	897215	1055307	22.00	-0.08	2.00	Bombeo	Qfl
PZ-6	879268	1055494	28.50	-0.39	2.00	Bombeo	Qfl
PO-2	897451.54	1055211.43	32.00	16.00	6.00	Bombeo	Qfl
PO-3	897977.92	1053895.06	68.00	11.30	6.00	Bombeo	Qfl
A-1	896766.69	1060691.89	13.20	1.70	43.00	Bombeo	Qfl
A-2	898254.79	1054796.75	6.40	2.40	35.00	Bombeo	Qfl
A-13	899305.62	1053581.58	6.60	2.30	35.00	Bombeo	Qfl
PZ-3	879268	1055494	22.30	1.70	2.00	Bombeo	Qfl
PO-5	895707.23	1055228.72	45.70	15.50	6.00	Bombeo	Qsr
PZ-1	897778.96	1057092.27	16.80	7.34	2.00	Slug	Qsr
PZ-2	897776.70	1056506.34	20.00	1.46	2.00	Slug	Qsr
ST2-02	895273.659	1065214.973	163.00	Seco	1.50	Slug	Kv

ID	Coordenadas		Profundidad (m)	Nivel Estático (m)	Diámetro (Pulg)	Tipo de Prueba	Unidad Geológica Captada
	Norte	Este					
ST4-02	1061641.049	895563.211	127.00	Seco	1.50	Slug	Kv
ST9-05	904399.246	1048051.795	225.00	Seco	1.50	Slug	Kv

Fuente: Tomo 2 – "Hidrogeología para el Paso por Pavas" EDL LTDA. (2012)

4.1 PRUEBAS HIDRÁULICAS EN LOS DEPÓSITOS FLUVIOLACUSTRES (Qfl)

Dentro del presente estudio se realizaron dos pruebas de bombeo y dos pruebas slug en piezómetros que captan los depósitos Fluviolacustres. Las dos pruebas de bombeo se realizaron en los piezómetros PZ-1 y PZ-3 y las pruebas slug se realizaron en los piezómetros SPPV-05 y SPPV-10, las pruebas slug fueron tanto de llenado como de vaciado.

4.1.1 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Piezómetro PZ-1

El piezómetro PZ-1 se localiza en la entrada del Acueducto de Pavas, registrando una profundidad de 23.4 m y revestido con tubería PVC de 2 pulgadas, cuneta con filtros desde los 23 m hasta los 5 m.

Para realizar la prueba se instala una bomba eléctrica con tubería de succión a una profundidad de 15 metros, logrando obtener un caudal de bombeo constante de 0,15 l/s, el cual se mantuvo durante 12 horas. La prueba inicia con un nivel de – 0.19 m (0.19 m sobre la superficie del terreno) y se logra un descenso del nivel de 9.26 metros, los descensos fueron registrados cada minuto mediante un traductor de presión tipo Diver.

La interpretación de los datos obtenidos se realizó por los métodos de Theis y Cooper & Jacob, obteniendo valores para la Conductividad Hidráulica entre 3.57E-2 y 5.34 E-2 m/d, un Coeficiente de almacenamiento de 6.37E-5 y Transmisividades entre 1.25 y 1.87 m^2/d.

La prueba de recuperación se da inicio al finalizar el bombeo, iniciando con un nivel dinámico de 8.87 m y logrando una recuperación del 100% en 10 minutos, estos datos de recuperación se registran mediante el transductor de presión.

La interpretación se realiza mediante el método de Theis Recovery, obteniendo una Conductividad Hidráulica de 0.143 m/d y una Transmisividad de 7.17 m^2/d. Los datos de las pruebas en el PZ-1 y las curvas de interpretación se presentan en el ANEXO C.

Los parámetros obtenidos muestran que el acuífero Deposito Fluviolacustre en la zona donde es captado por el piezómetro PZ-1, es de tipo confinado con muy buena capacidad de almacenamiento.

Fotografía 4.7. Toma de nivel inicial en el PZ-1 antes del inicio de la prueba de bombeo.

Fotografía 4.8. Ejecución de la prueba de bombeo a caudal constante en el PZ-1.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

4.1.2 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Piezómetro PZ-3

El piezómetro PZ-3 se encuentra captando el acuífero depósitos Fluvilacustres, localizado en el callejón que cruza al suroccidente del Acueducto de Pavas, registra una profundidad de 26.76 m y se encuentra revestido en tubería PVC de 2 pulgadas de diámetro, presentando un nivel estático de 0.62 metros.

La prueba se realiza con una bomba eléctrica cuyo punto de succión se instaló a los 10 metros, obteniendo un caudal de descarga de 0.24 l/s de forma constante durante las 12 horas que duró la prueba de bombeo. Se inicia la prueba con un nivel estático de 0.62 m, logrando obtener un descenso de 2.27 m en las 12 horas de bombeo, cada uno de los descensos fueron registrados cada minuto mediante traductor de presión, los datos se presentan en el ANEXO C.

La interpretación de la prueba de bombeo a caudal constante se realizó por el método de Theis obteniendo una Conductividad Hidráulica de 2.87E-1 m/d y una Transmisiviad de 10.1 m^2/d.

Al finalizar la prueba de bombeo a caudal constante se da inicio a la prueba de recuperación la cual inicia a partir de un nivel dinámico de 2.89 m alcanzando una recuperación del 100% en 21 minutos, cada uno de los datos de recuperación se registraron mediante el traductor de presión.

La interpretación de la prueba de recuperación se realizó mediante el método de Theis Reovery, obteniendo una Conductividad Hidráulica de 1.47E-1 m/d y una Transmisividad de 7.35 m^2/d, reflejando que se capta un acuífero de tipo confinado con buena capacidad de almacenamiento. En el ANEXO C, se presentan las curvas de interpretación.

Fotografía 4.9. Instalación de tubería para prueba de bombeo en el PZ-3.

Fotografía 4.10. Bombeo durante la ejecución de prueba de bombeo PZ-3.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

4.1.3 Pruebas Slug de Vaciado y Llenado en el Piezómetro SPPV-05

El ensayo hidráulico en la perforación SPPV-05 se realizó el día 20 de febrero de 2017, la perforación se encuentra ubicada al suroriente del casco urbano de Pavas, en la margen derecha del Río Pavas. Según la descripción litológica de la perforación desde superficie y hasta los 30 m perforados se presentan limos arenosos de color marrón, con intercalaciones de gravas y arenas gruesas.

La perforación registra una profundidad de 30 m, se encuentra revestida en tubería de PVC con un diámetro de 2.0 pulgadas y el nivel estático se encuentra a 3.18 m.

Se inició con la prueba Slug de vaciado, para lo cual se extrajo de forma instantánea tres litros de agua mediante baldeo empleando un bailer platico y logrando descender el nivel en 0.4 m, posteriormente se llevó el registro de la recuperación del nivel del agua cada segundo, mediante un transductor de presión tipo MiniDiver durante 1.2 horas, obteniendo un total de 4356 datos. Durante este tiempo se logró llegar al 100% de la recuperación.

Posteriormente se realizó la prueba Slug de llenado para lo cual se adicionaron 50 litros de agua a la perforación, a partir de un nivel de 3.18 metros de profundidad logrando conseguir un ascenso del nivel del agua de 3.08 m (llegando hasta la boca del piezómetro), en este caso se llevó un registro del descenso del nivel del agua cada segundo mediante un transductor de presión tipo MiniDiver, durante 8.4 minutos, obteniendo 504 datos, tiempo en el cual se logró nuevamente le nivel inicial (3.18 m). En el ANEXO C, se presentan los datos obtenidos durante la prueba.

Fotografía 4.11. Ejecución de prueba Slug de vaciado en el SPPV-05.	Fotografía 4.12. Ejecución de prueba Slug de llenado en el SPPV-05.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

La interpretación se realizó mediante el método de Hvorslev y Cooper-Bredehoeft-Papadopulos para acuíferos confinados a semi-confinados, obteniendo como resultado valores de Conductividad Hidráulica promedio de 3.32E-1 m/d, Transmisividad de 9.96 m^2/d y un Coeficiente de almacenamiento de 2.71E-5, representando un acuífero confinado.

4.1.4 Pruebas Slug de Vaciado y Llenado en el Piezómetro SPPV-10

El ensayo hidráulico en la perforación SPPV-10 se realizó el día 20 de febrero de 2017, la cual se encuentra ubicada al suroriente del casco urbano de Pavas, en la margen izquierda del Río Pavas. Litológicamente la perforación está constituida por suelo residual hasta los 1.5 m de profundidad, seguido de limos arenosos son intercalaciones de gravas y arenas finas a gruesas hasta los 30 metros perforados, litología que representa los depósitos Fluviolacustres.

La perforación registra una profundidad de 30 m, se encuentra revestida en tubería de PVC con un diámetro de 2.0 pulgadas, presentando un nivel estático de 4.72 m.

Para la realizar la prueba slug de vaciado para lo cual se extrajo de forma instantánea tres litros de agua mediante baldeo empleando un bailer platico y logrando descender el nivel en 0.1 m, posteriormente se llevó el registro de la recuperación del nivel del agua cada segundo, mediante un transductor de presión tipo MiniDiver durante una horas, obteniendo un total de 3852 datos. Durante este tiempo se logró llegar al 98% de la recuperación, dando por finalizada la prueba.

Posteriormente se realizó la prueba Slug de llenado para lo cual se adicionaron 80 litros de agua a la perforación, a partir de un nivel de 4.63 metros de profundidad logrando conseguir un ascenso del nivel del agua de 4.6 m (llegando hasta la boca del piezómetro), en este caso se llevó un registro del descenso del nivel del agua cada segundo mediante un transductor de presión tipo MiniDiver, durante 3.8 horas, obteniendo 13668 datos, tiempo en el cual se logró nuevamente le nivel inicial (4.72 m). En el ANEXO C, se presentan los datos obtenidos durante la prueba.

Fotografía 4.13. Toma de niveles antes del inicio de la prueba Slug de vaciado en el piezómetro SPPV-10.	Fotografía 4.14. Ejecución prueba Slug de llenado en el piezómetro SPPV-10.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

La interpretación de la prueba presenta una Conductividad Hidráulica promedio de 6.53E-4 m/d, una Transmisividad de 2.5E-2 m^2/d y un Coeficiente de Almacenamiento de 4.3E-4. La interpretación se realizó mediante el método de Hvorslev y Cooper-Bredehoeft-Papadopulos para acuíferos confinados a semi-confinados.

Las propiedades hidráulicas obtenidas en el piezómetro SPPV-10 caracterizan un acuífero confinado a semiconfinado, con buena capacidad de almacenamiento representativo del Acuífero Depósitos Fluviolacustres.

4.2 PRUEBAS HIDRÁULICAS EN LOS SUELOS RESIDUALES (Qsr)

Para caracterizar los Suelos Residuales (saprolito) que cubren en gran parte el área de estudio, se ejecutaron tres pruebas Slug de llenado en los piezómetros ST4-05, ST5-02B y ST5-04B y una prueba de bombeo en el Pozo PS4.

4.2.1 Pruebas Slug de Llenado en el Piezómetro ST4-05

El ensayo hidráulico en el piezómetro ST4-05 se realizó el día 21 de febrero de 2017, el cual se encuentra ubicada en el portal salida del túnel 4, en la parte oriental del área de estudio. La descripción litológica de esta perforación corresponde a Suelos Residuales o saprolito producto de la meteorización de la Formación Volcánica, conformado por suelos de color rojizo limo arcilloso, blando y plástico, con presencia de algunos fragmentos de diabasas.

La perforación registra una profundidad de 35.6 m, se encuentra revestida en tubería de PVC con un diámetro de 1.5 pulgadas y no registra nivel de agua a lo largo de la perforación.

Para la prueba Slug de llenado se adicionaron 300 litros de agua a la perforación, logrando conseguir una columna de agua de 12.78 metros a partir del fondo de la perforación. Los descensos del nivel del agua fueron registrados cada segundo mediante un transductor de presión tipo MiniDiver, durante 38 minutos, obteniendo 2286 datos, obteniendo una infiltración total del agua adicionada a la perforación.

Fotografía 4.15. Toma de profundidad e instalación de Mini-Diver en el piezómetro ST4-05.	Fotografía 4.16. Prueba Slug de llenado en el piezómetro ST4-05.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

La interpretación se realizó mediante el método de Hvorslev, obteniendo como resultado valores promedios de Conductividad Hidráulica de 5.4E-3 m/d, Transmisividad de 3.3E-1 m^2/d y Coeficiente de Almacenamiento de 1.27E-3.

4.2.2 Pruebas Slug de Llenado en el Piezómetro ST5-02B

El piezómetro ST5-02B, se localiza en el portal de entrada del Túnel 5, al noroccidente del área de influencia, cuenta con una profundidad de 80 m y no registra nivel de agua subterránea. Como litología predominate se presenta saprolito limo arcilloso de color marrón oscuro a rojizo con presencia algunos fragmentos de diabasas, en el fondo de la perforación se encuentra un saprolito muy plástico y con mayor contenido de arcillas.

Durante la prueba Slug de llenado se adicionaron 100 litros de agua, logrando un acenso de la columna de agua de 5.0 metros dentro de la perforación. Los descensos del nivel del agua fueron registrados cada segundo mediante un transductor de presión tipo MiniDiver, durante 49 minutos, tiempo en el cual se logró la infiltración total de del agua adicionada, obteniendo 2939 datos.

Basados en la interpretación de la prueba slug de llenado se tienen valores promedio de Transmisividad de 8.5E-2 m^2/d, Conductividad Hidráulica de 1.36E-3 m/d y Coeficiente de Almacenamiento de 1.25E-3, para los Suelos Residuales donde se ubica el piezómetro ST5-02B.

Fotografía 4.17. Instalación de Mini-Diver en el piezómetro ST5-02B.	Fotografía 4.18. Prueba Slug de llenado en el piezómetro ST5-02B.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

4.2.3 Pruebas Slug de Llenado en el Piezómetro ST5-04B

El ensayo hidráulico en el piezómetro ST5-04B se realizó el día 24 de febrero de 2017, el piezómetro se encuentra localizado a la altura de portal salida del Túnel 5, al noroccidente del área de estudio. Litológicamente esta perforación presenta una secuencia de techo a base de saprolito limo arcilloso rojizo medianamente plástico en la parte del techo y en la base con una plasticidad mayor, en la base se presentan algunos fragmentos de diabasas.

La perforación registra una profundidad de 80 m, se encuentra revestida en tubería de PVC con un diámetro de 1.5 pulgadas, la perforación se encuentra seca.

Para la prueba Slug de llenado se adicionaron 80 litros de agua a la perforación, logrando conseguir un acenso de la columna de agua de 8.5 metros a partir del fondo de la perforación. Los descensos del nivel del agua fueron registrados cada segundo mediante un transductor de presión tipo MiniDiver, durante 1.5 horas, obteniendo 5390 datos, obteniendo una infiltración total del agua adicionada a la perforación.

Fotografía 4.19. Instalación de Mini-Diver en el piezómetro ST5-02B.	Fotografía 4.20. Prueba Slug de llenado en el piezómetro ST5-02B.

La interpretación presenta valores promedio de Conductividad Hidráulica de 3.71E-4 m/d, Transmisividad de 2.4E-2 m^2/d y Coeficiente de almacenamiento de 1.86E-3.

4.2.4 Prueba de Bombeo a Caudal Constante en el Pozo PS4

El pozo PS4 se encuentra captando el acuitardo Suelos Residuales, localizado al oriente del área de estudio, aproximadamente a un kilómetro al occidente del portal de salida de túnel 4, registra una profundidad de 28.4 m y se encuentra revestido en tubería PVC de 8 pulgadas de diámetro, presentando un nivel estático de 5.7 metros.

La prueba se realiza con una bomba eléctrica cuyo punto de succión se instaló a los 25 metros, obteniendo un caudal de descarga de 0.25 l/s de forma constante durante las 12.3 horas que duró la prueba de bombeo. Se inicia la prueba con un nivel estático de 5.7 m, logrando obtener un descenso de 18.6 m, cada uno de los descensos fueron registrados cada minuto mediante traductor de presión, los datos se presentan en el ANEXO C.

La interpretación de la prueba de bombeo a caudal constante se realizó por el método de Theis obteniendo una Conductividad Hidráulica de 1.15E-2 m/d, una Transmisiviad de 5.73E-1 m^2/d y un Coeficiente de Almacenamiento de 3.8E-4.

Fotografía 4.21. Instalación Equipo de Bombeo y Mini-Diver en el Pozo PS4.

Fotografía 4.22. Ejecución de la prueba de bombeo en el Pozo PS4.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

4.3 PRUEBAS HIDRÁULICAS RECOPILADAS

Con el fin de tener un mejor conocimiento de las propiedades hidráulicas de las diferentes unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio, se realizó la recopilación de información hidráulica dentro del Valle del Río Pavas, así como de la Formación Volcánica en zonas adyacentes como Mulaló y Loboguerrero.

Dentro de los estudios adelantados por EDL LTDA en el año 2012 se presentó el Tomo 2 – Hidrogeología para el Paso por Pavas, como parte de la “Elaboración de los Estudios a Nivel de Fase III de la Vía Paso de la Torre – Mulaló – Loboguerrero, Departamento del Valle del Cauca”, estudio que desarrolla pruebas hidráulicas en el Valle del Río Pavas, igualmente dentro de los estudios hidrogeológicos para los Túneles 1, 2, 4 y 9 dentro del Proyecto Vial Mulaló Loboguerrero COVIMAR ha ejecutado pruebas hidráulicas en la Formación Volcánica. En el ANEXO D, se presentan las curvas de las pruebas recopiladas.

4.3.1 Pruebas Hidráulicas Recopiladas en los Depósitos Fluviolacustres

En el Tomo 2 – Hidrogeología para el Paso por Pavas (EDL 2012), se caracterizaron los Depósitos Fluviolacustres mediante la ejecución de ocho (8) pruebas de bombeo, tres en piezómetros, dos en pozos y tres en aljibes y una prueba slug en piezómetro, a continuación, se relaciona cada una de ellas.

4.3.1.1 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el PZ-4

Ésta prueba se realizó bombeando el Piezómetro PZ -4 Callejón Las Heliconias con un caudal de 0.35 l/s (30.20 m³/día), durante un tiempo de 120 minutos (0.083 días). Se inicia a partir de un nivel estático saltante de + 0.32 m, alcanzando el nivel dinámico al final de la prueba, los 3.20 m de profundidad, para un abatimiento de 3.20 m. El espesor saturado se considera en 14.0 m.

Basados en el método de Theis para acuífero confinado, se obtiene para la Transmisividad un valor de 9.85 m²/día con un valor de 5.86 E-04 para el Coeficiente de Almacenamiento y de 0.703 m/día para la Conductividad Hidráulica. Empleando el método de Cooper & Jacob se calcula una Transmisividad de 11.30 m²/día, con un Coeficiente de Almacenamiento de 1.09 E-04 y una Conductividad Hidráulica de 0.805 m/día.

4.3.1.2 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el PZ-5

La prueba a caudal constante se realizó con 0.28 l/s (24.8 m³/día) durante 180 minutos (0.12 días) de bombeo. Se inicia a partir de un nivel estático saltante de 0.39 m, alcanzando un nivel dinámico de 4.78 m de profundidad al final de la prueba, para un abatimiento de 4.78 m.

Basados en la metodología desarrollada por Theis para acuíferos confinados, se obtiene para la Transmisividad un valor de 5.74 m²/día, con un Coeficiente de Almacenamiento de 1.01 E-04 y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.212 m/día teniendo en cuenta un espesor saturado del acuífero de 27.0 m. Empleando el método de Cooper & Jacob, el valor de la Transmisividad es de 4.55 m²/día, de 1.25 E-04 para el Coeficiente de Almacenamiento y de 0.68 para la Conductividad Hidráulica.

La prueba de recuperación se inicia a partir de un nivel dinámico de 4.78 m. de profundidad, alcanzando el nivel del agua recuperada los 1.48 m al final de los 25 minutos (0.017 días), equivalente a una recuperación del 75 %.

La interpretación de esta prueba, empleando el método de Theis Recovery, señala para la Transmisividad un valor de 6.26 m^2/día y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.232 m/día. De acuerdo al punto de intersección de la recta con el eje Y, cerca de su parte central, el acuífero captado recupera lentamente el nivel inicial, debido a que este sector tiene poca recarga.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos del Acuífero Depósito Fluvial del Río Pavas en alrededores de este piezómetro, se calcula para la Transmisividad 5.50 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 1.10 E-04 y para la Conductividad Hidráulica 0.37 m/día.

4.3.1.3 Prueba de Bombeo a Caudal Constante en el PZ-6

La prueba a caudal constante se realizó con 0.40 l/s (34.5 m³/día) durante 180 minutos (0.12 días) de bombeo. Se inicia a partir de un nivel estático saltante de + 0.08 m, alcanzando el nivel dinámico al final de la prueba, una profundidad de 2.17 m, para un abatimiento de 2.17 m.

Empleando el método de Theis se calcula para la Transmisividad un valor de 18.10 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento de 9.07 E-04 y de 0.907 m/día para la Conductividad Hidráulica. La forma de la curva y el valor del coeficiente de almacenamiento indican que el acuífero captado, es de tipo confinado con alta capacidad de almacenamiento.

4.3.1.4 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Pozo PO-2

La prueba a caudal constante se realizó con 0.60 l/s (51.8 m³/día) durante 480 minutos (0.33 días) de bombeo. Se inicia a partir de un nivel estático de 1.12 m, alcanzando el nivel dinámico una profundidad de 21.08 m al final de la prueba, para un abatimiento de 19.96 m.

Basados en el método de Neuman para acuífero libre, se obtiene para la rama inicial de la curva donde el comportamiento es confinado, una Transmisividad de 2.10 m²/día, con una Conductividad Hidráulica de 0.0701 m/día. Empleando la rama final de la curva correspondiente al tipo libre, se calcula para la Transmisividad un valor de 1.01 m²/día, con un Coeficiente de Almacenamiento o Porosidad Eficaz de 1.20 E-01 y una Conductividad Hidráulica de 0.033 m/día, considerando un espesor saturado de 30.0 m.

La prueba de recuperación se inicia a partir de un nivel dinámico de 21.08 m. de profundidad, alcanzando el nivel del agua recuperada los 2.49 m al final de los 60 minutos (0.041 días), equivalente a una recuperación del 93.0 %. La interpretación de esta prueba, empleando el método de Theis Recovery, señala para la Transmisividad un valor de 0.820 m^2/día y para la Conductividad Hidráulica 0.027 m/día.

4.3.1.5 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Pozo PO-3

La prueba a caudal constante se realizó con 0.90 l/s (77.7 m³/día) durante 480 minutos (0.33 días) de bombeo. Se inicia a partir de un nivel estático de 4.08 m, alcanzando el nivel dinámico una profundidad de 11.27 m al final de la prueba, para un abatimiento de 7.19 m.

Empleando el método de Theis se calcula para la Transmisividad un valor de 12.80 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento de 7.72 E-06 y de 0.376 m/día para la Conductividad Hidráulica, considerando un espesor saturado de 34.0 m.

La prueba de recuperación se inicia a partir de un nivel dinámico de 11.27 m. de profundidad, alcanzando el nivel del agua recuperada los 4.27 m al final de los 30 minutos (0.020 días), equivalente a una recuperación del 97.0 %. La interpretación de esta prueba, empleando el método de Theis Recovery, señala para la Transmisividad un valor de 16.30 m^2/día y para la Conductividad Hidráulica 0.479 m/día.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos del Acuífero Depósito Fluvial del Río Pavas en alrededores de este pozo, se calculan para la

Transmisividad 14.50 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 7.70 E-06 y para la Conductividad Hidráulica 0.37 m/día.

4.3.1.6 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Aljibe A-1

La prueba de bombeo a caudal constante se realizó con un caudal promedio corregido de 1.29 l/s (111.4 m^3/día), a partir de un nivel estático de 2.12 m de profundidad, alcanzando el nivel dinámico, después de 480 minutos (0.033 días) de bombeo, una profundidad de 6.55 m, para un abatimiento de 4.43 m.

La interpretación de los datos a caudal constante, calcula para la Transmisividad un valor de 12.55 m²/día y de 1.38 E-02 para el Coeficiente de Almacenamiento, indicando que el acuífero captado en alrededores del aljibe se comporta como libre, es decir, recargado directamente por las corrientes superficiales y el agua lluvia.

La prueba de recuperación se realiza a partir de un nivel dinámico de 6.55 m. de profundidad, alcanzando el nivel del agua recuperada los 2.47 m al final de los 210.0 minutos (0.14 días) de la prueba, equivalente a una recuperación del 92.0%. Empleando el método de Theis Recovery para la interpretación de ésta prueba, se obtiene para la Transmisividad un valor de 6.75 m^2/día y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.62 m/día, teniendo en cuenta que el espesor saturado se estima en 11.0 m.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos de la unidad hidrogeológica captada por el aljibe, representada por el Acuífero Depósito Fluvial del Río Pavas, se calculan para la Transmisividad un valor 9.50 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 1.38 E -02 y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.62 m/día.

4.3.1.7 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Aljibe A-2

La prueba a caudal constante se ejecutó con un caudal corregido de 4.70 l/s (40.6 m^3/día), corrección que se efectúa teniendo en cuenta que el caudal de almacenamiento en un aljibe, es el volumen de agua en el aljibe con relación al tiempo de bombeo. El tiempo de bombeo es de 360 minutos (0.25 días).

Para los datos de ésta prueba, se obtiene para la Transmisividad un valor de 10.73 m²/día y de 4.20 E-02 para el Coeficiente de Almacenamiento, indicando que el acuífero captado en alrededores del aljibe es de tipo libre.

La prueba de recuperación se lleva a cabo a partir de un nivel dinámico de 4.04 m. de profundidad, alcanzando el nivel del agua recuperada los 2.64 m al final de los 210.0 minutos (0.14 días) de la prueba, equivalente a una recuperación del 92.0%. Para la interpretación de ésta prueba se utiliza el método de Theis Recovery, obteniéndose para la Transmisividad un valor de 3.98 m^2/día y para la Conductividad Hidráulica un valor de 1.12 m/día, teniendo en cuenta un espesor saturado de 3.57 m.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos de la unidad hidrogeológica captada por el aljibe, representada por el Acuífero Depósito Fluvial del Río Pavas, se calcula para la Transmisividad un valor 7.40 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 4.20 E -02 y para la Conductividad Hidráulica un valor de 1.10 m/día.

4.3.1.8 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Aljibe A-13

La prueba de bombeo a caudal constante se realizó con un caudal promedio corregido de 0.46 l/s (40.10 m^3/día), a partir de un nivel estático de 2.82 m de profundidad, alcanzando el nivel dinámico, después de 240 minutos (0.16 días) de bombeo, una profundidad de 5.29 m, para un abatimiento de 2.47 m.

La interpretación de los datos a caudal constante, calcula para la Transmisividad un valor de 5.77 m²/día y de 2.20 E-02 para el Coeficiente de Almacenamiento, indicando que el acuífero captado en alrededores del aljibe se comporta como libre, es decir, recargado directamente por las corrientes superficiales y el agua lluvia.

La prueba de recuperación se realizó a partir de un nivel dinámico de 5.29 m. de profundidad, alcanzando el nivel del agua recuperada los 2.99 m al final de los 160.0 minutos (0.11 días) de la prueba, equivalente a una recuperación del 93.0%. Empleando el método de Theis Recovery para la interpretación de ésta prueba, se obtiene para la Transmisividad un valor de 2.80 m^2/día y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.85 m/día, teniendo en cuenta que el espesor saturado se estima en 3.28 m.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos de la unidad hidrogeológica captada por el aljibe, representada por el Acuífero Depósito Fluvial del Río Pavas, se calculan para la Transmisividad un valor 4.20 m²/día, para el Coeficiente de Almacenamiento 2.20 E -02 y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.85 m/día.

4.3.1.9 Prueba Slug en el Piezómetro PZ-3

La prueba Slug de Llenado o Inversa se ejecutó a partir de un nivel estático de 1.80 m, logrando ascender el nivel dinámico a 0.70 m de profundidad, durante un tiempo de 52.52 minutos (0.87 horas), recuperándose durante este tiempo el 98.8% del nivel inicial.

De acuerdo a los resultados de la interpretación de la prueba, empleando el método de Hvorslev, la Conductividad Hidráulica tiene un valor de 0.11 m/día y una Transmisividad de 2.25 m^2/día.

4.3.2 Pruebas Hidráulicas Recopiladas en los Suelos Residuales

Dentro de la ejecución de los estudios para el Tomo 2 – Hidrogeología para el Paso por Pavas (EDL 2012), se realizó una prueba de bombeo en el pozo PO-5 y dos pruebas slug en los piezómetros PZ-1 y PZ-2, estas pruebas permitieron caracterizar el Acuitardo Suelos Residuales.

4.3.2.1 Prueba de Bombeo a Caudal Constante y Recuperación en el Pozo PO-5

La prueba a caudal constante se realizó con 1.60 l/s (141.4 m³/día) durante 720 minutos (0.5 días) de bombeo. Se inicia a partir de un nivel estático de 16.54 m, alcanzando el nivel dinámico una profundidad de 27.99 m al final de la prueba, para un abatimiento de 11.45 m.

La Transmisividad obtenida empleando el método de Theis, tiene un valor de 12.80 m²/día, con un Coeficiente de Almacenamiento de 4.53 E-06 y un valor de Conductividad Hidráulica de 0.313 m/día.

La prueba de recuperación se inició a partir de un nivel dinámico de 27.99 m de profundidad, alcanzando el nivel del agua recuperada los 17.14 m al final de los 160 minutos (0.11 días), equivalente a una recuperación del 94.0 %. La interpretación de esta prueba, empleando el método de Theis Recovery, calcula para la Transmisividad un valor de 28.50 m^2/día y para la Conductividad Hidráulica un valor de 0.695 m/día.

Como valores representativos promedios de los parámetros hidráulicos del Acuitardo Suelo Residual o Saprolito en alrededores de este pozo, se calculan para la Transmisividad 20.0 m²/día, con un Coeficiente de Almacenamiento de 4.50 E-06 y para la Conductividad Hidráulica un valor calculado en 0.50 m/día.

4.3.2.2 Prueba Slug en el Piezómetro PZ-1

Se realizó la prueba de Slug con beailer, a partir de un nivel estático de 7.56 m, logrando descender el nivel dinámico a 7.60 m. Después de un tiempo de recuperación de 157.8 minutos (2.6 horas), se recupera el 100.0% del nivel inicial.

La interpretación de la prueba, empleando el método de Hvorslev, indica para la Conductividad Hidráulica, un valor de 8.40E-3 m/día y de 0.078 m^2/día para la Transmisividad.

4.3.2.3 Prueba Slug en el Piezómetro PZ-2

La prueba Slug de Llenado se ejecutó a partir de un nivel estático de 1.64 m, logrando ascender el nivel dinámico a los 0.20 m de profundidad. Después de un tiempo de recuperación de 124.63 minutos (2.07 horas), se recupera el 91.7% del nivel inicial.

De acuerdo a los resultados de la interpretación de la prueba, empleando el método de Hvorslev, la Conductividad Hidráulica tiene un valor de 6.40E-3 m/día y de 0.11 m^2/día de Transmisividad.

4.3.3 Pruebas Hidráulicas Recopiladas para la Formación Volcánica

Como parte de los estudios de hidrogeología para la construcción de los Túneles 1, 2 y 4 del Proyecto Mulaló – Loboguerrero, se realizaron tres pruebas slug en los piezómetros ST1-01, ST2-02 y ST4-02, las cuales permiten caracterizar hidráulicamente la Formación Volcánica.

4.3.3.1 Prueba Slug de Llenado en el Piezómetro ST1-01

El piezómetro ST1-01 en el que se realizó la prueba slug de llenado registró una profundidad de 36.34 m, se encuentra revestida en tubería de PVC con un diámetro de 1.5 pulgadas y el nivel estático se encuentra a 33.26 m.

En esta perforación se realizó prueba Slug de llenado, para lo cual se adicionaron aproximadamente 100 litros de agua a la perforación, logrando un acenso del nivel del agua

hasta los 22.26 m (11 metros), posteriormente se llevó un registro del descenso del nivel del agua cada segundo mediante un transductor de presión tipo MiniDiver, durante 7 horas, obteniendo 25200 datos y registrando un nivel final igual a la inicial (33.26 m).

La interpretación se realizó mediante el método de Hvorslev y Cooper-Bredehoeft-Papadopulos para acuíferos confinados a semi-confinados, obteniendo como resultado un valor de conductividad hidráulica promedio de 6.36 E-2 m/d y un Coeficiente de almacenamiento de 1.77 E-6, lo cual representa las diabasas con un alto grado de fracturamiento.

4.3.3.2 Prueba Slug de Llenado en el Piezómetro ST2-02

Para realizar la prueba Slug de llenado se adicionaron 100 litros de agua a la perforación logrando obtener una columna de agua de 8.5 m y se llevó un registro del descenso del nivel del agua cada segundo mediante un transductor de presión tipo MiniDiver, durante 2.25 horas, obteniendo 8100 datos, registrando un nivel final de 159.4 m.

La interpretación de la prueba presenta una conductividad hidráulica promedio de 3.25 E-2 m/d y un coeficiente de almacenamiento de 2.77 E-7. La interpretación se realizó mediante el método de Hvorslev y Cooper-Bredehoeft-Papadopulos para acuíferos confinados a semi-confinados.

Las propiedades hidráulicas obtenidas en esta perforación muestran un grado de fracturamiento moderado en esta zona de la Formación Volcánica.

4.3.3.3 Prueba Slug de Llenado en el Piezómetro ST4-02

Para la prueba Slug de llenado se adicionaron 400 litros de agua a la perforación, logrando conseguir una columna de agua de 0.83 metros a partir de la profundidad de la perforación. Los descensos del nivel del agua fueron registrados cada segundo mediante un transductor de presión tipo MiniDiver, durante 7 hora, obteniendo 25200 datos, obteniendo al final de la prueba solo una columna de agua de 0.08 m.

La interpretación se realizó mediante el método de Hvorslev para acuíferos confinados y semi-confinados, obteniendo como resultado un valor de conductividad hidráulica promedio de 1.13 E-3 m/d.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los parámetros hidráulicos obtenidos mediante la interpretación de las pruebas de bombeo y slug realizadas en campo, así como las recopiladas de estudios anteriores permite caracterizar hidráulicamente las unidades captadas con valores promedios de Conductividad Hidráulica, Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento. En la Tabla 4.3 se presentan los parámetros obtenidos en cada prueba.

Tabla 4.3. Resultados de las Pruebas Hidráulicas Realizadas y Recopiladas.

ACUÍFERO	Espesor (m)	T (m^2/d)	Kxy (m/d)	S	Obtenido a partir de
Depósitos Fluviolacustres	30 - 35	10.6	7.54E-01	3.48E-04	Prueba de Bombeo PZ-4*
		5.15	4.46E-01	1.13E-04	Prueba de Bombeo PZ-5*
		8.72	2.10E-01	-	Prueba de Bombeo PZ-3
		18	9.00E-01	5.60E-04	Prueba de Bombeo PZ-6*
		3.43	7.80E-02	6.37E-05	Prueba de Bombeo PZ-1
		9.96	3.32E-01	3.08E-03	Prueba de Slug SPPV-05
		0.025	6.53E-04	4.31E-04	Prueba de Slug SPPV-10
		1.31	4.24E-02	6.05E-02	Prueba de Bombeo PO-2*
		14.6	2.58E-01	6.00E-02	Prueba de Bombeo PO-3*
		6.75	6.20E-01	1.38E-02	Prueba de Bombeo A-1*
		7.36	8.70E-01	4.20E-02	Prueba de Bombeo A-2*
		4.3	8.50E-01	2.20E-02	Prueba de Bombeo A-13*
		2.25	1.10E-01	-	Prueba de Bombeo PZ-3*
Suelos Residuales	30-70	20.7	5.00E-01	4.50E-06	Prueba de Bombeo PO-5*
		0.078	8.40E-03	-	Prueba Slug PZ-1*
		0.11	6.40E-03	-	Prueba Slug PZ-2*
		0.33	5.40E-03	1.27E-03	Prueba Slug ST4-05
		0.085	1.36E-03	1.85E-03	Prueba Slug ST5-02B
		0.024	3.71E-04	1.86E-03	Prueba Slug ST5-04B
Formación Volcánica	100	0.32	3.25E-03	2.77E-06	Prueba Slug ST2-02
		0.03	3.05E-04	2.77E-07	Prueba Slug ST4-02
		6.36	6.36E-02	1.77E-06	Prueba Slug ST1-01
**Pruebas recopiladas Tomo 2 – Hidrogeología para el Paso por Pavas (EDL 2012); K: Conductividad Hidráulica, T: Transmisividad; S: Coeficiente de Almacenamiento*					

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Los resultados de las pruebas hidráulicas realizadas en la Formación Volcánica (Kv), arrojaron conductividades hidráulicas con valores entre 6.36E-2 (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, la Transmisividad (estimando un espesor de 100 m) se encuentra entre 6.36 m^2/d y 3.05 m^2/d con valor promedio de 2.24 m^2/d. El Coeficiente de Almacenamiento promedio es de 1.6E-6, lo cual caracteriza la Formación Volcánica, como un acuitardo con buena capacidad de transito del agua mediante porosidad secundaria (fracturamiento) y con baja capacidad de almacenamiento con un comportamiento semi-confinado a confinado.

Los Suelos Residuales (Qsr), se caracterizan por un valor de Conductividad Hidráulica entre 5.0E-1 y 3.7E-4 con un valor promedio de 8.7E-2, una Transmisividad entre 0.02 m^2/d y 20.7 m^2/d, con valores promedio de 3.5 m^2/d y un Coeficiente de Almacenamiento de 1.25E-3, caracterizando estos suelos como un acuitardo con parámetros hidráulicos muy bajos y de carácter libre a semi-confinado.

Los Depósitos Fluviolacustres (Qfl), presentan valores de Conductividad Hidráulica entre 6.5E-4 y 9.0E-1, una Trasmisividad entre 0.025 m^2/d y 14.6 m^2/d y un Coeficiente de Almacenamiento entre 6.3E-5 y 1.38E-2, caracterizándolo como un acuífero de tipo libre al occidente y confinado en la parte central y oriental, con buena capacidad de almacenamiento. En la Tabla 4.4, se presentan los parámetros hidráulicos definidos para cada unidad hidrogeológica presentes en el área de estudio para la construcción del Túnel 5.

Tabla 4.4. Parámetros promedios de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio.

ACUÍFERO	Espesor (m)	T (m^2/d)	Kxy (m/d)	S
Depósitos Fluviolacustre (Libre)	30-35	8.E+00	4.E-01	8.E-04
Depósitos Fluviolacustre (Confinado)		6.E+00	5.E-01	4.E-02
Suelos Residuales	30-70	4.E+00	9.E-02	1.E-03
Formación Volcánica	100	2.E+00	2.E-02	2.E-06

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

5. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

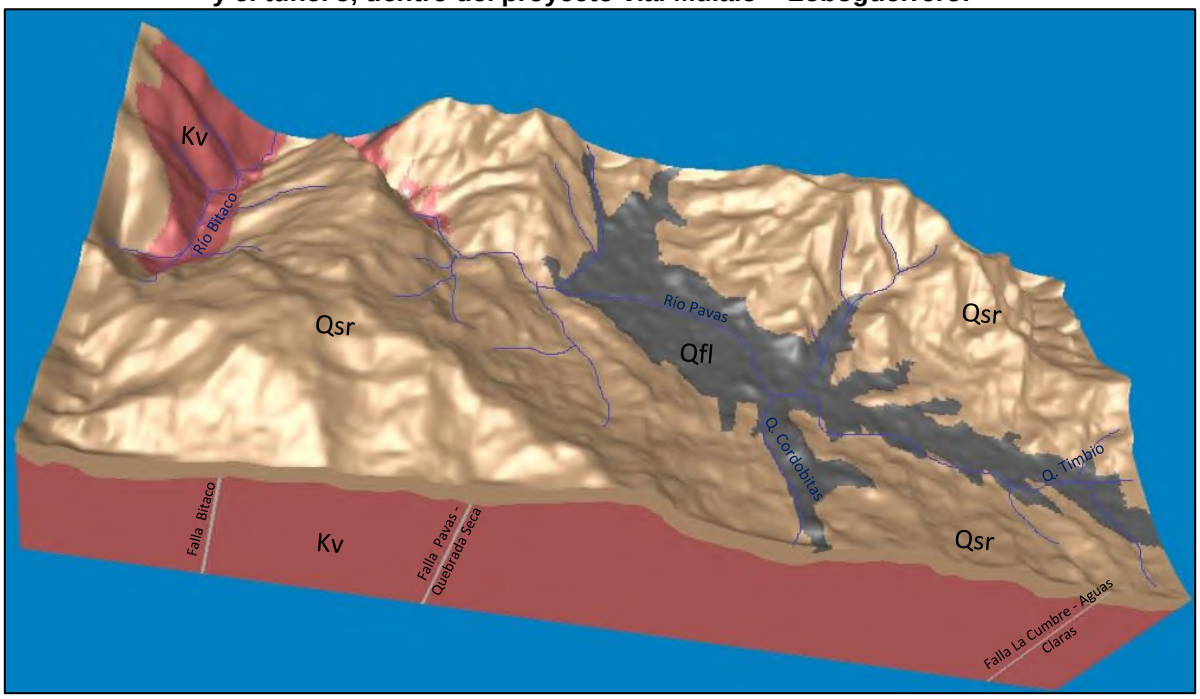
El Modelo Hidrogeológico Conceptual para un área de 38.9 Km^2 en el Corregimiento de Pavas, está basado en la correlación litológica de las diferentes unidades geológicas allí existentes y en sus características hidrogeológicas, elaborado con base en el análisis de bloques diagramas empleando el programa Visual Modflow 2011.1 3D, correlacionando cada uno de los componentes que intervienen en el desarrollo de los sistemas hídricos subterráneos y teniendo en cuenta el trazado de un tramo de la vía a cielo abierto del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero, al igual que la construcción del Túnel 5 con una longitud de 1236,5 m, ubicado al noroccidente del casco urbano de Pavas.

El modelo conceptual es de utilidad en la definición de la distribución espacial y del subsuelo de las diferentes unidades hidrogeológicas con sus características litológicas, espesores, variaciones laterales y en profundidad, como también el comportamiento de cada una de ellas referido a la capacidad de almacenamiento de agua subterránea. De esta forma se identifican zonas de recarga (infiltración), zonas de tránsito y zonas de descarga del agua subterránea.

En general, el Modelo Hidrogeológico Conceptual regional del área de estudio, estructuralmente, se encuentra influenciado por las fallas Bitaco, falla de tipo normal con rumbo N20-25E, la cual controla la dirección del río Bitaco. La falla Pavas – Quebrada Seca falla de tipo normal y activa, con dirección N15-20E, localizada al occidente del casco urbano de Pavas y parcialmente cubierta por depósitos recientes en el área de estudio. La falla La Cumbre – Aguas Claras presenta una dirección N15E, su trazado va desde el municipio de la Cumbre hasta el municipio de Restrepo; en el área de estudio se encuentra cubierta por depósitos recientes, igualmente se presenta una falla de tipo transversal que se puede relacionar con el trazado de la falla Mulaló, con dirección NWW.

En la Figura 5.1, se presenta el bloque diagrama general de la zona de estudio y posteriormente se realizará una descripción de cada uno de los componentes que intervienen en el comportamiento hidrogeológico de la zona, como lo son: las unidades geológicas presentes, las corrientes superficiales, la infiltración y zonas de recarga, así como su posible comportamiento hidrogeológico.

Figura 5.1. Bloque diagrama del modelo conceptual para el área del Corregimiento de Pavas y el túnel 5, dentro del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

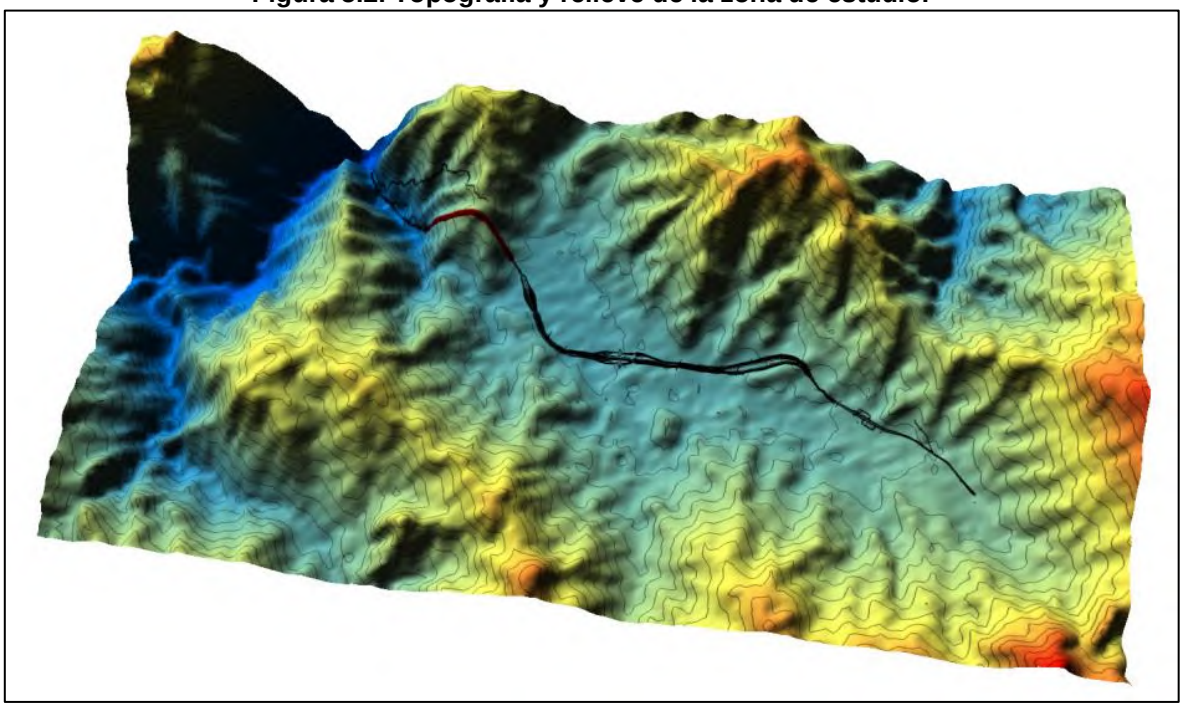
El bloque diagrama representa la geología presente en la zona de estudio, tanto en superficie como en profundidad. Se presentan los depósitos recientes dentro de los cuales se diferencian los Depósitos Coluviales (Qc), Depósitos Aluviales Recientes (Qal), Depósitos Fluviolacustres (Qfl), así como Suelos Residuales (Qsr) y la Formación Volcánica (Kv) compuesta por rocas del Cretáceo Medio a Superior.

El modelo conceptual contempla la representación del comportamiento estructural incluyendo todas las fallas que se presentan en el área de estudio, ya que estas tienen una influencia importante en el comportamiento de los sistemas hídricos subterráneos.

Las corrientes superficiales siempre tendrán una correlación con los sistemas hídricos subterráneos, por lo cual el modelo conceptual incluye como principal corriente superficial en el área de estudio el Río Pavas, la Quebrada Cordobitas, la Quebrada Timbio, así como sus afluentes más importantes; además, hacia el Occidente un tramo del Río Bitaco.

A continuación, se realiza una descripción de cada uno de los componentes mencionados.

Figura 5.2. Topografía y relieve de la zona de estudio.



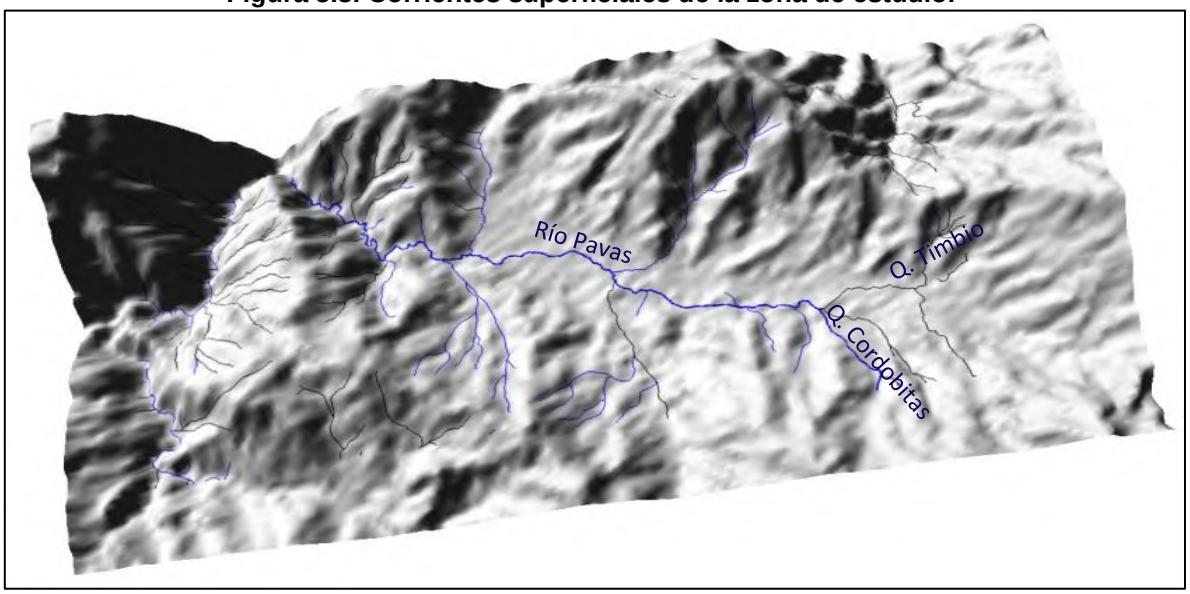
Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

La zona de estudio se caracteriza por presentar una topografía de vertientes altas, con colinas alargadas de topes redondeados y un valle alargado que suaviza el paisaje en la parte central del área de estudio. En la parte Occidental se presenta un relieve escarpado de fuertes pendientes y cañones en forma de V cerrada.

Topográficamente la zona de estudio se encuentra en alturas entre los 1060 y los 1735 msnm, presentándose las menores alturas en el valle del Río Pavas. En la Figura 5.2, se pueden observar las zonas más bajas en tonalidades azules y en rojo y naranja las mayores alturas.

Este tipo de topografía influye en el tipo de drenaje que se presenta en la zona de estudio, el drenaje se caracteriza por ser sub-paralelo a sub-dendrítico, con láminas de agua no muy profundas.

Figura 5.3. Corrientes superficiales de la zona de estudio.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017

En la zona de estudio se presenta una red de drenaje de tipo sub-paralelo a sub-dendrítico, hidrológicamente tienen un comportamiento de transito de ondas de creciente rápido, originando depositación de estos materiales en las zonas planas a semiplanas.

Las principales corrientes de carácter permanente son: el río Pavas el cual nace al suroriente del área de estudio y transita por todo el valle hasta desembocar en el Río Bitaco siendo esta la principal corriente superficial al occidente del área de estudio y las Quebradas Timbio y Cordobitas, afluentes del Río Pavas. En algunas zonas se presentan pequeños drenajes de carácter estacional afluentes a las quebradas mencionadas. La red de drenaje se presenta en la Figura 5.3.

Dentro del presente modelo se tienen en cuenta estas corrientes superficiales ya que presentan correlaciones con la hidrogeología de la zona de estudio, debido a que pueden recargar a los acuíferos o ser zonas de descarga de las aguas subterráneas, también se convierten en limites naturales de las cuencas hidrogeológicas. En la Tabla 5.1, se presentan los parámetros que se asumen para estas corrientes superficiales, estos parámetros se basan en la litología del lecho de las quebradas y las características morfológicas observadas en campo.

Igualmente se tienen en cuenta en el modelo conceptual los manantiales del área de estudio y principalmente los que abastecen de agua al acueducto de Pavas, ubicados al suroriente del Valle de Pavas sobre la zona plana.

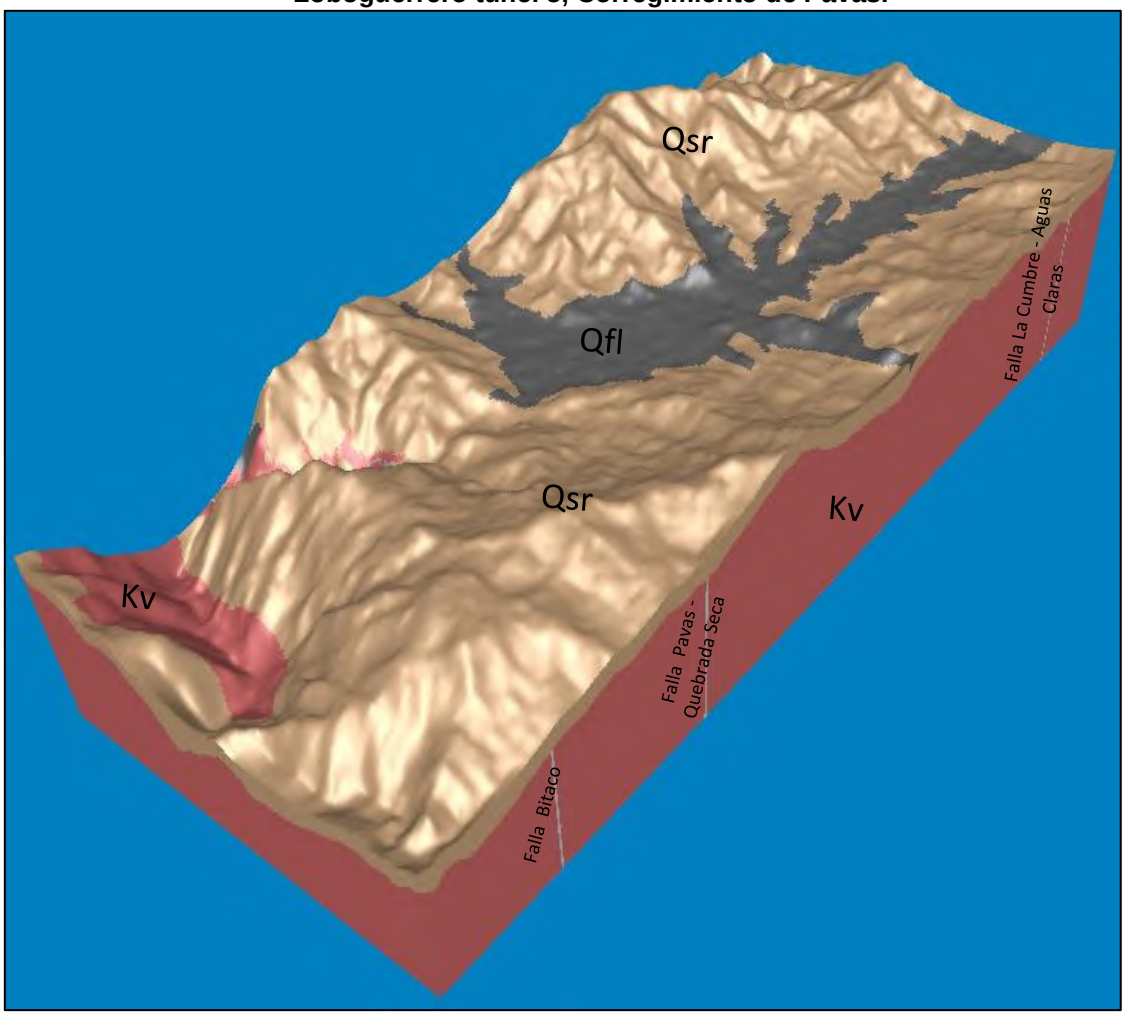
Tabla 5.1. Principales parámetros hidráulicos y características de las corrientes superficiales.

PARÁMETRO	UNIDAD	Río Bitaco	Río Pavas	Q. Cordobitas	Q. Timbio
Conductividad del Lecho	m/d	0.4	0.1	0.1	0.1
Espesor del Lecho	m	0.6	0.5	0.3	0.3
Ancho Promedio	m	6	2.5	1.5	1.5
Altura de la Lámina de Agua	m	1.5	1.0	0.3	0.3

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017

El modelo hidrogeológico conceptual contempla la geología de la zona de estudio y su comportamiento hidrogeológico con respecto a sus propiedades hidráulicas y las posibles interacciones con el agua subterránea, el agua superficial y la infiltración. En la Figura 5.4, se presenta la geología del área de estudio.

Figura 5.4. Conformación geológica del área de estudio para el proyecto vial Mulaló-Loboguerrero túnel 5, Corregimiento de Pavas.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

En superficie se presentan los Depósitos Coluviales (Qc), son depósitos aislados que se presentan al noroccidente del área de estudio, compuestos principalmente por fragmentos y cantos subredondeados de rocas volcánicas desprendidas de la Formación Volcánica, embebidos en una matriz arcillosa y limo-arcillosa producto de arrastre y depositación gravitacional del material saprolítico. Por la matriz fina que lo compone no permite el almacenamiento de agua subterránea y por lo cual se clasifica como un acuicludo, sin ninguna importancia hidrogeológica. Puede desarrollar espesores entre los 5.0 y 10.0 m.

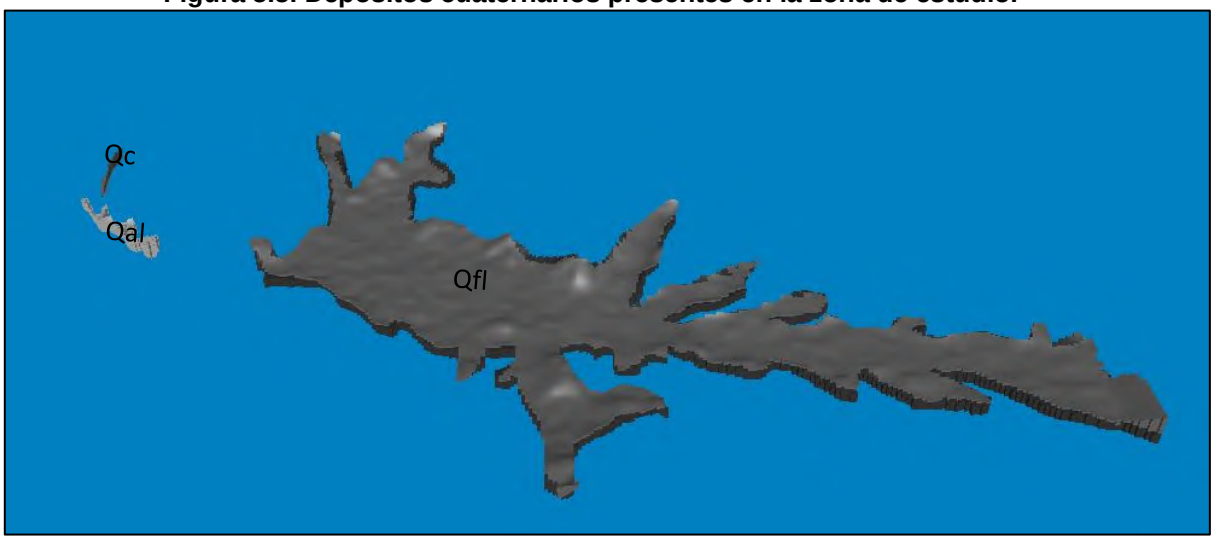
También se presentan en superficie los Depósitos Fluviolacustres (Qfl), los cuales presentan un espesor entre 5.0 y 40 m, como se pudo identificar mediante las columnas litológicas de las perforaciones realizadas para el proyecto vial. La parte superior de estos depósitos está constituida por una capa de arcilla y limos arcillosos y en algunas zonas suelos orgánicos, esta capa impermeable y confinante tiene espesores entre los 5 y 10 m. Subyaciendo esta capa confinante se presentan arenas finas a gruesas y hacia la base de estos depósitos se pueden encontrar intercalaciones de gravas finas con limos arenosos.

Los Depósitos Fluviolacustres desarrollan una porosidad primaria con Conductividades Hidráulicas entre 6.5E-4 y 9.0E-1 m/d, Coeficientes de Almacenamiento entre 6.3E-5 y 1.38E-2 y Transmisividades entre 2.5E-2 y 10.6 m^2/d, clasificándolo como un acuífero de tipo confinado en la zona donde surgen los manantiales del acueducto de Pavas donde se encuentra cubierto por el mayor espesor de materiales finos y con un comportamiento de tipo libre hacia el costado occidental.

En la parte noroccidental se presenta una pequeña porción de Depósitos Aluviales Recientes (Qal), asociados a la parte final del Río Pavas, con presencia heterogénea de materiales desde arcillas hasta arenas y algunos bloques de rocas de la formación volcánica, con un comportamiento hidrogeológico como acuífero de tipo libre muy local, del cual se desconocen sus propiedades hidráulicas.

En la mayoría de la parte de la superficie del área de estudio se presentan Suelos Residuales o Saprolito de la Formación Volcánica (Qsr), el cual se comporta hidrogeológicamente como un acuitardo de extensión regional y continuo de tipo confinado, debido a su composición de fragmentos de rocas volcánicas embebidas en saprolito limo arcilloso con espesores que no superan los 10.0 m, debajo de esta capa se presentan en algunas zonas arenas y limos, seguido por la meteorización de las diabasas que conforman la Formación Volcánica, con un comportamiento casi impermeable y en algunas zonas comunicado mediante fracturas. La profundidad de estos suelos puede llegar hasta los 70.0 m, siendo en las zonas de ladera o la parte alta de las colinas donde su espesor es menor. Desarrolla Conductividades entre 5.0 E-13 y 3.7 E-4 m/d, Coeficientes de Almacenamiento que van dese 1.27 E-3 hasta 4.5 E-6 y Transmisividades entre 2.4 E-2 y 20.7 m^2/d. En la Figura 5.5, se presentan los Depósitos Cuaternarios cartografiables que se encuentran en la zona de estudio.

Figura 5.5. Depósitos cuaternarios presentes en la zona de estudio.

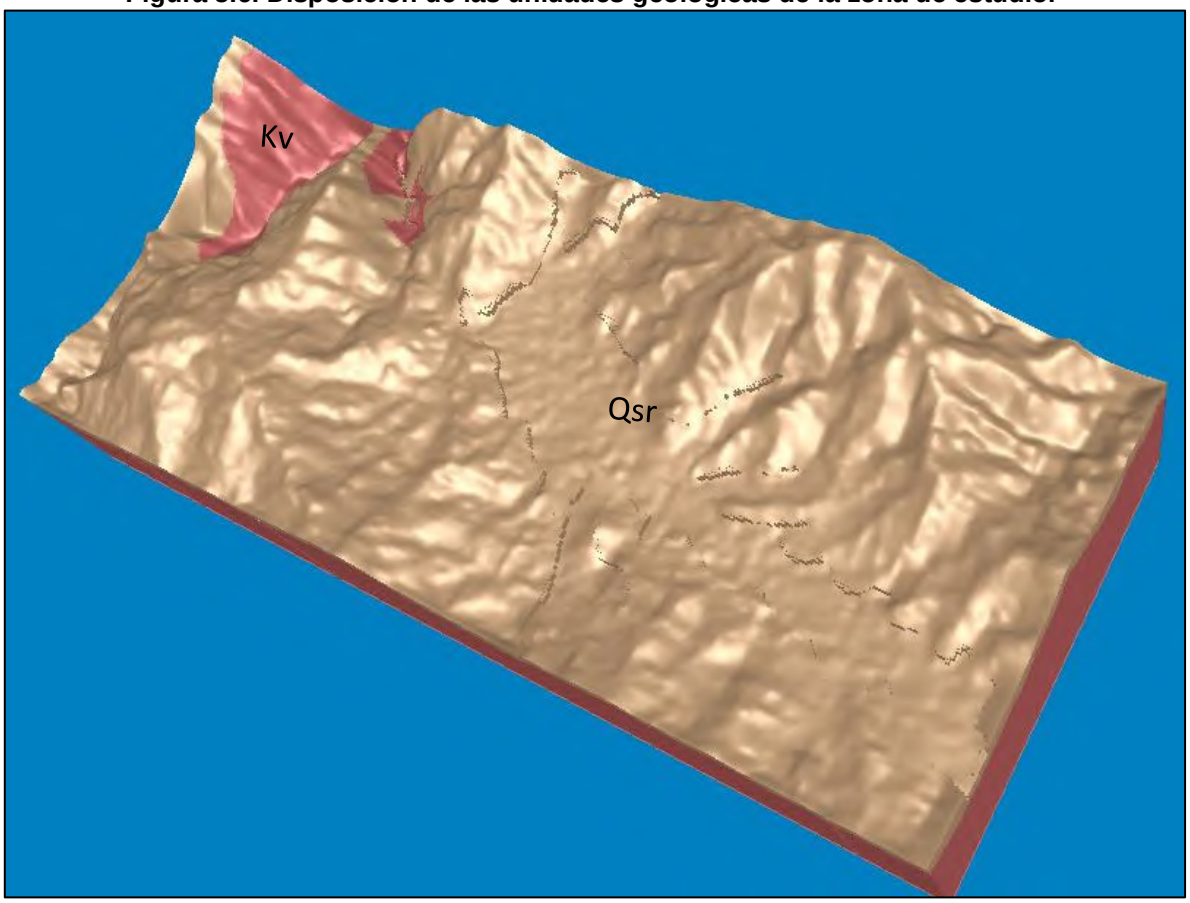


Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Suprayaciendo los depósitos recientes, se encuentra la Formación Volcánica (Kv) con un grado moderado de fracturamiento en profundidad un bajo grado de fracturamiento lo que conforma el basamento hidrogeológico. Aflora en las partes altas adyacentes al valle de Pavas, donde presenta un alto grado de fracturamiento favoreciendo la recarga de los acuíferos de la zona de estudio. Litológicamente está compuesta por lavas basálticas, brechas volcánicas y horizontes de rocas sedimentarias silíceas. Desarrolla una porosidad netamente secundaria y considerado como acuitardo, almacenando agua en las fracturas y descargándola de forma natural mediante manantiales de moderaos a bajos caudales.

Para el modelo conceptual se considera un espesor de 100 m, con un grado de fracturamiento moderado y un espesor igual para un bajo grado de fracturamiento configurándolo como el basamento hidrogeológico. Se establece una Conductividad Hidráulica entre 6.3 E-2 y 3.0 E-4 m/d, con un Coeficiente de Almacenamiento de 1.7 E-6 y 2.7 E-7. En las Figura 5.6, se presentan la Formación Volcánica y su disposición dentro del modelo conceptual.

Figura 5.6. Disposición de las unidades geológicas de la zona de estudio.



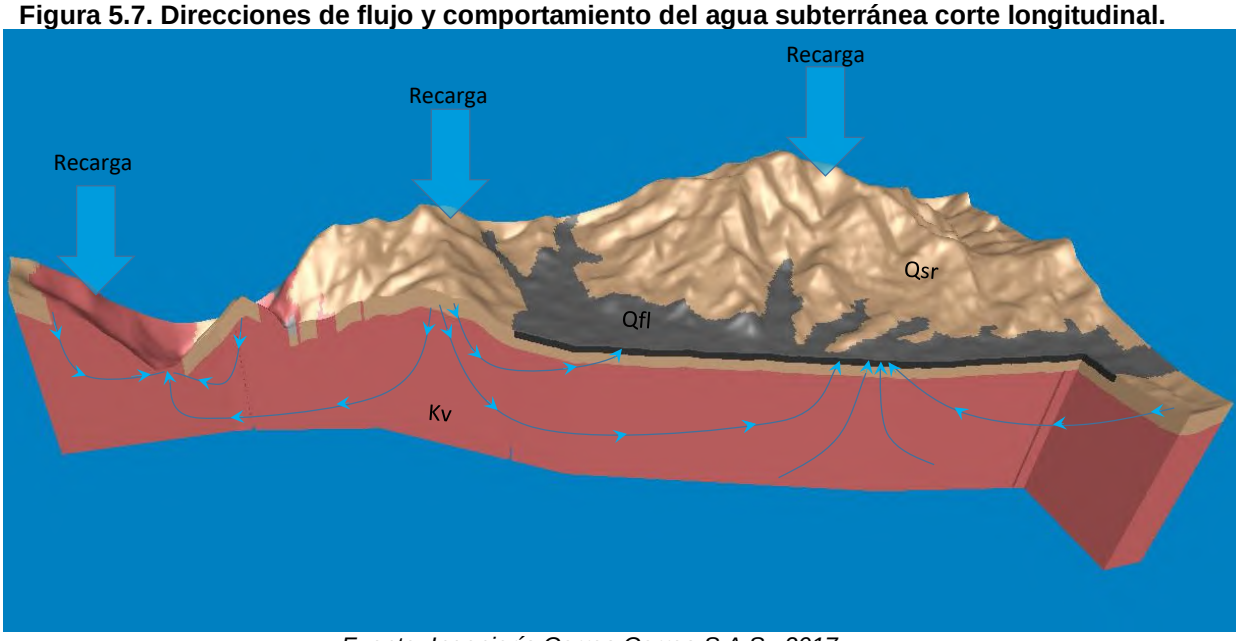
Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Basados en los niveles estáticos registrados en los piezómetros, la presencia de manantiales y la disposición de las unidades geológicas se estima que la dirección de flujo del agua subterránea, sigue la trayectoria de las inclinaciones de las unidades geológicas dirigiendo los flujos al Valle de Pavas y alimentando los Depósitos Fluviolacustres. Las direcciones en el valle presentan una dirección de flujo preferencial al noroccidente.

Como principales zonas de recarga se tiene los afloramientos de la Formación Volcánica y en menor medida la infiltración que se presenta sobre los Suelos Residuales.

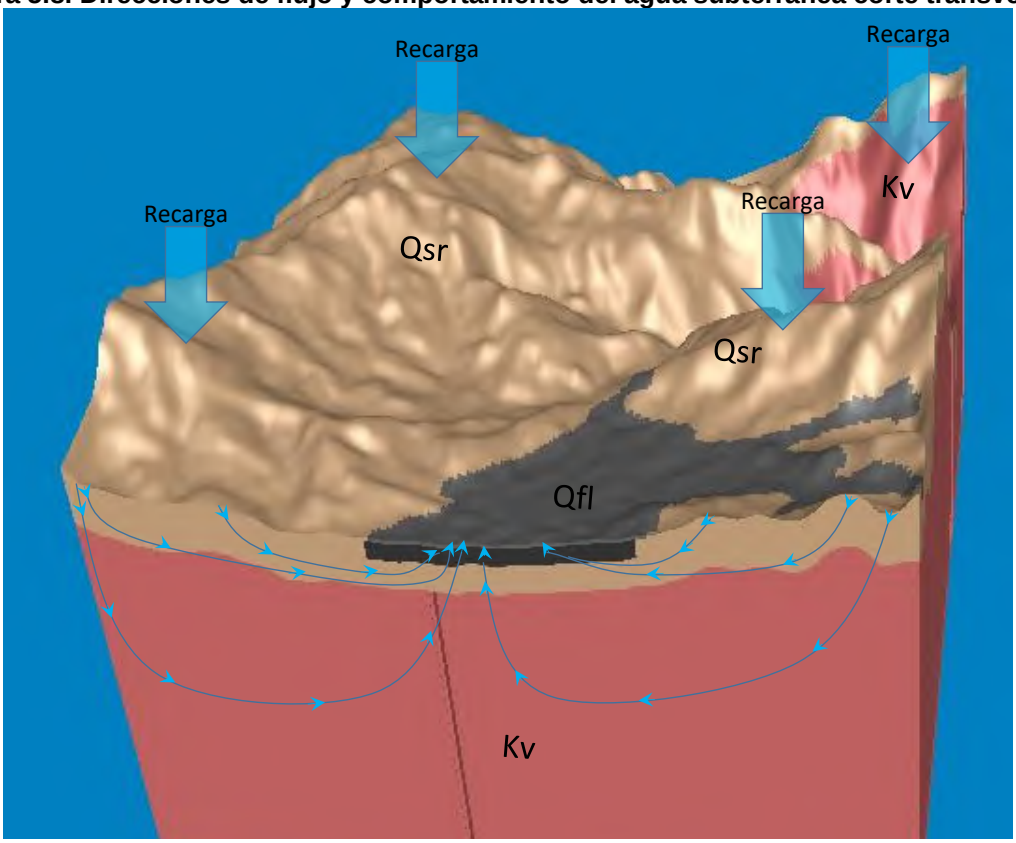
En la Figura 5.7, se presenta el comportamiento del agua subterránea y las posibles zonas de infiltración.

Figura 5.7. Direcciones de flujo y comportamiento del agua subterránea corte longitudinal.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Figura 5.8. Direcciones de flujo y comportamiento del agua subterránea corte transversal.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6. MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

Con los resultados de la elaboración de un modelo numérico hidrogeológico, se puede evaluar el comportamiento de los acuíferos del área de estudio, los impactos que puede producir la construcción del Túnel 5 y la vía a cielo abierto sobre los recursos hídricos, así como los impactos que las corrientes superficiales y el agua subterránea pueden ocasionar sobre la correcta construcción del túnel. Además, permite definir las medidas de mitigación de dichos impactos, necesarias para la construcción del túnel, el comportamiento de los niveles piezométricos después de la construcción del túnel y el efecto que las medidas de mitigación puedan tener sobre el mencionado recurso.

El modelo numérico se configura en el programa Visual Modflow Pro Versión 2011.1, incorporando las principales características hidrogeológicas y demás componentes que interactúan con el agua subterránea y de esta forma realizar simulaciones para el estado estacionario o condiciones naturales de flujo y en estado transitorio simulando la construcción del Túnel 5, así como las posibles medidas de mitigación.

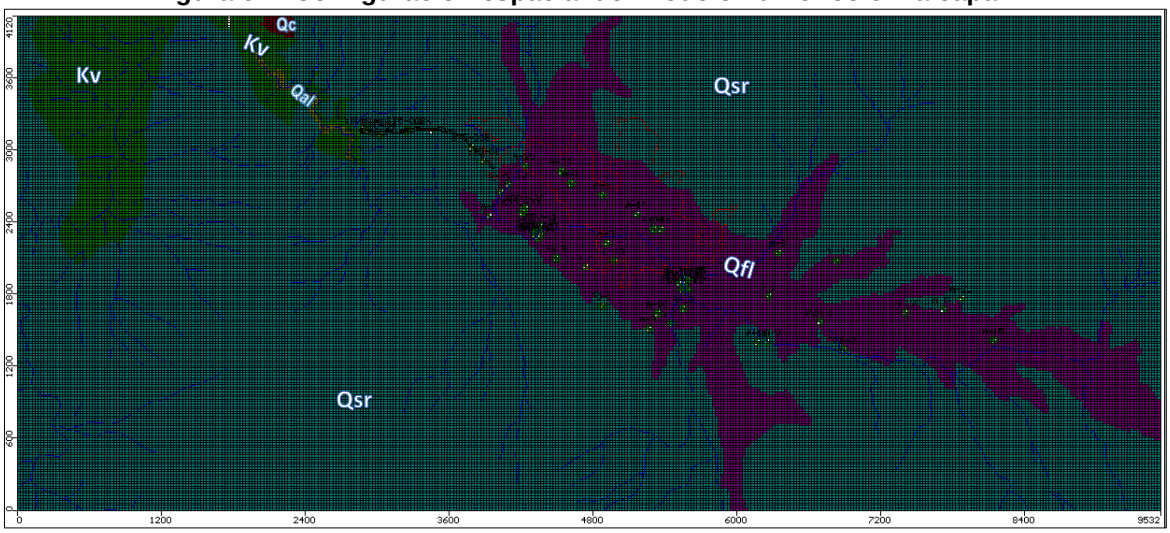
6.1 CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO.

La hidrogeología del área se representa a través de un modelo tridimensional con una malla de 380 columnas por 205 filas y siete capas que cubre el total del área de influencia directa e indirecta para la construcción del Túnel 5, correspondiente a un área total de 38.9 km^2. El modelo presenta un grado de detalle en cada una de sus celdas de 25 x 20 m.

- La primera (capa 1) representa la geología en superficie y principalmente busca representar los Suelos Residuales y Depósitos Fluviolacustres confinantes presentes en el área de estudio, con espesor de máximo de 5 metros. El límite superior de esta capa corresponde a la topografía del área.
- La capa 2 busca representar el Acuífero confinado asociado a los Deposito Fluviolacustre, igualmente se continúan representando los Suelos Residuales, esta capa tiene un espesor de 35 metros.
- La Capa 3, representa los Suelos Residuales que se encuentran por debajo de los depósitos Fuviolacustre con un espesor de 30 metros.
- Las Capas 4, 5 y 6 representan la Formación Volcánica (espesor de 150 m) con un grado de fracturamiento Moderado, desde la capa 4 y hasta la última capa se representan las fallas presentes en el área de estudio. La capa 5 se construyó para poder simular en esta el Túnel 5, esta capa tiene un espesor de 10 m.
- La Capa 7, representa la Formación Volcánica con un bajo grado de fracturamiento y un espesor de 100 m, representando el basamento hidrogeológico.

El modelo contempla las Fallas Bitaco y La Cumbre – Aguas Claras, las cuales se convierten en límites hidrogeológicos naturales. También se tienen en cuenta las Fallas Pavas – Quebrada Seca y la falla transversal asociada posiblemente a la falla Mulaló. En la Figura 6.1, se presenta la configuración del modelo numérico para la Capa 1.

Figura 6.1. Configuración espacial del modelo numérico en la capa 1.

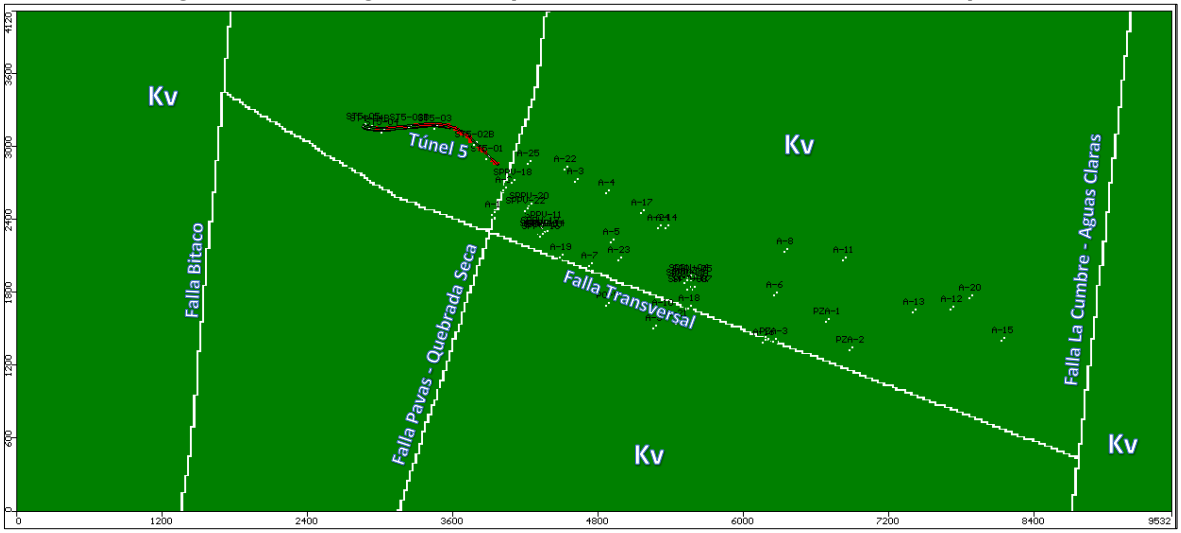


Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

La figura anterior representa la primera capa del modelo numérico hidrogeológico, en esta capa se representa la geología en superficie caracterizada por los afloramientos de las rocas de la Formación Volcánica (Kv), los Suelos Residuales (Qsr), los Depósitos Fluviolacustres (Qfl), los Depósitos Aluviales Recientes (Qal) y los Depósitos Coluviales (Qc). Igualmente, de integra, las corrientes superficiales, los piezómetros existentes y manantiales.

En la Figura 6.2, se representan la Formación Volcánica (Kv), la Falla Bitaco, La Cumbre – Aguas Claras, Pavas – Quebrada Seca y la falla transversal, así como el trazado el Túnel 5.

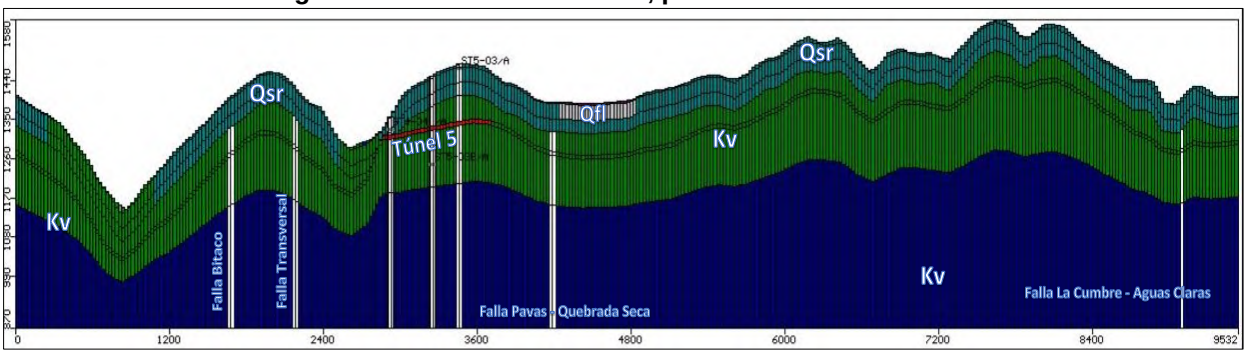
Figura 6.2. Configuración espacial del modelo numérico en la capa 5.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

En la Figura 6.3, se presenta un corte en la fila 48, la cual coincide con el trazado del Túnel 5.

Figura 6.3. Corte en la fila 120, por el trazado del túnel 5.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.2 CAUCES SUPERFICIALES Y CUERPOS DE AGUA

Desde el punto de vista hidrogeológico se considera que sólo las principales corrientes superficiales (ríos y quebradas) tienen una interacción directa con los acuíferos, especialmente con los acuíferos Cuaternarios y por ende con el flujo de agua subterránea. En el modelo numérico hidrogeológico se incorporan las siguientes corrientes superficiales: Río Pavas, Río Bitaco, Quebrada Cordobita y la Quebrada Timbio.

Como no se conocen las propiedades hidráulicas de los lechos de las citadas corrientes superficiales, se le asignan valores de conductividad hidráulica según las características litológicas de los materiales que los componen, los cuales se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Parámetros hidráulicos asignados a las corrientes superficiales del área de estudio.

PARÁMETRO	UNIDAD	Río Bitaco	Río Pavas	Q. Cordobitas	Q. Timbio
Conductividad del Lecho	m/d	0.4	0.1	0.1	0.1
Espesor del Lecho	m	0.6	0.5	0.3	0.3
Ancho Promedio	m	6	2.5	1.5	1.5
Altura de la Lámina de Agua	m	1.5	1.0	0.3	0.3

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.3 TIPOS DE ACUÍFEROS Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS

En el área de estudio se distinguen dos unidades acuíferas, dos acuitardos y un acuicludo. Las unidades hidrogeológicas se han caracterizado mediante pruebas hidráulicas tipo Slug o de Bombeo, realizadas en el año 2012 y dentro del presente estudio (2017).

6.3.1 Acuífero Depósitos Fluviolacustres

Este acuífero se encuentra en la parte central del área de estudio, en la zona plana del Valle del Río Pavas, se encuentra cubierto en la parte central y oriental del área por suelos residuales arcillosos y limo arcillosos con espesores hasta de 10 m. El acuífero Depósitos

Fluviolacustres puede desarrollar un espesor hasta de 30 m, en la parte central y se adelgaza hacia la zona de piedemonte, se encuentra constituido por capas de arenas finas a gruesas y hacia la base se pueden encontrar gravas finas a medias embebidas en limos arenosos.

Es un acuífero con porosidad primaria, de tipo confinado en la parte central y oriental del área de estudio y se comporta como libre en la parte occidental a la altura del casco urbano de Pavas.

Se constituye en el acuífero más importante del Valle de Pavas ya que en él se desarrollan los manantiales que abastecen el Acueducto de Pavas y en el que se encuentran un número importante de captaciones de agua subterránea.

6.3.2 Acuífero Depósitos Aluviales

Se presenta una franja alargada en la parte occidental del área de estudio, asociada a la zona encañonada del Río Pavas, se estima su espesor en máximo 5.0 metros, constituido por bloques y cantos de roca de la Formación Volcánica, con presencia de arcillas y arenas finas.

Se califica como un acuífero de porosidad primaria de tipo libre muy local con baja importancia hidrogeológica en el área de estudio.

6.3.3 Acuitardo Suelos Residuales

Ocupa la mayoría del área de estudio con una litología en la parte superficial constituida, con fragmentos de rocas volcánicas embebidas en saprolito (producto de la meteorización de la Formación Volcánica) limo arcilloso con un espesor máximo de 10 m, debajo de esta capa se presentan en algunas zonas arenas y limos, finalmente se presenta la meteorización de las rocas de la Formación Volcánica, con un comportamiento casi impermeable y en algunas zonas comunicado mediante fracturas con los depósitos que lo suprayacen y las rocas que lo subyacen.

La profundidad de estos suelos puede llegar hasta los 70.0 m, siendo en las zonas de ladera o la parte alta de las colinas donde su espesor es menor, su comportamiento hidrogeológico es de acuitardo de extensión regional y continuo de tipo confinado a semi-confinado.

6.3.4 Acuitardo Formación Volcánica

Se encuentra cubierto en la mayoría del área de estudio por saprolito, aflorando en laparte noroccidental del área de estudio; esencialmente se constituye por lava basáltica, diques de diabasa, cantidades menores de brecha volcánica, y horizontes de rocas sedimentarias silíceas con un fracturamiento de carácter local.

Hidrogeológicamente es considerado como un acuitardo por la capacidad de almacenar agua en las zonas de fractura, desarrolla una porosidad secundaria muy localizada. En profundidad se considera impermeable y constituye el basamento hidrogeológico.

Los Depósitos Coluviales son considerados como un acuicludo ya que por su litología no tienen capacidad de retener el agua subterránea.

6.3.5 Parámetros Hidráulicos de Unidades Hidrogeológicas

Los parámetros hidráulicos empleados para la elaboración del modelo numérico están soportados en tres pruebas de bombeo y cinco pruebas hidráulicas tipo slug realizadas dentro del presente estudio y diez pruebas de bombeo y cinco pruebas slug recopiladas de estudios anteriores, las cuales permitieron caracterizar las diferentes unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio. Los parámetros para las unidades que no presentan pruebas hidráulicas son estimados con base en la litología de cada unidad, así como de unidades similares en el país.

Los datos de entrada al modelo se presentan en la Tabla 6.2. En la Figura 6.4 se aprecia la distribución de los parámetros hidráulicos para la Capa 1.

Tabla 6.2. Parámetros hidráulicos asignados al modelo numérico hidrogeológico.

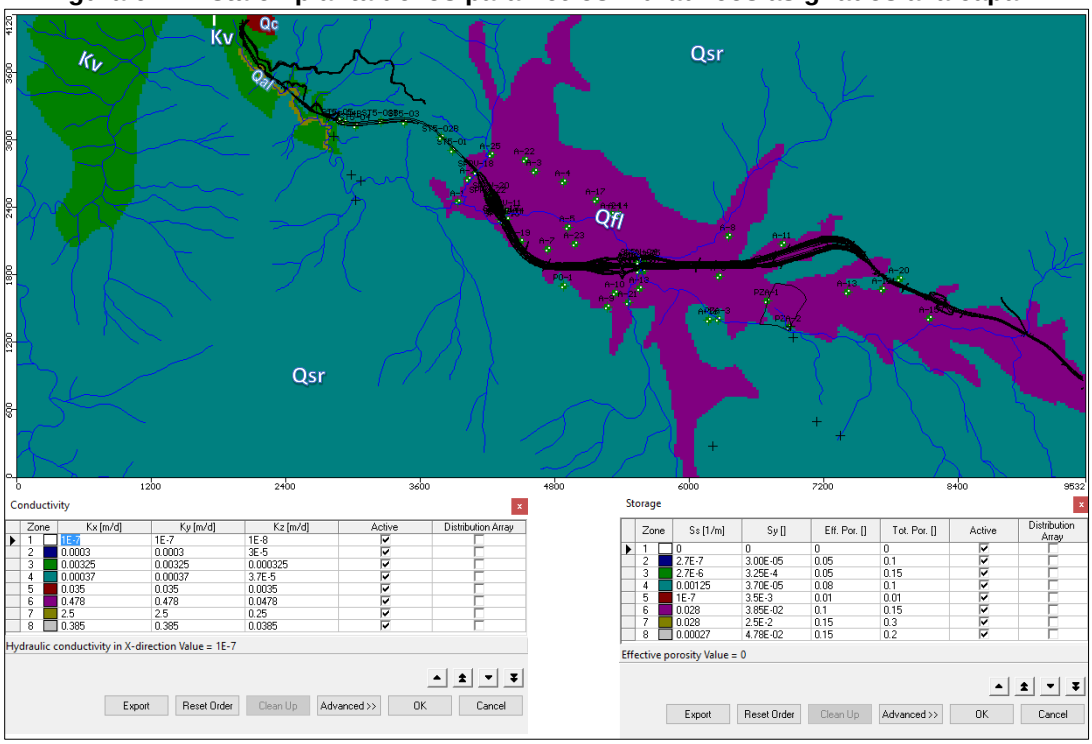
ACUÍFERO	Capa	Kxy (m/d)	KZ (m/d)	S	Ss	Sy	Porosidad Total
Depósitos Fluviolacustre (Libre)	1	3.85E-01	3.85E-02	2.80E-02	2.80E-03	0.15	0.15
Depósitos Fluviolacustre (Confinado)	2	4.78E-01	4.78E-02	2.70E-04	2.70E-06	0.2	0.2
Depósitos Aluviales Recientes*	1	2.5	2.5E-2	2.80E-02	2.80E-03	0.2	0.3
Depósitos Coluviales*	1	3.5E-2	3.5E-3	1.00E-07	1.00E-07	-	0.01
Suelos Residuales	1, 2 y 3	3.70E-04	3.70E-05	1.25E-03	1.25E-04	0.15	0.1
Formación Volcánica Fracturamiento Moderado	4, 5 y 6	3.25E-03	3.25E-4	2.70E-06	2.70E-07	0.15	0.15
Formación Volcánica Fracturamiento Bajo	7	3.00E-04	3.00E-05	2.70E-07	2.70E-08	0.15	0.1
Fallas*	4, 5, 6 y 7	1.00E-07	1.00E-08	-	-	-	-

*Kxy= Conductividad hidráulica horizontal, Kz= Conductividad hidráulica vertical, S= Coeficiente de Almacenamiento, Ss= Coeficiente de Almacenamiento específico (S/espesor saturado), Sy = Rendimiento específico, *Valores estimados.*

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

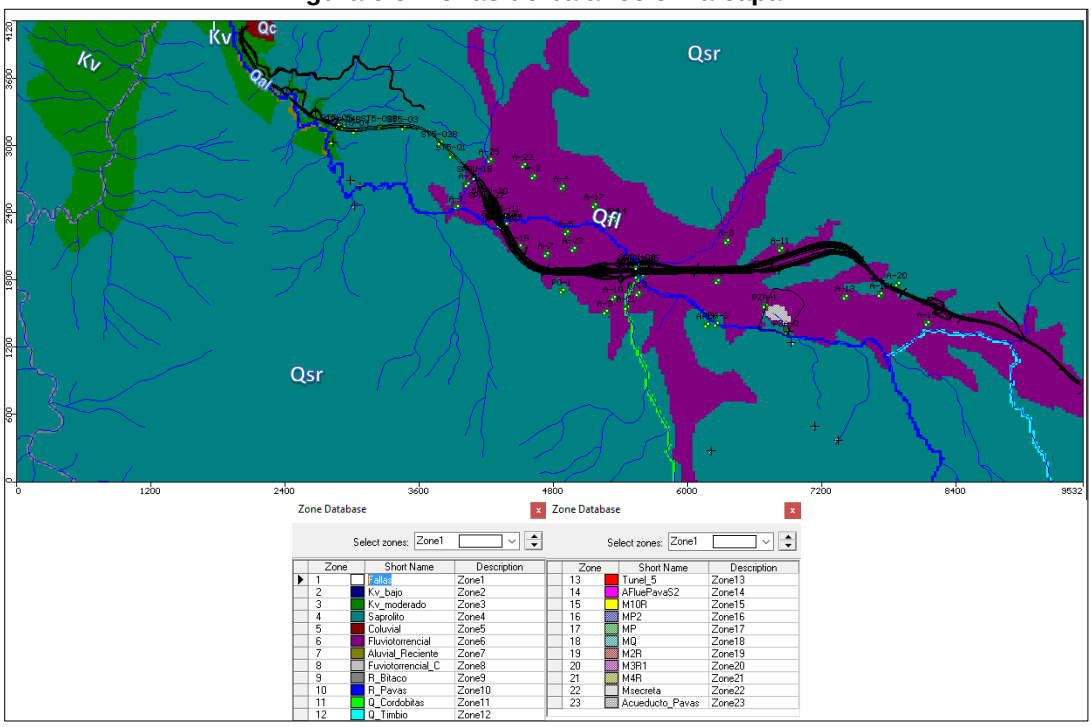
Cada una de las unidades que conforma el modelo numérico es monitoreada durante las simulaciones mediante zonas de balance (Zone Budget), con el fin de realizar sus respectivos balances de agua. En las Figura 6.5, se presentan las 23 zonas de balance establecidas, observando su distribución para la Capa 1 y Capa 5.

Figura 6.4. Vista en planta de los parámetros hidráulicos asignados a la capa 1.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Figura 6.5. Zonas de balance en la capa 1.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.4 SIMULACIONES

Para determinar el comportamiento del agua subterránea y evaluar los posibles impactos que se puedan generar por causas de la construcción del Túnel 5 y la vía a cielo abierto, se desarrolla el modelo numérico integrando los componentes que interactúan con el sistema hidrogeológico y controlando cada una de las unidades mediante zonas de balance que permiten evaluar el comportamiento y las interacciones del agua subterránea, para lo cual se desarrollan las siguientes simulaciones:

- **Estado Estacionario:** Busca representar las condiciones naturales del sistema hidrogeológico, manteniendo control en las corrientes superficiales, el trazado del túnel y los niveles piezométricos.
-
- **Estado Transitorio:** Se contempla un escenario el cual integra la excavación del Túnel 5 y la construcción del Terraplén para la vía a cielo abierto, si se presenta algún impacto fuerte sobre el sistema hídrico subterráneo o se clasifica como un túnel de Goteo o Fluido se realizará un segundo escenario que contemple la impermeabilización del túnel.

6.4.1 Simulación en Estado Estacionario

Con el fin de representar las condiciones actuales del sistema hidrogeológico de la zona de estudio, se incorporó al modelo numérico cada una de las características que interactúan con el agua subterránea; como control se emplearon los niveles medidos en 38 puntos de agua subterránea (pozos, piezómetros y aljibes) del área de estudio sin ninguna influencia por la construcción del proyecto vial y el túnel. Estos niveles son los puntos que permitirán hacer la calibración del modelo mediante comparación de los niveles calculado frente a los observados. En la Tabla 6.3, se presentan los puntos utilizados en la calibración.

Tabla 6.3. Piezómetros y niveles utilizados en la calibración del modelo numérico hidrogeológico.

IDENTIFICACIÓN	COORDENADAS		Cota (msnm)	Profundidad Nivel Estático (msnm)
	Este	Norte		
SPPV-07	1055239.318	897645.186	1390.9	1389.1
SPPV-09	1055208.432	897691.245	1391.6	1390.5
SPPV-05	1055239.270	897731.195	1389.1	1385.9
SPPV-06	1055208.408	897734.250	1391.1	1389.8
SPPV-10	1055177.568	897697.372	1391.4	1386.6
SPPV-08	1055199.201	897642.092	1391.9	1391.1
PZA-1	1056344.268	897375.492	1399.3	1399.5
PZA-2	1056541.904	897148.294	1401.9	1402.0
PZA-3	1055906.139	897218.585	1393.6	1393.0
SPPV-14	1054023.177	898102.208	1382.8	1381.5
SPPV-15	1053998.492	898096.051	1383.3	1377.8
SPPV-16	1053989.244	898077.616	1383.6	1378.7
SPPV-13	1053967.627	898105.249	1383.2	1379.5
SPPV-12	1053976.873	898126.757	1381.9	1367.4
SPPV-11	1054007.710	898169.778	1382.0	1378.4
SPPV-22	1053859.518	898286.424	1381.2	1378.6
SPPV-20	1053890.357	898326.373	1382.4	1380.5
SPPV-18	1053754.465	898525.963	1384.6	1381.6

IDENTIFICACIÓN	COORDENADAS		Cota (msnm)	Profundidad Nivel Estático (msnm)
	Este	Norte		
ST5-01	1053544.513	898719.369	1414.0	1370.0
ST5-02B	1053439.528	898832.967	1436.5	1356.5
ST5-03	1053115.428	898967.950	1477.4	1351.0
ST5-03B	1052905.577	898977.053	1449.3	1313.3
ST5-04	1052677.236	898936.998	1400.8	1349.5
ST4-04B	1052575.383	898967.662	1352.4	1314.4
ST5-05	1052519.826	898986.063	1331.8	1306.8
A-1	1053591.05	898258.63	1382.0	1379.4
A-2	1053683.52	898461.42	1382.48	1378.7
A-3	1054275.99	898532.39	1382.53	1380.7
A-4	1054529.10	898440.38	1385.42	1384.3
A-5	1054566.35	898034.93	1384.22	1381.7
A-6	1055918.27	897593.35	1395.09	1392.3
A-7	1054393.64	897838.24	1385.12	1383.3
A-8	1056004.48	897955.86	1405.77	1395.8
A-9	1054921.63	897325.55	1391.22	1390.5
A-10	1054989.46	897445.38	1388.92	1388.0
A-11	1056482.85	897888.55	1402.5	1398.7
A-12	1057371.86	897477.45	1410.84	1407.0
A-13	1057063.27	897452.70	1405.35	1402.8
A-14	1055019.93	898145.76	1392.98	1390.2
A-15	1057797.88	897222.74	1412.43	1403.9
A-16	1055825.91	897209.32	1398.65	1397.8
PO-1	1054532.69	897512.71	1389.72	1366.7
A-17	1054816.19	898271.59	1388.77	1385.4
A-18	1055208.55	897485.44	1398.35	1395.7
A-19	1054152.89	897911.83	1378.01	1375.5
A-20	1057529.20	897569.69	1417.43	1417.4
A-21	1055103.69	897359.44	1391.4	1389.6
A-22	1054186.44	898633.71	1382.37	1379.9
A-23	1054634.33	897881.38	1383.06	1381.2
A-24	1054961.30	898145.73	1391.08	1384.6
A-25	1053887.08	898676.55	1387.31	1385.6

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.4.1.1 Calibración del Modelo en Estado Estacionario

La calibración de un modelo número es la que permite darle validación y poder proceder a realizar escenarios que permitan estimar la situación futura del sistema hidrogeología ante cambios naturales o antrópicos, para esto se utiliza la comparación de los niveles calculados por el modelo numérico, frente a los observados en la naturaleza. En la Tabla 6.4, se pueden observar los resultados de los niveles calculados y los observados.

La calibración del estado estacionario tuvo en cuenta 38 puntos, presentando una diferencia máxima residual de 4.99 m en el área donde se ubica el Aljibe A-13 y un mínimo residual de 0.02 m en el área donde se localiza el piezómetro ST4-04. La calibración presenta un error medio cuadrático de 2.74 m y un error estándar de 0.36 m. El coeficiente de correlación entre los niveles piezométricos observados y calculados es de 0.996, estos datos nos permiten tomar el modelo estacionario como una buna representación del

sistema hidrogeológico de la zona en condiciones naturales. En la Figura 6.6, se presenta la gráfica de la calibración.

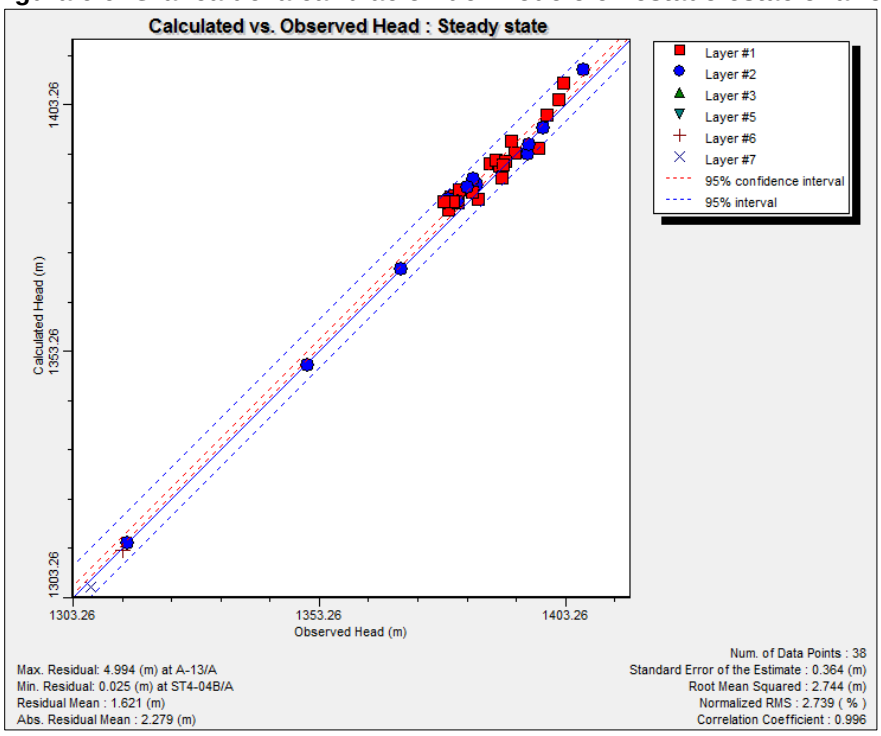
Tabla 6.4. Niveles observados y calculados en estado estacionario

Well/Point Name	X-Model	Y-Model	X-World	Y-World	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
A-16/A	6173.97	1400.34	1055826.00	897209.30	1397.79	1394.37	-3.42
A-18/A	5556.61	1676.45	1055209.00	897485.40	1395.74	1393.19	-2.55
A-14/A	5368.00	2336.77	1055020.00	898145.80	1390.24	1388.46	-1.78
A-25/A	4235.15	2867.56	1053887.00	898676.60	1385.58	1384.06	-1.52
ST5-05/A	2867.89	3177.07	1052520.00	898986.10	1306.80	1305.44	-1.36
A-8/A	6352.54	2146.87	1056004.00	897955.90	1395.80	1395.06	-0.74
ST5-03/A	3463.49	3158.96	1053115.00	898968.00	1351.00	1350.48	-0.52
ST5-03B/A	3253.64	3168.06	1052906.00	898977.10	1313.30	1312.90	-0.40
A-11/A	6830.91	2079.56	1056483.00	897888.60	1398.71	1398.57	-0.14
ST5-01/A	3892.58	2910.38	1053545.00	898719.40	1370.00	1369.95	-0.06
ST4-04B/A	2923.45	3158.67	1052575.00	898967.70	1314.40	1314.43	0.02
SPPV-09/A	5556.50	1882.26	1055208.00	897691.20	1390.53	1390.97	0.44
A-9/A	5269.70	1516.56	1054922.00	897325.50	1390.54	1391.05	0.51
PZA-3/A	6254.20	1409.60	1055906.00	897218.60	1392.96	1393.48	0.52
SPPV-08/A	5547.27	1833.10	1055199.00	897642.10	1391.10	1391.79	0.68
SPPV-06/A	5556.47	1925.26	1055208.00	897734.30	1389.81	1390.81	1.00
A-4/A	4877.16	2631.39	1054529.00	898440.40	1384.28	1385.63	1.35
PZA-1/A	6692.33	1566.50	1056344.00	897375.50	1399.48	1401.11	1.63
A-17/A	5164.25	2462.60	1054816.00	898271.60	1385.37	1387.08	1.71
A-21/A	5451.76	1550.45	1055104.00	897359.40	1389.60	1391.51	1.91
SPPV-14/A	4371.24	2293.22	1054023.00	898102.20	1381.47	1383.48	2.01
SPPV-18/A	4102.53	2716.97	1053754.00	898526.00	1381.55	1383.62	2.07
PZA-2/A	6889.97	1339.31	1056542.00	897148.30	1401.96	1404.26	2.30
A-1/A	3939.12	2449.64	1053591.00	898258.60	1379.42	1382.03	2.61
SPPV-07/A	5587.38	1836.20	1055239.00	897645.20	1389.11	1392.02	2.91
A-7/A	4741.71	2029.25	1054394.00	897838.20	1383.31	1386.41	3.10
SPPV-20/A	4238.42	2517.38	1053890.00	898326.40	1380.46	1383.64	3.18
A-12/A	7719.93	1668.46	1057372.00	897477.40	1406.98	1410.21	3.23
A-10/A	5337.53	1636.40	1054989.00	897445.40	1387.95	1391.39	3.44
A-24/A	5309.36	2336.74	1054961.00	898145.70	1384.63	1388.10	3.47
A-6/A	6266.34	1784.36	1055918.00	897593.30	1392.25	1395.87	3.62
A-3/A	4624.06	2723.40	1054276.00	898532.40	1380.70	1384.76	4.06
A-5/A	4914.42	2225.94	1054566.00	898034.90	1381.69	1386.12	4.43
SPPV-13/A	4315.69	2296.26	1053968.00	898105.20	1379.52	1384.16	4.64
A-22/A	4534.51	2824.72	1054186.00	898633.70	1379.92	1384.58	4.66
A-2/A	4031.59	2652.43	1053684.00	898461.40	1378.74	1383.41	4.67
SPPV-22/A	4207.58	2477.44	1053860.00	898286.40	1378.58	1383.51	4.92
A-13/A	7411.34	1643.71	1057063.00	897452.70	1402.80	1407.79	4.99

Well/Point Name: Identificación del punto, X-Model: Coordenadas del modelo, X-World: Coordenadas reales, Obs: Niveles observados, Calc: Niveles calculados, Calc.-Obs: Diferencia niveles calculados vs observados.

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Figura 6.6. Grafica de la calibración del modelo en estado estacionario.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.4.1.2 Dirección de flujo del Agua Subterránea

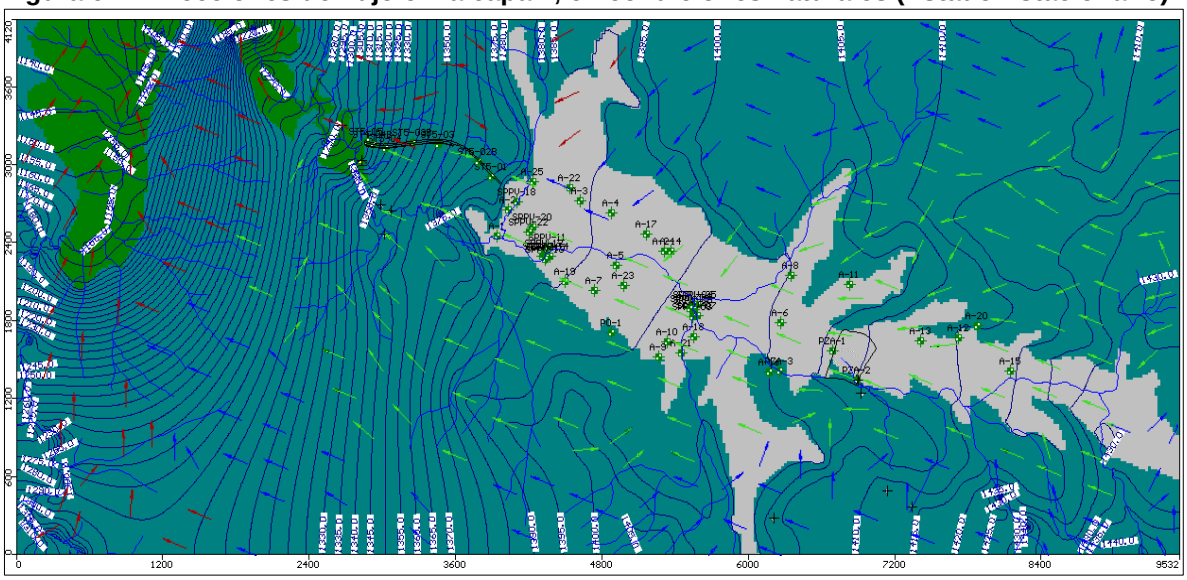
La simulación en estado estacionario para la capa 2 (Acuífera Depósitos Fluviolacustres y Suelos Residuales) representa las direcciones de flujo generales del agua subterránea desde el suroriente al noroccidente, siguiendo la dirección del Río Pavas.

De forma sectorizada se observan flujos desde las partes más altas que confluyen en la parte plana, lo cual indica que la zona de recarga del acuífero Fluviolacustre es el sector Cresta de Gallo y el sector de la Cumbre. En la Figura 6.7, se presentan las direcciones de flujo para la segunda capa del modelo.

Para la capa 5 (Acuitardo Formación Volcánica), el flujo subterráneo se encuentra influenciado por las fallas de la zona de estudio, incluso generando flujos ascendentes en la falla transversal, lo cual puede estar alimentando los manantiales que abastecen el Acueducto de Pavas. El flujo del agua subterránea de esta capa, a la altura del Valle de Pavas presenta una dirección del suroriente al noroccidente y a la altura del valle del Río Bitaco una dirección al norte. Ver **Figura 6.8**.

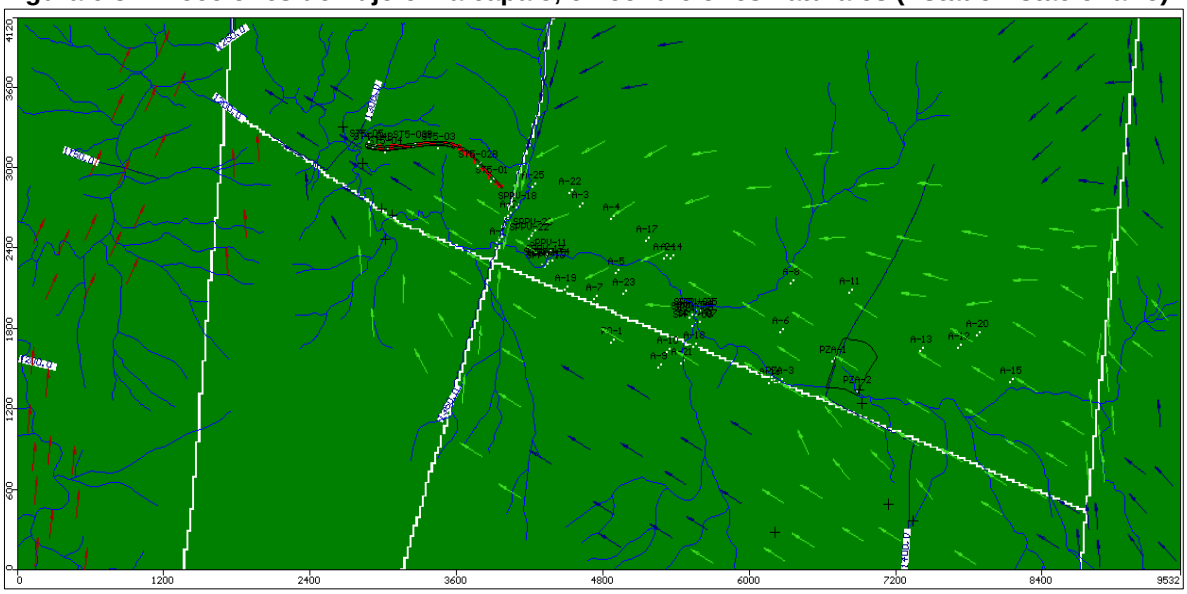
En la Figura 6.9, se presenta un corte a la altura de los manantiales del Acueducto de Pavas donde se presentan flujos ascendentes los que pueden estar originando estos manantiales.

Figura 6.7. Direcciones de flujo en la capa 2, en condiciones naturales (Estado Estacionario).



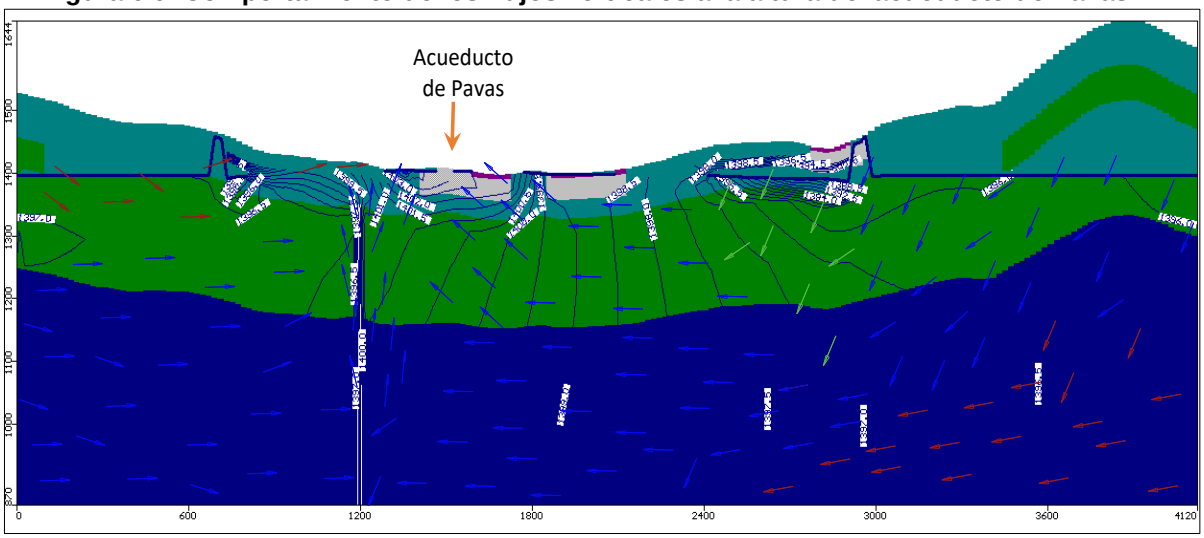
Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Figura 6.8. Direcciones de flujo en la capa 5, en condiciones naturales (Estado Estacionario).



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Figura 6.9. Comportamiento de los flujos verticales a la altura del acueducto de Pavas.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.4.1.3 Comportamiento de las Corrientes Superficiales

Al modelo numérico se incorporaron las principales corrientes superficiales de la zona de estudio, las cuales están en interacción con el sistema hídrico subterráneo, en la Tabla 6.5 se presenta los caudales que se encuentran interactuando, estos caudales representan el intercambio de agua, más no el caudal base de las corrientes superficiales. El modelo muestra que el sistema se encuentra en equilibrio ya que las entradas a cada una de las corrientes superficiales son prácticamente igual a las salidas. Se presentan pequeñas diferencias que pueden ser efecto de los cálculos internos de la modelación.

Tabla 6.5. Interacción de las corrientes superficiales en estado estacionario

ID	ENTRADA		SALIDA		BALANCE
	m^3/d	l/s	m^3/d	l/s	l/s
Río Bitaco	4.81	0.06	4.81	0.06	0.00
Río Pavas	1099.30	12.72	1099.30	12.72	0.00
Quebrada Cordobitas	73.15	0.85	73.15	0.85	0.00
Quebrada Timbio	252.16	2.92	252.16	2.92	0.00

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Los manantiales son descargas naturales de los sistemas hídricos subterráneos, estos se presentan en las zonas de mayor saturación de las unidades hidrogeológicas. En la zona de estudio se diferencian dos sistemas de manantiales; el que da origen a los matinales del Acueducto, de carácter surgente, los cuales emergen de una zona de mayor presión a la superficie y al noroccidente se presentan manantiales por fractura, originados por la saturación de fracturas de la Formación Volcánica.

El modelo numérico representa los manantiales mediante la propiedad Drain con una conductancia de 800 m^2/d, representando caudales entre 0.1 l/s y máximo 14 l/s, caudales similares a los que se presentan en los manantiales del área de estudio. En la Tabla 6.6, se presentan los caudales de los manantiales, calculados mediante el modelo numérico.

Tabla 6.6. Interacción de las corrientes superficiales en estado estacionario

CAUDAL	IDENTIFICACIÓN MANANTIALES VALLE DEL RÍO PAVAS										
	M3R-1	M4-R	M16R	MP	MP2	M10R	MSECRETA	AFLUEPAVAS2	M2R	MQ	Acueducto Pavas
m^3/d	28.37	17.62	21.92	68.81	28.48	37.58	86.68	26.37	48.90	8.73	2123.20
l/s	0.33	0.20	0.25	0.80	0.33	0.43	1.00	0.31	0.57	0.10	24.57

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.5 SIMULACIONES EN ESTADO TRANSITORIO

Tomado como base el modelo en estado estacionario, el cual representa de buena manera las condiciones naturales del sistema hidrogeológico de la zona de estudio. Se simulan un escenario el cual contempla la construcción del Túnel 5 con una longitud de 1236.5 m y la construcción del terraplén para la vía a cielo abierto, esta simulación no contempla ningún proceso para controlar los flujos de agua que pueden ingresar al túnel.

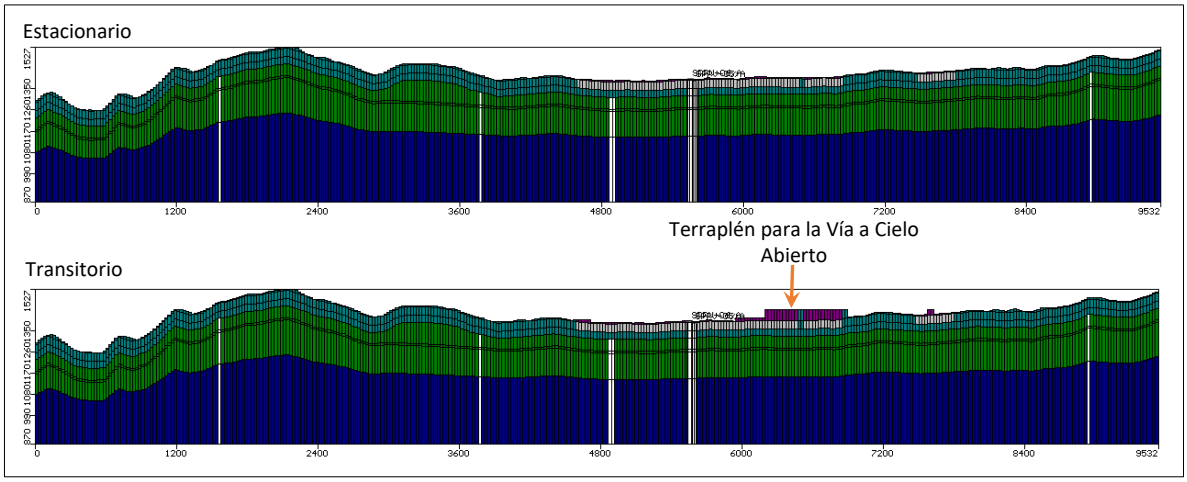
6.5.1 Estado Transitorio - Escenario con Túnel 5 y Terraplén para Vía a Cielo Abierto

Después de tener representadas las condiciones hidrogeológicas actuales por medio del modelo en estado estacionario, se procede a realizar el modelo en estado transitorio donde se contempla la construcción de un terraplén con una altura promedio de 5 m, sobre el cual se construirá la vía a cielo abierto desde portal salida de túnel 4 (al oriente del área de estudio) hasta el portal de entrada de túnel 5 (al noroccidente del área de estudio). En la Figura 6.10, se presenta un corte comparativo evidenciando la simulación del terraplén.

Igualmente se simula la construcción del túnel 5 mediante la propiedad Dren y una conductancia por unidad de área alta (40000 1/d) buscando representar un espacio vacío dentro de la Formación Volcánica, unidades geológicas sobre la que se construirá el túnel. El modelo se simula para un periodo de diez años, correspondiente a 4.5 años de construcción y 5.5 años de operación.

Cada unidad del modelo es monitoreada mediante una zona de balance para poder estimar los volúmenes de agua que interactúan con cada componente y principalmente el túnel.

Figura 6.10. Comparación corte fila 110, evidenciando la simulación del terraplén para la vía a cielo abierto.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.5.1.1 Caudales de Ingreso al Túnel 5

Para simular la construcción del túnel 5, se tuvo en cuenta la programación de obra tentativa establecida por CONIMAR, donde se establecieron tiempos y rendimientos de excavación, de esta manera se incluyeron los túneles de forma progresiva. El túnel fue monitoreado mediante una zona de balance, permitiendo conocer los caudales de ingreso durante la etapa constructiva (4.5 años), así como durante un periodo de operación de 5.5 años. En la Tabla 6.7, se presentan los caudales de ingreso al túnel 5 según el avance constructivo y etapa de operación.

Tabla 6.7. Caudales de ingreso al túnel 5, sin mitigación.

Tiempo del Modelo (días)	Longitud Excavada (m)	Caudales de Ingreso al Túnel		
		m^3/d	l/s	l/m/10m
182	110	114.75	1.33	7.24
365	278	101.70	1.18	2.54
547	425	99.30	1.15	1.62
730	570	144.15	1.67	1.76
914	715	470.40	5.44	4.57
1095	875	245.70	2.84	1.95
1280	1030	508.35	5.88	3.43
1463	1190	237.15	2.74	1.38
1643	1236	311.25	3.60	1.75
2312	1236	154.50	1.79	0.87
2981	1236	58.05	0.67	0.33
3650	1236	57.75	0.67	0.32

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

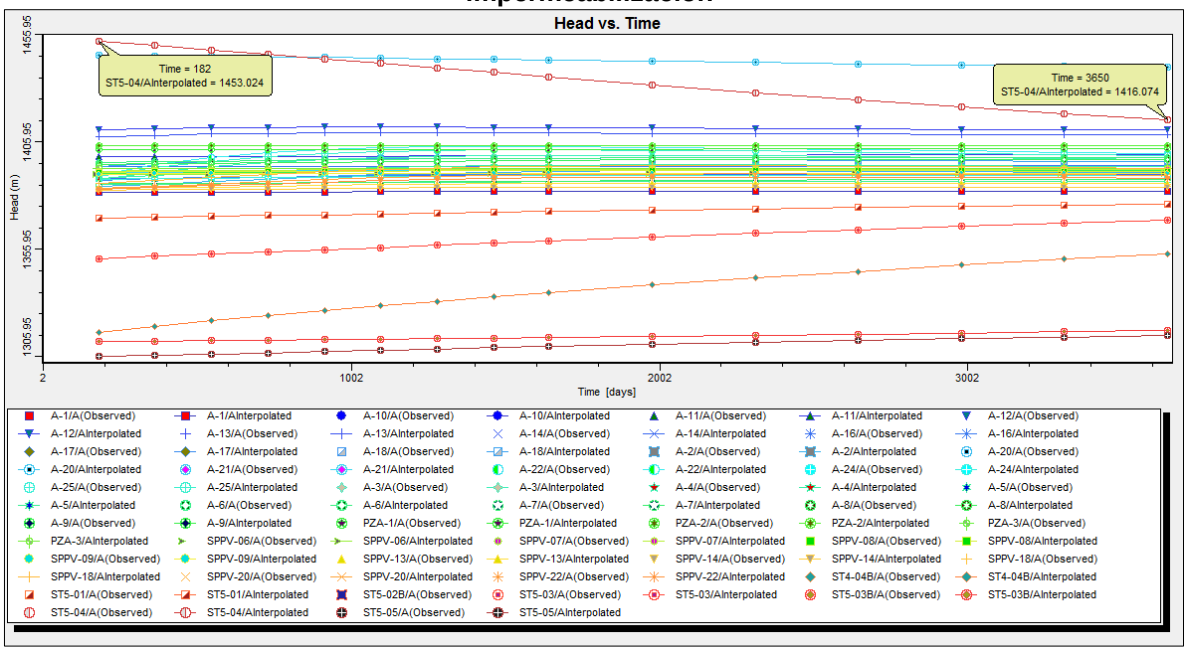
Para la etapa de construcción se presentarán picos de ingreso de agua al túnel cuando se logra una longitud excavada de 715 m, ingresando 5.4 l/s esto se da cuando el túnel atraviesa la zona de mayor cobertura, en total al túnel en etapa de construcción le ingresarán 25.8 l/s.

Durante el periodo de operación los caudales de ingreso al túnel van descendiendo y a partir del día 2981 este tiende a estabilizarse en 0.6 l/s.

6.5.1.2 Variación de los niveles piezométricos

La construcción del túnel 5, genera una despresurización de la Formación Volcánica y el ingreso de flujos al interior del túnel sin contemplar ningún proceso de impermeabilización causa un descenso en los niveles piezométricos en el sector del ST5-04 de hasta 37 metros, este piezómetro se encuentra sobre el eje del túnel a la altura de portal salida. En la Figura 6.11, se presenta la gráfica del comportamiento de los piezómetros para el periodo simulado.

Figura 6.11. Comportamiento de los niveles piezométricos para el túnel 5, sin proceso de impermeabilización



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

La construcción del terraplén para la vía a cielo abierto, no presentan ningún impacto sobe los niveles piezométricos de las zonas adyacentes.

6.5.1.3 Posibles impactos sobre las corrientes superficiales y Manantiales

Con el fin de poder cuantificar los posibles impactos que se puedan generar sobre los caudales de las corrientes superficiales del área de estudio, durante las simulaciones se monitorea cada una de las corrientes mediante zonas de balance. Este seguimiento se realiza para todos los periodos de simulación. Tabla 6.8, se presenta el balance para cada una de las corrientes superficiales del área de estudio al finalizar la construcción de los túneles y en la Tabla 6.9, la comparación para el último año simulado.

La comparación de los caudales de interacción agua – superficial agua subterránea muestra que ninguna de las corrientes superficiales presenta impacto en los caudales de interacción, para el periodo de finalización del proyecto vial y la construcción del Túnel 5.

Tabla 6.8. Balance de las corrientes superficiales al final de la construcción del túnel 5 y la vía a cielo abierto.

ID	ENTRADA		SALIDA		BALANCE	DISMINUCIÓN DE CAUDAL
	m^3/d	l/s	m^3/d	l/s	l/s	l/s
Río Bitaco	864.03	10.00	863.58	10.00	0.01	0.01
Río Pavas	3456.70	40.01	3456.90	40.01	0.00	0.00
Quebrada Cordobitas	320.06	3.70	320.11	3.70	0.00	0.00
Quebrada Timbio	389.78	4.51	389.83	4.51	0.00	0.00

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Tabla 6.9. Balance de las corrientes superficiales al final del periodo simulado (10 años) con la construcción del túnel 5 y la vía a cielo abierto.

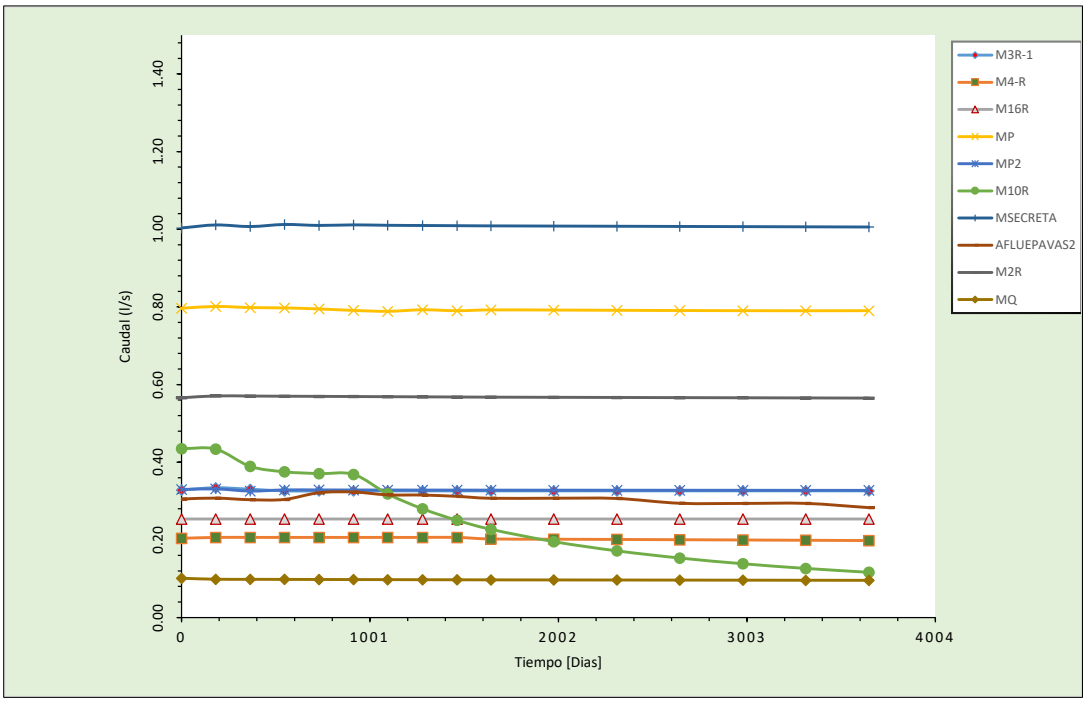
ID	ENTRADA		SALIDA		BALANCE	DISMINUCIÓN DE CAUDAL
	m^3/d	l/s	m^3/d	l/s	l/s	l/s
Río Bitaco	735.96	8.52	736.61	8.53	-0.01	-0.01
Río Pavas	2675.10	30.96	2675.10	30.96	0.00	0.00
Quebrada Cordobitas	206.96	2.40	206.94	2.40	0.00	0.00
Quebrada Timbio	276.37	3.20	276.35	3.20	0.00	0.00

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

La construcción del Túnel 5 y el descenso de los niveles piezométricos en la zona de portal salida genera que el manantial M10R descienda su caudal en un 73%, pasando de 0.43 l/s a 0.12 l/s, el manantial AFLUEPAVAS2 presenta un descenso del caudal de 7.2% pasando de 0.31 l/s a 0.28 l/s y el manantial MQ desciende su caudal en un 5.2% pasando de 0.1 l/s a 0.09 l/s. En la Figura 6.12, se presenta el comportamiento de los manantiales para los 10 años simulados, este comportamiento permite estimar que estos manantiales se estabilizarán con el caudal reportado para el último periodo simulado, lo que implica que no desaparecerán en su totalidad.

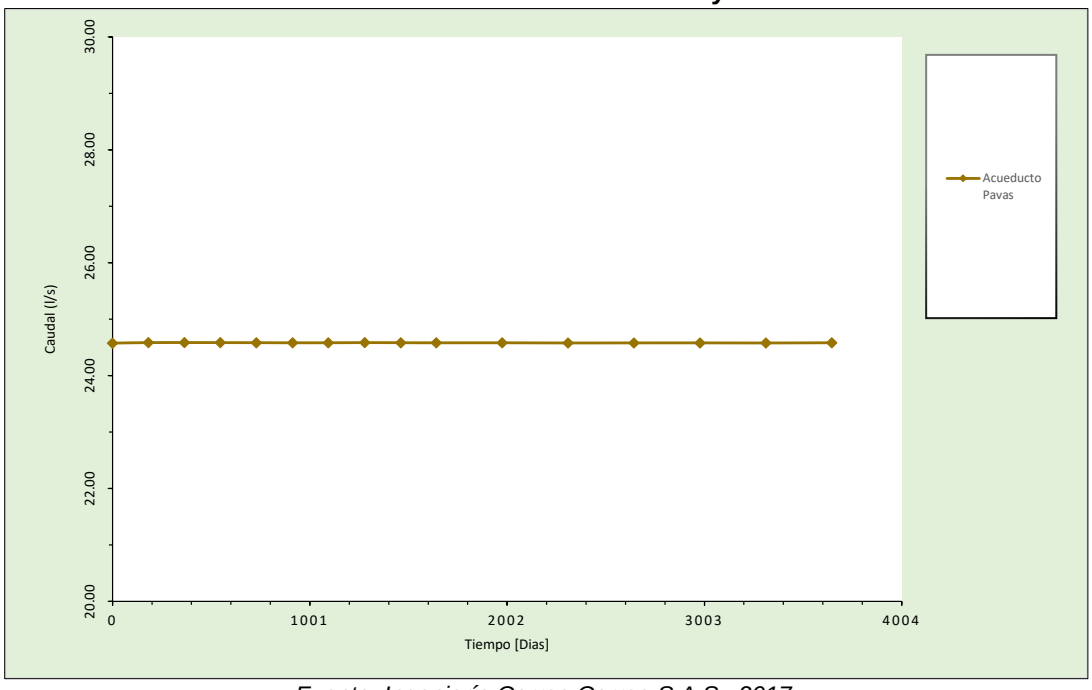
Los manantiales del Acueducto de Pavas no presentan impacto en ninguno de los periodos simulados. En la Figura 6.14, se presenta el comportamiento de Acueducto de Pavas.

Figura 6.12. Comportamiento de los caudales de los manantiales por la construcción del túnel 5.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Figura 6.13. Comportamiento de los caudales del manantial del acueducto de Pavas por la construcción de la vía a cielo abierto y el túnel 5.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.5.2 Estado Transitorio – Escenario con Túnel Impermeabilizado

Después de tener el modelo que representa la construcción del Túnel 5, sin ningún proceso de impermeabilización se realizó se calculó el caudal de ingreso al túnel por cada 10 m, siguiendo lo sugerido por Bieniawski (1989) en cuanto al sistema de clasificación del macizo rocoso frente a las condiciones del agua subterránea, con el fin de representar las impermeabilizaciones en las zonas adecuadas. En la Tabla 6.10, se presenta la clasificación Bieniawski y en la Tabla 6.11, el cálculo de caudales de ingresos al túnel por cada 10 metros.

Tabla 6.10. Sistema de clasificación del macizo rocoso (Bieniawski 1989)

Condiciones de Agua Subterránea	Entradas por cada 10 metros de longitud de túnel (l/min)	Ninguna	< 10	10 - 25	25 – 125	> 125
	Presión del agua en la junta / Dirección principal de esfuerzo	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5
	Condiciones generales	Completamente Seca	Húmedo	Mojado	Goteo	Fluido
Tratamiento Recomendado		Ninguno	Ninguno	Ninguno	Pre-inyecciones (Localizadas)	Pre-inyecciones

Fuente: Basado en Bieniawski (1989).

Tabla 6.11. Caudal de ingreso al túnel por cada 10 metros para la simulación del túnel sin impermeabilizar.

Tiempo del Modelo (días)	Longitud Excavada (m)	l/m/10m
182	110	7.24
365	278	2.54
547	425	1.62
730	570	1.76
914	715	4.57
1095	875	1.95
1280	1030	3.43
1463	1190	1.38
1643	1236	1.75
2312	1236	0.87
2981	1236	0.33
3650	1236	0.32

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

Según la clasificación de Bieniawski, el Túnel 5 presenta una clasificación como húmedo y no necesitaría ningún tratamiento que controle los flujos al interior del túnel, pero debido al impacto evidenciado en los manantiales M10R, AFLUEPAVAS2 y MQ, se realiza una simulación impermeabilizando los sectores que más presentan ingreso de agua al túnel, para evaluar la mitigación en el descenso de los caudales presentada.

La simulación consiste en simular la impermeabilización del tramo entre 1030 y 1236 m, disminuyendo la conductancia de la propiedad Dren a 20 1/d.

6.5.2.1 Caudales de Ingreso al Túnel 5 con Impermeabilización

La simulación realizada aplicando las medidas para la impermeabilización del túnel, presenta un ingreso total de agua de 23.7 l/s para la etapa de construcción, mostrando una disminución en los flujos del 8.1% correspondiente a una disminución de 2.1 l/s, lo cual muestra que un proceso de impermeabilización en la zona con mayor ingreso de agua no brinda una eficiencia en la disminución de los caudales de ingreso. En la Tabla 6.12, se presentan los caudales de ingreso al túnel 5 con proceso de impermeabilización.

Tabla 6.12. Caudales de ingreso al túnel 5, con tratamiento de impermeabilización.

Tiempo del Modelo (días)	Longitud Excavada (m)	Caudales de Ingreso al Túnel		
		m^3/d	l/s	l/m/10m
182	110	114.75	1.33	7.24
365	278	101.70	1.18	2.54
547	425	99.30	1.15	1.62
730	570	144.15	1.67	1.76
914	715	465.40	5.39	4.52
1095	875	245.70	2.84	1.95
1280	1030	367.86	4.26	2.48
1463	1190	223.89	2.59	1.31
1643	1236	287.89	3.33	1.62
2312	1236	132.90	1.54	0.75
2981	1236	52.05	0.60	0.29
3650	1236	51.75	0.60	0.29

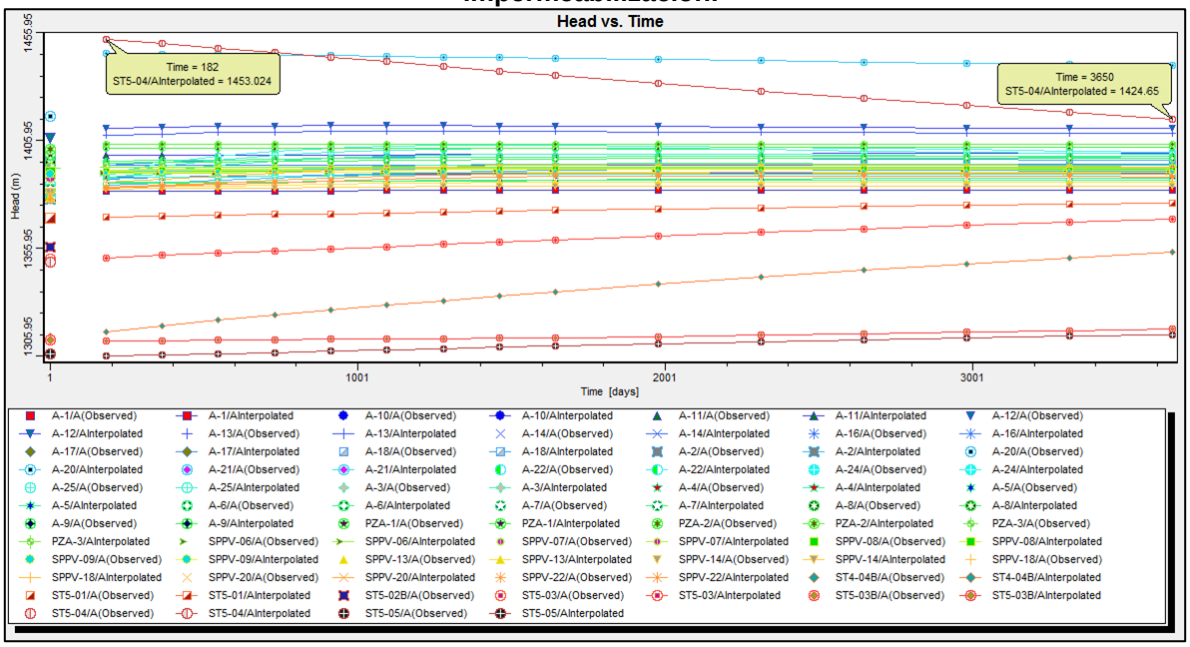
Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.5.2.2 Variación de los Niveles Piezométricos

Después del proceso de impermeabilización se observa que el descenso de los niveles del agua subterránea en el piezómetro ST5-04, continua, pero en menor proporción, presentando unos abatimientos de hasta 29 m, lo cual representa una recuperación de los niveles por efecto de la impermeabilización de 8 m.

El proceso de impermeabilización controla los descensos piezométricos que se reportan en el escenario sin impermeabilizar, sin que esta medida de mitigación sea significativa. En la Figura 6.14, se presenta la gráfica del comportamiento de los piezómetros para la construcción del túnel con impermeabilización.

Figura 6.14. Comportamiento de los niveles piezométricos para el túnel 5, con proceso de impermeabilización.



Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

6.5.2.3 Posibles impactos sobre las corrientes superficiales

Las corrientes superficiales no presentan impactos en el caudal de interacción agua superficial – agua subterránea. En la Tabla 6.13, se presenta el balance para los caudales de interacción de las corrientes superficiales.

Tabla 6.13. Balance de las corrientes superficiales

ID	ENTRADA		SALIDA		BALANCE	DISMINUCIÓN DE CAUDAL
	m^3/d	l/s	m^3/d	l/s	l/s	l/s
Río Bitaco	735.96	8.52	735.61	8.51	0.00	0.00
Río Pavas	2787.10	32.26	2787.50	32.26	0.00	0.00
Quebrada Cordobitas	226.96	2.63	226.94	2.63	0.00	0.00
Quebrada Timbio	296.37	3.43	296.35	3.43	0.00	0.00

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

La simulación con el proceso de impermeabilización disminuye el impacto sobre los manantiales M10R en un 23%, esto representa un descenso en el caudal del 50.2% pasando de 0.43 l/s a 0.22 l/s, igualmente el impacto sobre el caudal del manantial AFLUEPAVAS2 disminuye en 2.8%, pasando de 0.31 l/s a 0.29 l/s.

Lo anterior muestra que la impermeabilización no es una medida efectiva para la mitigación de los impactos que se presenta por la construcción del Túnel 5, es necesario hacer el seguimiento a la red de monitoreo y establecer otras medidas de mitigación.

7. MONITOREO Y CONTROL

Para evaluar aspectos importantes del agua subterránea y poder implementar programas de gestión al recurso hídrico subterráneo se requieren datos hidrogeológicos representativos, partiendo de una línea base que represente de buena manera las condiciones básicas iniciales, para poder hacer comparaciones y evaluar los cambios del recurso en el tiempo.

7.1.1 RED DE MONITOREO

El primer paso para una adecuada gestión del recurso hídrico subterráneo, es el diseño e instalación de una red de monitoreo, la cual permitirá registrar las variaciones temporales y espaciales de niveles, caudales y calidad del agua subterránea principalmente. Dicho monitoreo comprende la recolección, análisis y almacenamiento de un número determinado de datos en forma regular, conforme a circunstancias y objetivos específicos. En la Figura 7.1, se presenta un flujo que representa un correcto funcionamiento de una Red de Monitoreo.

Figura 7.1. Flujo para el seguimiento de una Red de Monitoreo.

Fuente: Ingenieria Correa Correa S.A.S., 2017

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas y los resultados arrojados por el modelo hidrogeológico numérico INGENIERÍA CORREA CORREA SAS, establece una Red de Monitoreo que incluye fuentes de agua subterránea y superficial localizadas en el área de del Valle de Pavas.

La Red de Monitoreo se conforma con el fin de establecer la línea base, la cual permite tener conocimiento sobre las condiciones actuales y futuras del agua subterránea en el área del Valle de Pavas ante la construcción del proyecto vial a cielo abierto y el túnel 5. Estas

condiciones relacionan la variación de los niveles, el caudal y la calidad físico-química del agua subterránea.

La Red de Monitoreo queda conformada por seis (6) manantiales, cinco (5) corrientes superficiales, dos (2) aljibes y se propone la construcción de cuatro (4) piezómetros. En la Tabla 7.1, se presenta la Red de Monitoreo propuesta para el área de influencia del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero en el paso por el Valle de Pavas, incluyendo la construcción del túnel 5. En el ANEXO E, se presenta el mapa de la red de monitoreo.

Tabla 7.1. Red de monitoreo propuesta para el Valle del Río de Pavas.

TIPO DE FUENTE	ID	COORDENADAS	
		Este	Norte
Subterránea	PZA-1	1056344.268	897375.492
Subterránea	PZA-3	1055906.139	897218.585
Subterránea	A-6	1055918.27	897593.35
Subterránea	A-13	1057063.27	897452.70
Subterránea	A-15	1057797.88	897222.74
Subterránea	PO-1	1054532.69	897512.71
Manantial	M10R	1052485.130	898840.149
Manantial	AFLUEPAVAS2	1052324.723	899114.789
Manantial	MQ	1052673.846	898277.826
Manantial	Acueducto Pavas	1056453.19	897330.9
Superficial	Río Pavas 1	1052134.762	899133.762
Superficial	Río Pavas 2	1056127.591	897185.4765
Superficial	Río Pavas 3	1057675.698	896344.5073
Superficial	Quebrada Cordobitas	1055267.643	896833.073
Superficial	Quebrada Timbio	1058165.823	897114.9775
Subterránea	Piezómetro (PZ-4)	1058224.485	897351.9196
Subterránea	Piezómetro (PZ-5)	1056320.898	897577.5607
Subterránea	Piezómetro (PZ-6)	1056246.602	897866.1602
Subterránea	Piezómetro (PZ-7)	1054157.884	898029.6747
** Propuestos*			

Fuente: Ingeniería Correa Correa S.A.S., 2017.

7.1.2 SEGUIMIENTO Y MONITOREO

Con el fin de tener un control sobre el sistema hidrogeológico del Valle de Pavas se establece un seguimiento periódico a la red de monitoreo, que permitirá prever posibles alteraciones en los niveles y calidad del agua subterránea asociadas al paso del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero incluyendo la construcción del túnel 5.

Antes del inicio del proyecto se propone hacer un monitoreo a los manantiales y corrientes superficiales como mínimo una vez al mes. Después del inicio de la construcción de los túneles la periodicidad debe ser quincenal y siempre se debe registrar caudales y parámetros fisicoquímicos in-situ (pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto).

Las captaciones subterráneas (aljibes y piezómetros) deben tener un monitoreo bimensual antes del inicio del proyecto, en el cual se registren los niveles estáticos y parámetros fisicoquímicos in-situ. Después del inicio de la construcción de los túneles se recomienda la instalación de transductores de presión en los cuatro (4) piezómetros para tener un monitoreo de los niveles estáticos de forma automática con mínimo una lectura diaria.

Finalmente, para tener un control sobre la calidad del agua se propone realizar un muestreo hidrogeoquímico y de calidad del agua según lo establecido en la Resolución No. 0751, con una frecuencia como mínimo anual.

8. CONCLUSIONES

- La construcción del túnel 5 del proyecto vial Mulaló – Loboguerrero, pasa por el Valle del Río Pavas desde el portal de salida de túnel 4 hasta el portal de salida de túnel 5, el área de estudio está representada geológicamente por la Formación Volcánica (Kv), los Depósitos Fluviolacustres (Qfl), los Suelos Residuales (Qsr), los Depósitos Aluviales Recientes (Qal) y los Depósitos Coluviales (Qc).

- La tectónica del área de estudio se encuentra caracterizada las fallas Bitaco, falla de tipo normal, la cual controla la dirección del río Bitaco. La falla Pavas – Quebrada Seca falla de tipo normal y activa, localizada al occidente del casco urbano de Pavas. La falla La Cumbre – Aguas Claras cuyo trazado va desde el municipio de la Cumbre hasta el municipio de Restrepo y la presencia de una falla de tipo transversal que se puede relacionar con el trazado de la falla Mulaló, con dirección NWW.

- La caracterización de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas presentes en el Valle del Río Pavas se realizó mediante la ejecución de tres pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación y cinco pruebas slug de llenado y vaciado, así como de la recopilación de diez pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación y cinco pruebas slug.

- A partir de las pruebas hidráulicas ejecutadas y recopiladas se caracterizó hidráulicamente la Formación Volcánica definiendo valores de Conductividad Hidráulica entre 6.36E-2 m/d y 3.05E-4, con un Coeficiente de Almacenamiento de 1.6E-6. El Suelo Residual (saprolito) se caracterizó con un valor de Conductividad Hidráulica entre 5.0E-1 y 3.7E-4 y Coeficiente de Almacenamiento de 1.25E-3. Los Depósitos Fluviolacustres presentaron valores de Conductividad Hidráulica entre 6.5E-4 y 9.0E-1 y Coeficiente de Almacenamiento entre 6.3E-5 y 1.38E-2.

- Teniendo en cuenta los lineamientos planteados por la IAH (1995), los Depósitos Aluviales Recientes se clasifican como un acuífero local de tipo libre, los Depósitos Fluviolacustres se clasifican como un acuífero de tipo confinado a libre en la parte occidental, la Formación Volcánica y los Suelos Residuales son clasificados como acuitardos de extensión regional y los Depósitos Coluviales se clasifican como acuicludos.

- El modelo numérico se configura usando el software Visual ModFlow Pro 2011.1 y se discretiza en siete capas, 380 columnas y 205 filas que representan las principales unidades hidrogeológicas, las fallas Bitaco, La Cumbre-Aguas Claras, Pavas-Quebrada Seca y una falla transversal, así como las principales corrientes superficiales, el modelo presenta un detalle de 25 x 20 metros.

- Se realizan dos simulaciones, una en estado estacionario que representa las condiciones naturales y una en estado transitorio con dos escenarios; el primero representa la construcción del terraplén para la vía a cielo abierto y la construcción del túnel 5 sin ningún proceso de impermeabilización y el segundo con la impermeabilización de algunas secciones del túnel 5.

- Para la calibración se utilizaron los niveles estáticos medidos en 38 puntos de agua subterránea en el Valle del Río Pavas, obteniendo un error medio cuadrático de 2.74 m y un error estándar de 0.36 m. La diferencia máxima residual fue de 4.99 m y un mínimo residual de 0.02 m con un coeficiente de correlación de 0.996 entre los niveles piezométricos observados y calculados lo que permite la validación del modelo numérico.

- El comportamiento de dirección de flujo del agua subterránea presenta una dirección desde el suroriente al noroccidente, siguiendo la dirección del Río Pavas, localmente se presentan flujos desde las partes más altas que confluyen en la parte plana, indicando que la zona de recarga del acuífero Fluviolacustre es el sector Cresta de Gallo y el sector de la Cumbre.

- La dirección de flujo en la Formación Volcánica se encuentra influenciado por las fallas de la zona de estudio con una dirección del suroriente al noroccidente y a la altura del valle del Río Bitaco una dirección al norte. La influencia de las fallas, principalmente la falla transversal genera flujos ascendentes que al parecer puede estar alimentando los manantiales que abastecen el Acueducto de Pavas.

- La simulación en estado transitorio representa la construcción del terraplén (en la zona plana) con una altura promedio de 5 m y la construcción del túnel 5 con una longitud de 1236.5 m.

- El caudal total de ingreso al túnel 5 es de 25.8 l/s, presentando un pico de 5.4 l/s cuando se alcanzan los 715 de excavación. Durante el periodo de operación los caudales de ingreso al túnel descienden y a partir del día 2981 tienden a estabilizaren en 0.6 l/s.

- Según los resultados de la simulación, la construcción del terraplén no afectará los acuíferos presentes en el Valle del Río Pavas, ni presentara influencia en los flujos que alimentan los matinales del acueducto de Pavas.

- La simulación muestra que la construcción del Túnel 5, afectará los niveles piezométricos en el sector de portal salida de hasta 37 metros, lo cual se evidencia en el piezómetro ST5-04, los niveles piezométricos en el resto del área de estudio no presentaran descensos.

- El paso del proyecto vial Mulalo-Loboguerrero por el Valle de Pavas y la construcción del Túnel 5, no generará ningún impacto en la interacción de las corrientes superficiales con los acuíferos de la zona.

- La construcción de los túnele 5, ocasionará la disminución en el caudal de los manantiales M10R, AFLUEPAVAS2 y MQ hasta de un 73% para el último año simulado. El comportamiento de los descensos permite estimar que estos se estabilizaran con el caudal reportado en el último periodo simulado.

- Teniendo en cuenta la clasificación de Bieniawski para macizos rocosos teniendo en cuenta las condiciones del agua subterránea se tiene que el túnel 5 se clasifica como húmedo y no necesitaría ningún tratamiento para el control de flujos.

- Ante el impacto sobre los manantiales M10R, AFLUEPAVAS2 y MQ, se simula la impermeabilización de las secciones de túnel que más flujo presentaron, disminuyendo la conductancia de la propiedad Drain.

- Los resultados de la simulación para las secciones impermeabilizadas muestran que el ingreso de agua al túnel 5 se reduce únicamente en un 8.1%, mostrando poca eficiencia en la disminución de caudales al interior del túnel.

- La impermeabilización de las secciones del túnel 5 disminuye los abatimientos en el sector del portal de salida, presentando una recuperación de los niveles piezométricos de hasta 8 m, sin que esta impermeabilización sea eficiente.

- La simulación con el proceso de impermeabilización disminuye el impacto sobre los manantiales M10R en un 23%, esto representa un descenso en el caudal del 50.2% pasando de 0.43 l/s a 0.22 l/s, igualmente el impacto sobre el caudal del manantial AFLUEPAVAS2 disminuye en 2.8%, pasando de 0.31 l/s a 0.29 l/s.

- La impermeabilización del sectorizada del túnel 5, no es una medida efectiva para la mitigación de los impactos que se presenta por la construcción del túnel 5, es necesario hacer el seguimiento a la red de monitoreo y establecer otras medidas de mitigación.

- Para ninguno de los escenarios simulados se causa impacto en las corrientes superficiales del área de estudio.

- Teniendo en cuenta los diferentes estudios realizados para el EIA, el comportamiento hidrogeológico en el Valle de Pavas y los resultados del modelo numérico ante la construcción del proyecto vial Mulaló-Loboguerrero se plantea una red de monitoreo con cuatro (4) manantiales, cinco (5) puntos de agua superficial, tres (3) aljibes, dos (2) piezómetros, un pozo profundo y la construcción de cuatro (4) piezómetros.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda un seguimiento periódico a la red de monitoreo antes, durante y después de la construcción del proyecto vial.

- Evaluar medidas de mitigación para los impactos identificados en los manantiales cerca a portal salida del túnel 5 diferentes a la impermeabilización, ya que el modelo muestra que esta medida no es eficiente.

- En caso de presentaren caudales instantáneos al interior del túnel superiores a 25 l/s, se deben controlar con el fin de no generar impactos mayores a los identificados mediante la modelación numérica.

- Se recomienda hacer la caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del área de estudio y en colaboración con la autoridad ambiental hacer una caracterización isotópica de los manantiales del acueducto con el fin de tener pleno conocimiento del origen de esta agua y de esta forma poder establecer planes acertados del manejo y protección de estos manantiales.

- Con el fin de mejorar la toma de datos del comportamiento periódico y estacional de los niveles del agua subterránea se recomienda instrumentar los piezómetros que se construyan con transductores de presión con el fin de tener varias lecturas en un día y en tiempo real.

- Con la información obtenida del seguimiento y monitoreo a la red de monitoreo establecida se recomienda hacer mínimo dos actualizaciones del modelo numérico, logrando obtener un mayor conocimiento del comportamiento hidrogeológico del área de estudio y de esta manera poder hacer mejores predicciones de los impactos para los periodos de operación del proyecto vial.

ANEXO A.

MAPA DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DEL VALLE DEL RÍO PAVAS

ANEXO B.

MAPA DE RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DEL VALLE DEL RIO PAVAS

ANEXO C.

CURVAS DE INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS HIDRÁULICAS Y DATOS CRUDOS DE LOS TRANSDUCTORES DE PRESIÓN

ANEXO D.

CURVAS DE INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS HIDRÁULICAS RECOPILADAS

ANEXO E.

MAPA DE LA RED DE MONITOREO PROPUESTA PARA EL VALLE DEL RÍO PAVAS