
ESTUDIOS Y DISEÑOS DEFINITIVOS, FINANCIACIÓN, GESTIÓN AMBIENTAL, PREDIAL Y SOCIAL, CONSTRUCCIÓN, MEJORAMIENTO, REHABILITACIÓN, OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y REVERSIÓN DEL CORREDOR VIAL PAMPLONA-CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA

**CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA -
HIDROGEOLOGÍA**



sacyr
INGENIERÍA E
INFRAESTRUCTURAS

**Unión Vial
Río Pamplonita**
Una Compañía de Sacyr Concesiones

ANI
Agencia Nacional de
Infraestructura

CORREDOR VIAL DOBLE CALZADA PAMPLONA - CÚCUTA

CORREDOR 4G PAMPLONA – CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA

CAPITULO 5.1.8 Caracterización del Área de Influencia - Hidrogeología.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA	13
5.1 Medio Abiótico	13
5.1.8 Hidrogeología	13
5.1.8.1 Objetivos y Alcance.....	13
5.1.8.1.1 Objetivo General	13
5.1.8.1.2 Objetivo Específicos	13
5.1.8.1.3 Alcance.....	13
5.1.8.2 Metodología para la vía a cielo abierto y túnel Pamplona	14
5.1.8.2.1 Secuencia Metodológica.....	14
5.1.8.2.2 Área de influencia preliminar	19
5.1.8.2.3 Marco Teórico	21
5.1.8.3 Geología de referencia.....	32
5.1.8.4 Inventario y clasificación de puntos hidrogeológicos	32
5.1.8.4.1 Resultados de campo	33
5.1.8.4.2 Análisis de los datos de interés hidrogeológico provenientes del inventario 50	
5.1.8.5 Caracterización Hidrogeoquímica del agua muestreada	59
5.1.8.5.1 Criterios para la selección de los puntos de agua	59
5.1.8.5.2 Puntos de agua seleccionados.....	60
5.1.8.5.3 Parámetros analizados	60
5.1.8.5.4 Clasificación Hidrogeoquímica	70
5.1.8.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual UF1 (Túnel y Vía a Cielo Abierto). 77	
5.1.8.6.1 Principales unidades geológicas y su comportamiento hidrogeológico 77	
5.1.8.6.2 Principales zonas de recarga y descarga	81
5.1.8.6.3 Dirección preferencial del flujo subsuperficial y subterráneo.....	81
5.1.8.6.4 Dinámica del flujo de agua subsuperficial y subterránea.....	82
	2

5.1.8.7	Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la contaminación.....	83
5.1.8.7.1	Metodología GOD	84
5.1.8.7.1	Grado Confinamiento Hidráulico (G)	85
5.1.8.7.2	Ocurrencia del Sustrato Suprayacente (O)	87
5.1.8.7.3	Distancia al Nivel de Agua Subsuperficial y Subterránea (D)	88
5.1.8.7.4	Clasificación de la Vulnerabilidad.....	92
5.1.8.8	Valoración del riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas	93
5.1.8.8.1	Metodología aplicada.....	94
5.1.8.8.2	Análisis de la vulnerabilidad	95
5.1.8.8.3	Factores de peligrosidad de las fuentes de amenaza	96
5.1.8.8.4	Evaluación del riesgo.....	97
5.1.8.8.5	Resultados	97
5.1.8.9	Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua censado en la vía a cielo abierto y ZODMEs.....	99
5.1.8.9.1	Criterios utilizados.....	99
5.1.8.9.2	Resumen evaluación de impactos puntos vía a cielo abierto y ZODMEs 101	
5.1.8.9.3	Medidas de manejo de impactos.....	104
5.1.8.10	Caracterización hidrogeológica específica Túnel Pamplona	115
5.1.8.10.1	Datos generales del túnel.....	115
5.1.8.10.2	Análisis hidrogeológico de los puntos de agua inventariados	117
5.1.8.10.3	Valoración de la recarga túnel Pamplona	130
5.1.8.10.4	Caracterización hidrodinámica de los terrenos y rocas interceptados por la excavación del túnel Pamplona.....	157
5.1.8.11	Probabilidad de afectación de los puntos de agua censados mediante método DHI (Drowdown Hazard Index).....	176
5.1.8.11.1	Método del cálculo	177
5.1.8.11.2	Descripción de las variables del sistema	178
5.1.8.11.3	Resultados	184
5.1.8.11.4	Medidas de prevención, mitigación y compensación sugeridas.....	186
5.1.8.12	Modelo numérico del flujo subsuperficial y subterráneo del Túnel de Pamplona 201	
5.1.8.12.1	Introducción.....	201

5.1.8.12.2	Principales elementos considerados en la simulación numérica. ..	203
5.1.8.12.3	Método de modelación	204
5.1.8.12.4	Calibración del modelo	207
5.1.8.12.5	Resultados del modelo numérico	216
5.1.8.12.6	Caudal crítico	228
5.1.8.12.7	Consideraciones finales.....	229
5.1.8.13	Red de Monitoreo.....	232
5.1.8.13.1	Criterios de Selección de Puntos para la Red de Monitoreo	232
5.1.8.13.2	Puntos de agua seleccionados para integrar la red de monitoreo propuesta	233
5.1.8.13.3	Frecuencia de las mediciones	239
5.1.8.14	Conclusiones.....	243
5.1.8.14.1	Resultado del inventario de puntos de agua.....	243
5.1.8.14.2	Resultado de los análisis hidrogeoquímicos	243
5.1.8.14.3	Modelo hidrogeológico conceptual (Túnel y vía a cielo abierto).....	243
5.1.8.14.4	Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos presentes en la UF1	244
5.1.8.14.5	Riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas.	245
5.1.8.14.6	Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua relacionados con la vía a cielo abierto y ZODMEs.	245
5.1.8.14.7	Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua relacionados con el túnel Pamplona aplicando la metodología DHI.	245
5.1.8.14.8	Medidas de mitigación y compensación.....	245
5.1.8.14.9	Cálculo del caudal esperado en el túnel Pamplona.....	246
5.1.8.14.10	Zonas potencialmente críticas hidrogeológicamente en el túnel Pamplona	246
5.1.8.14.11	Modelo numérico del flujo subsuperficial y subterráneo presente en el túnel Pamplona	247
5.1.8.14.12	Red de monitoreo	247
5.1.8.15	Recomendaciones	248
5.1.8.16	Referencias bibliográficas	248

CORREDOR 4G PAMPLONA – CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA

CAPITULO 5.1.8 Caracterización del Área de Influencia - Hidrogeología.

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 5-2.1. Puntos de agua naturales censados en la UF1	43
Tabla 5-2.2. Clasificación de puntos de agua de acuerdo con su caudal.....	50
Tabla 5-2.3. Caudales característicos de los puntos de agua inventariados.....	50
Tabla 5-2.4. Caudales característicos medios de 20 puntos de agua aforados en dos periodos climáticos (Nov_2017 y Abr_2018).	53
Tabla 5-2.5. Valores de conductividad y STD de los puntos censados.....	56
Tabla 5-2.6. Puntos de agua seleccionados para muestreo y análisis hidrogeoquímico en la UF1.	61
Tabla 5-2.7. Equivalencias de nomenclaturas de puntos en análisis de laboratorio	62
Tabla 5-2.8. Parámetros hidrogeoquímicos medidos en los puntos de agua seleccionados en el área de influencia de la UF1, de acuerdo con la resolución 751 de marzo del 2015.	63
Tabla 5-2.9. Facies hidrogeoquímicas de los puntos de agua analizados.	74
Tabla 5-2.10. Complejos hidrogeológicos UF1.....	79
Tabla 5-2.11 Definición de clases de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos.....	83
Tabla 5-2.12 Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas según grado de confinamiento.....	85
Tabla 5-2.13 Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas según sustrato suprayacente.	87
Tabla 5-2.14. Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas por distancia al nivel del agua subsuperficial y subterránea.....	89
Tabla 5-2.15. Rangos de vulnerabilidad.	92
Tabla 5-2.16. Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de peligrosidad (Fp).....	96
Tabla 5-2.17. Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de contacto (Fc).....	96
Tabla 5-2.18. Cálculo del riesgo (R) mínimo y máximos posibles y del riesgo normalizado (Rn), entre 0 y 1	97
Tabla 5-2.19. Potencial de afectación de los puntos de agua encontrados en la UF1 en vía a cielo abierto y ZODMEs.....	102
Tabla 5-2.20. Medidas de manejo discriminadas por punto.....	113
Tabla 5-2.21. Datos generales del Túnel Pamplona	115
Tabla 5-2.22. Datos de información de base relacionada con los puntos de agua inventariados y monitoreados en el sector del túnel Pamplona.	118

Tabla 5-2.23 Clasificación de parámetros en función de variación del Índice de Aridez	133
Tabla 5-2.24 Estaciones meteorológicas utilizadas	137
Tabla 5-2.25 Índice de Aridez de Marttne ajustado para las áreas de estudio según método Kenesey	147
Tabla 5-2.26 Clasificación de Permeabilidad en la Zona de Estudio según método Kenesey	149
Tabla 5-2.27 Clasificación cobertura vegetal y uso del suelo en las zonas de estudio para método Kenesey	149
Tabla 5-2.28 Escorrentía Superficial – Régimen Anual.....	153
Tabla 5-2.29 Régimen de Infiltración Anual.....	153
Tabla 5-2.30 Recarga Máxima Anual	154
Tabla 5-2.31 Recarga Media Anual	155
Tabla 5-2.32 Recarga Mínima Anual	156
Tabla 5-2.33. Descripción de la permeabilidad de acuerdo con la norma AFTES.....	157
Tabla 5-2.34. Formaciones geológicas definidas como complejos hidrogeológicos interceptadas por el Túnel Pamplona (dirección W-E).....	159
Tabla 5-2.35. Datos de caracterización hidráulica de las unidades geológicas interceptadas por el túnel (información primaria).....	161
Tabla 5-2.36 Campo de variación de la permeabilidad asociada a las clases de roca de acuerdo con el índice RMR.	163
Tabla 5-2.37. – Campo de variación de la permeabilidad asociada al grado de fracturación del macizo rocoso.....	163
Tabla 5-2.38. – Permeabilidad atribuida a los tramos de túnel para condiciones geológico-geomecánicas homogéneas. Grado de fracturación H=Alto; M=Medio y L=Bajo.....	164
Tabla 5-2.39 – Valoración de la carga hidráulica en correspondencia con el eje del túnel Pamplona.	165
Tabla 5-2.40. Datos piezométricos disponibles. Se muestran los valores de profundidad del nivel freático y de carga hidráulica sobre la clave del túnel (m).....	166
Tabla 5-2.41. Cálculo analítico del caudal esperado en el túnel Pamplona a corto plazo.....	170
Tabla 5-2.42 Valores de caudales específicos a corto plazo a lo largo del túnel Pamplona (valores mínimos y máximos).	171
Tabla 5-2.43 – Valores de caudales estabilizados a largo plazo a lo largo del túnel Pamplona sin considerar limitación de la recarga (valores mínimos y máximos).....	172
Tabla 5-2.44. Cálculo del caudal esperado en el túnel (valoración analítica) a largo plazo con aplicación de la valoración numérica.	175
Tabla 5-2.45. Descripción de las ocho (8) variables del sistema acuífero-túnel y definición de los índices correspondientes para los puntos de agua.	183
Tabla 5-2.46. Grado de probabilidad de afectación de los puntos de agua.	184
Tabla 5-2.47. Potencial impacto sobre los puntos hidrogeológicos localizados en la zona de influencia del túnel Pamplona.....	184

Tabla 5-2.48. Cálculo valor DHI para los puntos de agua ubicados en la zona de influencia del túnel Pamplona.	185
Tabla 5-2.49. Puntos de agua subsuperficial y subterránea con probabilidad de impacto bajo localizados en la zona de influencia del túnel pamplona.	186
Tabla 5-2.50. Tramos del túnel Pamplona donde de acuerdo con el perfil geológico y geotécnico se prevé encontrar zonas de fallas y/o zonas de mayor fracturación y/o zonas de mayor permeabilidad.	191
Tabla 5-2.51. Caudales críticos para el túnel de Pamplona.....	192
Tabla 5-2.52. Descripción del tipo de intervención en relación con la probabilidad de impacto atribuida a los puntos de agua analizados.	195
Tabla 5-2.53. Resultados de las calibraciones de los modelos considerando los valores de la cota piezométrica medida en el eje del túnel.	207
Tabla 5-2.54. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S1.	212
Tabla 5-2.55. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S2.	213
Tabla 5-2.56. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S3.	214
Tabla 5-2.57. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S1.....	218
Tabla 5-2.58. Curva de alimentación del punto de agua UF1-PA09 sección S1.....	220
Tabla 5-2.59. Curva de alimentación del punto de agua UF1-PA20 sección S1.....	221
Tabla 5-2.60. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S2.....	222
Tabla 5-2.61. Curva de alimentación del punto de agua UF1-PA07 sección S2.....	223
Tabla 5-2.62. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S3.....	225
Tabla 5-2.63. Curva de alimentación del punto de agua UF1-PA05 sección S3.....	226
Tabla 5-2.64. Caudal crítico establecido para el túnel Pamplona.	229
Tabla 5-2.65 Tipo de punto de control y mediciones relacionadas con el monitoreo tipo A de los puntos de agua seleccionados	234
Tabla 5-2.66 Puntos de agua subsuperficial y subterránea que integran la red de monitoreo.	235
Tabla 5-2.67 Piezómetros que integran la red de monitoreo del túnel Pamplona.....	236
Tabla 5-2.68 Puntos de agua representados por puntos en cursos de aguas superficiales que integran la red de monitoreo de UF1.	237
Tabla 5-2.69 Parámetros del monitoreo tipo B según las especificaciones de la Tabla 5 de la Resolución N. 0751 del 2015.	238
Tabla 5-2.70 Frecuencia de medición red de monitoreo UF1	240
Tabla 5-2.71 Tramos de túnel caracterizados por presentar zonas de fallas y/o zonas de mayor fracturación y/o zonas de mayor permeabilidad.”	246

CORREDOR 4G PAMPLONA – CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA

CAPITULO 5.1.8 Caracterización del Área de Influencia - Hidrogeología.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 5-2.1 Localización de las principales prospecciones realizadas en la UF1.....	16
Figura 5-2.2 Zona de influencia hidrogeológica preliminar.	20
Figura 5-2.3. Esquema de un acuífero colgado (Fetter, 1980).	22
Figura 5-2.4. Acuífero libre, inconfinado o de nivel freático (Fetter, 1980)	23
Figura 5-2.5. Estratigrafía en un sistema acuífero (Fetter 1980)	24
Figura 5-2.6. Esquema de colores para representación hidrogeológica – IAH (1995).....	25
Figura 5-2.7. Ejemplo colores para representación hidrogeológica – IAH (1995).....	25
Figura 5-2.8. Ocurrencia de manantiales a causa de variables geológicas	28
Figura 5-2.9. Tipos de manantiales.....	29
Figura 5-2.10. Esquema de Resurgencia	29
Figura 5-2.11. Interflujo (SEEP en la imagen)	30
Figura 5-2.12. Clasificación de puntos de agua subsuperficial y subterránea	31
Figura 5-2.13. Localización puntos de agua censados en la UF1	42
Figura 5-2.14. Valores de caudal de los puntos de agua encontrados durante el inventario.....	52
Figura 5-2.15. Valores de caudal para los 20 puntos de agua aforados en dos periodos climáticos – primer periodo.	54
Figura 5-2.16. Valores de caudal para los 20 puntos de agua aforados en dos periodos climáticos – segundo periodo.....	55
Figura 5-2.17. Distribución de la conductividad en todos los puntos censados.	57
Figura 5-2.18. Distribución de los STD en todos los puntos censados.	58
Figura 5-2.19. Ubicación del muestreo hidroquímico de la UF1	70
Figura 5-2.20. Clasificación química de los tipos de agua en el diagrama de Piper.	72
Figura 5-2.21. Diagrama de Piper para las ocho fuentes de agua analizadas	73
Figura 5-2.22. Diagrama de shoeller para las ocho fuentes de agua analizadas	73
Figura 5-2.23. Correlación entre los iones $ca^{2+}+mg$ versus $so_4^{2-}+hco_3$ en meq/l.	75
Figura 5-2.24. Diagramas de Stiff para las ocho fuentes analizadas.....	76
Figura 5-2.25. Esquema de análisis de la vulnerabilidad de acuíferos (método	

GOD).....	84
Figura 5-2.26. Distribución geográfica del parámetro G.....	86
Figura 5-2.27. Distribución geográfica del parámetro O.....	88
Figura 5-2.28. Valores de profundidad del nivel freático en la zona de estudio.	90
Figura 5-2.29. Valores asignados al parámetro D en la zona de influencia de la UF1.....	91
Figura 5-2.30. Distribución geográfica de la vulnerabilidad intrínseca en la UF1.....	93
Figura 5-2.31. Clasificación del riesgo para la zona de estudio.....	98
Figura 5-2.32. Clasificación del riesgo para la zona de estudio.....	98
Figura 5-2.33 Vista esquemática de medidas básicas de protección.....	107
Figura 5-2.34 Tanque para la protección de afloramientos de agua	108
Figura 5-2.35. Tanque de concreto para almacenamiento del punto hidrogeológico.....	108
Figura 5-2.36. Esquema de manejo de puntos de agua en áreas de ZODMEs.	110
Figura 5-2.37 Corte en un punto de agua asociado a flujo subsuperficial.....	111
Figura 5-2.38. Medida de manejo para punto de agua con cruce de vía en tubería.....	111
Figura 5-2.39. Sección geométrica túnel Pamplona con contra bóveda	115
Figura 5-2.40. Localización túnel Pamplona.....	116
Figura 5-2.41. Distribución de puntos de agua en zona de influencia túnel Pamplona.....	117
Figura 5-2.42 Investigación geoelectrica UF1-TE08. Se destacan con óvalos en color rojo los sectores en los cuales se desarrollan circuitos someros al interior de suelos residuales y depósitos coluviales.....	121
Figura 5-2.43 – Investigación geoelectrica UF1-T04, se destacan con óvalos en color rojo los sectores en los cuales se desarrollan circuitos en el substrato rocoso al parecer no conexos con flujos subsuperficiales.....	122
Figura 5-2.44 – Investigación geoelectrica UF1-TE03. Se destacan con un óvalo de color rojo los sectores en los cuales se desarrollan los circuitos hídricos en el sector del fondo del valle.....	124
Figura 5-2.45 – Hipótesis de esquema de flujo de circuitos subsuperficiales y en roca a lo largo de las fallas, en el sector del punto de agua MA07.....	125
Figura 5-2.46 – Investigaciones geoelectricas UF1-TE01. Se evidencia con un óvalo en color rojo los sectores en los que una disminución de la resistividad podría estar representando la presencia de circuitos subsuperficiales desarrollados al interior de los depósitos coluviales.....	126
Figura 5-2.47 – Sistemas de flujo principales identificados en el sector del Túnel Pamplona.....	128
Figura 5-2.48 Perspectiva tridimensional del Túnel Pamplona. Entorno geológico e hidrogeológico.....	129
Figura 5-2.49 Esquema Metodológico	130
Figura 5-2.50 Área de Estudio Hidrogeológica.....	136
Figura 5-2.51 Comportamiento de la Precipitación de enero a junio	138

Figura 5-2.52 Comportamiento de la Precipitación de julio a diciembre	139
Figura 5-2.53 Correlación inversa media mensual multianual	140
Figura 5-2.54 Correlación inversa anual.....	141
Figura 5-2.55 Comportamiento de la Temperatura de enero a junio	142
Figura 5-2.56 Comportamiento de la Temperatura de julio a diciembre.....	143
Figura 5-2.57 Régimen Humedad Relativa	144
Figura 5-2.58 Régimen Evapotranspiración Potencial	145
Figura 5-2.59 Comportamiento Balance Hidroclimático	146
Figura 5-2.60 Clasificación de Pendientes (CA) para método Kenesey – Túnel UF1	148
Figura 5-2.61 Clasificación de Permeabilidad (CP) para método Kenesey – Túnel UF1 Pamplona.....	150
Figura 5-2.62 Clasificación de Cobertura Vegetal (CV) para método Kenesey – Túnel UF1 Pamplona.....	151
Figura 5-2.63 Condición de Escorrentía Superficial (CK) según método Kenesey – Túnel UF1 Pamplona	152
Figura 5-2.64 Régimen de Recarga Máxima – Túnel UF1.....	154
Figura 5-2.65 Régimen de Recarga Media – Túnel UF1	155
Figura 5-2.66 Régimen de Recarga Mínima – Túnel UF1.....	156
Figura 5-2.67 Ubicación de los sondeos realizados sobre la traza del túnel de Pamplona.....	158
Figura 5-2.68. Sección longitudinal del túnel Pamplona con indicación de los sondeos realizados, la profundidad alcanzada, los valores de permeabilidad obtenidos en los tramos de prueba y los niveles piezométricos medidos.....	160
Figura 5-2.69. Análisis estadístico de los datos de permeabilidad disponibles, distinguiendo litotipo y profundidad	160
Figura 5-2.70 Ubicación de los sondeos realizados sobre la traza del túnel de	163
Figura 5-2.71. Esquema de la relación geométrica entre la posición del punto de agua considerado y el tramo de túnel de referencia.....	178
Figura 5-2.72. Ejemplo conceptual de la matriz del sistema Acuífero-túnel.....	178
Figura 5-2.73. Esquema de la influencia que la cobertura tiene sobre la amplitud de la zona plástica que se forma entorno de una excavación subterránea (A) y, a la escala del macizo, sobre la abertura media de las fracturas (B).	179
Figura 5-2.74. Relación entre el radio del túnel y el caudal drenado (aplicando la fórmula de GOODMAN et al., 1965).....	180
Figura 5-2.75. Esquema conceptual del efecto topográfico (ET). En la tabla de la izquierda se muestran los valores que asume ET para puntos de agua.	182
Figura 5-2.76. Corrimiento del túnel para alejarlo de Zona de Falla.....	186
Figura 5-2.77. (a y b) Secuencia de excavación por etapas en terrenos de muy mala calidad geotécnica. NATM.....	188
Figura 5-2.78. Túnel de Pamplona, sección tipo SC-VIa, secuencia de excavación por etapas en terrenos de muy pobre calidad geotécnica (arcillolitas). NATM.	189

Figura 5-2.79. Fracturamiento del macizo rocoso por la voladura.....	190
Figura 5-2.80. Post-inyecciones de impermeabilización contingentes.	191
Figura 5-2.81. Medidas de compensación transitorias y/o permanentes	198
Figura 5-2.82. Medidas de compensación estándar transitorias y/o permanentes.....	199
Figura 5-2.83. Ubicación laguna el borrero respecto al área de influencia de la UF1.....	200
Figura 5-2.84. Esquema hipotético de una posible utilización de aguas de la laguna de Borrero.	200
Figura 5-2.85 – Trazado de las secciones a lo largo de las cuales se realizaron los modelos numéricos verticales.	203
Figura 5-2.86 – Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S1.....	206
Figura 5-2.87 – Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S2.....	206
Figura 5-2.88 – Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S3.....	206
Figura 5-2.89. Diagramas de dispersión de las medidas piezométricas	208
Figura 5-2.90. Variación de la recarga al interior de las cuencas interceptadas por el túnel Pamplona.....	210
Figura 5-2.91. Valores de recarga a lo largo de la sección S1.	211
Figura 5-2.92. Valores de recarga a lo largo de la sección S2.	211
Figura 5-2.93. Valores de recarga a lo largo de la sección S3.	211
Figura 5-2.94. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección detallada S1.....	213
Figura 5-2.95. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección detallada S2.....	213
Figura 5-2.96. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección detallada S3.....	214
Figura 5-2.97. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S1.	214
Figura 5-2.98. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S2.	215
Figura 5-2.99. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S3.	216
Figura 5-2.100. Simulación a un año de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S1 con presencia del túnel y medidas de manejo aplicadas.....	219
Figura 5-2.101. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro PZ03-S15.....	220
Figura 5-2.102. Simulación a un año de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S2 con presencia del túnel y medidas de manejo aplicadas.....	224
Figura 5-2.103. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro PZ06_S17.....	225
Figura 5-2.104. Simulación de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S3 con presencia del túnel y medidas de manejo aplicadas	227
Figura 5-2.105. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro PZ06-S17.....	228

ANEXOS

ANEXO 5.1.3.1_FUNIAS

ANEXO 5.1.3.2_MODELOS CONCEPTUALES PUNTOS DE AGUA

ANEXO 5.1.3.3_MAPA HIDROGEOLÓGICO

ANEXO 5.1.3.4_HIDROQUIMICA_LABORATORIO

ANEXO 5.1.3.5_TOMOGRAFIA ELÉCTRICA

ANEXO 5.1.3.6_ FICHAS DE SONDEOS

ANEXO 5.1.3.7_ENSAYOS Y PRUEBAS HIDRÁULICAS

ANEXO 5.1.3.8_PERFIL HIDROGEOLÓGICO

ANEXO 5.1.3.9_ARCHIVOS MODELO NUMERICO

ANEXO 5.1.3.10_RESULTADOS GEOQUIMICA ADICIONAL

ANEXO 5.1.3.11_RESULTADOS PRUEBAS ISOTOPOS

5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 MEDIO ABIÓTICO

5.1.8 Hidrogeología

El estudio hidrogeológico del corredor vial Cúcuta - Pamplona, se enmarca en los términos de referencia con códigos M-M-INA-02, emitidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el 26 de marzo del 2015, la metodología general para la presentación de estudios ambientales (MAVDT 2010) en proyectos de construcción de carreteras, las especificaciones técnicas del proyecto vial Cúcuta – Pamplona. De forma adicional en el desarrollo del presente estudio se emplea literatura hidrogeológica especializada.

5.1.8.1 Objetivos y Alcance

5.1.8.1.1 Objetivo General

Realizar la caracterización del componente hidrogeológico de la unidad funcional 1 (UF1) de la vía Cúcuta-Pamplona.

5.1.8.1.2 Objetivo Específicos

- i. Recolectar información secundaria regional y local relacionada con el componente hidrogeológico (fuentes: SGC, IDEAM, IGAC, MINAMBIENTE, entre otros).
- ii. Analizar la información existente hidrogeológica, hidrológica, geofísica, geoquímica y de caracterización de las aguas subsuperficiales y subterráneas sobre el área de estudio.
- iii. Realizar inventario de puntos de agua consistente en pozos, aljibes, surgencias de flujos subsuperficiales (llamados también flujos hipodérmicos e interflujo), resurgencias (filtraciones difusas), afloramientos antrópicos y manantiales presentes en el área de estudio, determinando el nivel freático, unidad acuífera captada, caudales y tiempos de explotación, usos y números de usuarios.
- iv. Identificar regionalmente las unidades hidrogeológicas captadas a partir de las unidades geológicas presentes e identificar los tipos de acuíferos.
- v. Estimar el flujo de agua subsuperficial, subterránea, y posibles conexiones hidráulicas entre acuíferos y cuerpos de agua superficiales.
- vi. Identificar las zonas de recarga y descarga naturales de los acuíferos.
- vii. Evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación para proteger la calidad del mismo.
- viii. Evaluar el riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas

5.1.8.1.3 Alcance

El alcance del presente capítulo está enfocado en la identificación y caracterización del agua subsuperficial y subterránea y de los acuíferos y zonas saturadas o semisaturadas

presentes en la zona de influencia hidrogeológica de la unidad funcional 1 (UF1), de manera que se pueda establecer una línea base que servirá de referencia para el posterior monitoreo de este recurso en términos de calidad y cantidad.

Como producto final de los diferentes análisis se entrega una valoración de los potenciales impactos que por la construcción de la vía a cielo abierto pudieran sufrir los puntos de agua identificados en el inventario. Esta valoración será hecha mediante un análisis de sensibilidad que toma en cuenta condiciones hidrogeológicas de los afloramientos de agua y los tipos de estructuras a construir.

De manera análoga, pero para el túnel Pamplona, se entrega un análisis en términos probabilísticos que valora el potencial impacto que la excavación del túnel pudiera tener sobre los puntos de agua identificados en su zona de influencia. Esto se hace aplicando el método DHI (Drowdown Hazard Index).

5.1.8.2 Metodología para la vía a cielo abierto y túnel Pamplona

En los siguientes numerales se menciona el procedimiento seguido para obtener el resultado final, sin entrar en el detalle de la metodología técnica, la cual se trata de forma detallada en cada capítulo que trata dicho alcance.

5.1.8.2.1 Secuencia Metodológica

- **Recopilación y análisis de información secundaria**

En la fase inicial se recopila y analiza la información técnica secundaria existente, relacionada con aspectos geológicos, geotécnicos estructurales, geomorfológicos, hidrogeológicos y en general, toda la información suministrada por UVRP relacionada con estructuración y diseños de las obras de la UF1 incluyendo perforaciones, planos, entre otra información de importancia. Adicionalmente se obtiene información de fuentes oficiales como planchas geológicas y memorias explicativas del Servicio Geológico Colombiano (en adelante SGC) (Plancha 110 escala 1:100.000); del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (en adelante IDEAM, con los datos de estaciones en el área de estudio, Estudio Nacional del Agua 2014); del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Metodologías, Resoluciones, etc.) entre otras entidades ambientales para el interés del presente estudio. También se utilizaron: Cobertura Vegetal Corine Land Cover (imagen rapideye año 2017), Modelo de Elevación Digital del Terreno (imagen Alos-palsar del 2011) y ortofotos del proyecto (año 2018).

- **Marco conceptual**

Corresponde al marco que rige en gran parte el presente estudio. Se toma en cuenta el estado del arte para cada temática desarrollada. En particular, para la clasificación de los puntos de agua se ha tomado como referencia el desarrollo conceptual entregado por la UVRP e Hidrogeocol.

- **Recopilación y análisis de información primaria**

- **Prospecciones Realizadas**

Dentro de la información primaria recopilada durante las diferentes campañas de investigación realizadas por Sacyr construcción para el túnel y vía a cielo abierto se obtuvo y analizó la siguiente información:

- 13 perforaciones mecánicas con recuperación de núcleos ejecutadas a lo largo de la traza del túnel Pamplona, con alcance hasta la cota del túnel.
- 21 perforaciones mecánicas con recuperación de núcleos ejecutadas a lo largo de la vía a cielo abierto.
- 8 piezómetros instalados en correspondencia con el eje del túnel Pamplona
- 9 líneas de prospección geoeléctrica con alcance hasta la cota del túnel Pamplona. Se ejecutaron secciones a lo largo de la traza del túnel y secciones paralelas al eje.
- 7 líneas de prospección sísmica de refracción,
- Datos geomecánicos obtenidos de los núcleos de las perforaciones (RQD, Co, modulo, entre otros).
- 12 ensayos de permeabilidad tipo slug ejecutados en perforaciones mecánicas,
- 2 pruebas de bombeo
- 20 ensayos de permeabilidad tipo Lugeon y 9 tipo Lefranc ejecutados en las perforaciones mecánicas.

En la Figura 5-2.1 se muestra la localización de las prospecciones más representativas llevadas a cabo en el área de estudio. Los resultados de estas investigaciones se incluyen en los siguientes anexos:

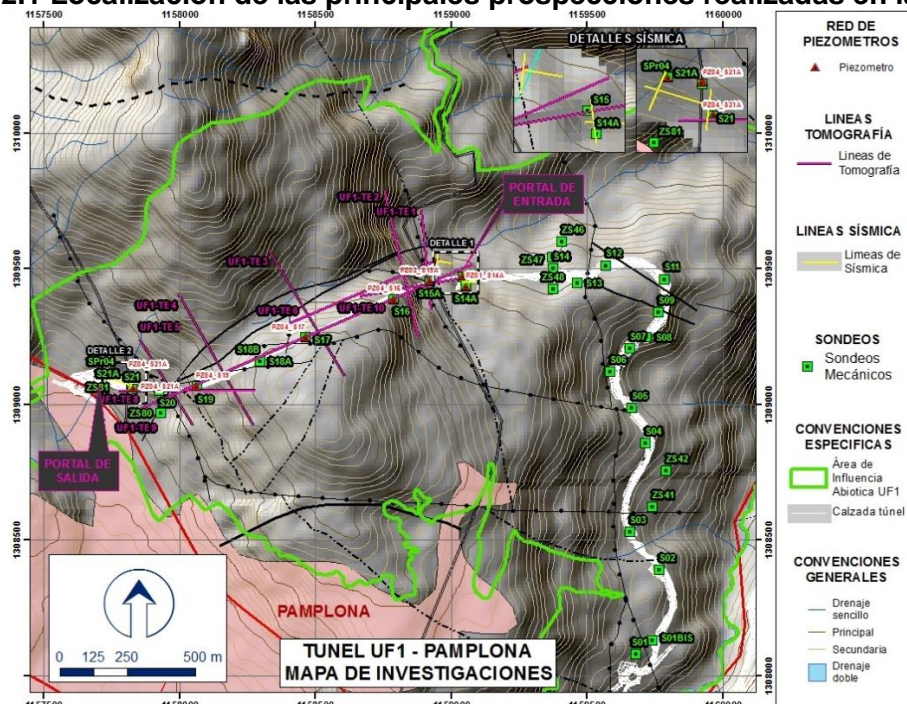
- Anexo 5.1.3.5_Tomografía eléctrica
- Anexo 5.1.3.6_Fichas de los sondeos
- Anexo 5.1.3.7_Ensayos y pruebas hidráulicas
- Toma de información de campo

Se realizaron varias campañas de reconocimiento de puntos de agua, la primera realizada el mes de noviembre de 2017, la segunda el mes de abril de 2018, la tercera en los meses de mayo y junio del 2018 y la cuarta para obtención de información adicional en el mes de diciembre del 2018.

Esta fase del estudio se dividió en dos comisiones de campo integradas por profesionales y personal capacitado con el fin de recolectar información de carácter hidrogeológico representada especialmente en el inventario de puntos de agua que incluyó la medición del nivel del agua subterránea en los piezómetros.

La actividad de inventario de puntos de agua se realizó siguiendo el Formulario Único Nacional para Inventarios de Aguas Subterráneas (FUNIAS), elaborado por el IDEAM, SGC y MINAMBIENTE.

Figura 5-2.1 Localización de las principales prospecciones realizadas en la UF1



Fuente: Geodata, 2018.

- Procesamiento de la información

En oficina, se procesó la información recolectada y levantada, con el fin de que cada dato pudiese ser usado en la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual, análisis de la afectación potencial de las obras y la definición del área de influencia hidrogeológica.

- Análisis de la Hidrogeoquímica del Agua

Este análisis se basa en resultados de muestreo físico-químicos de puntos de agua y está encaminado a comprender los procesos de flujo del agua desde que se infiltra en el subsuelo hasta que se descarga nuevamente a superficie. Durante el tránsito del agua en las unidades hidrogeológicas sus características pueden cambiar por la disolución de iones, razón por la cual se analiza su concentración.

- Análisis de Isótopos

El análisis de isótopos es una herramienta para entender el flujo de agua subterránea regional y confirma, o refuta, las relaciones inferidas entre los acuíferos, brindándonos información sobre origen, edad, tiempo de residencia y trayectoria de flujo de agua subterránea.

- Elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual

El modelo conceptual busca abstraer de la realidad los aspectos más importantes y representativos desde el punto de vista hidrogeológico, para plasmarlos en una base más sencilla manejable tanto a nivel hidrogeológico como a nivel computacional, buscando siempre representar el medio hidrogeológico de forma fiel a la realidad.

Con base en la información de carácter primario y secundario disponible sobre el área de estudio, la recopilada durante las investigaciones hidrogeológicas de campo (inventario de puntos de agua) y aquella de tipo hidroquímica se elabora un Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio, identificando la relación existente entre las diferentes unidades hidrogeológicas identificadas, los tipos de drenaje dominantes, las principales zonas de carga y descarga, así como la dirección preferencial de flujo subsuperficial y subterráneo.

- Elaboración del Modelo numérico del flujo subsuperficial y subterráneo

De manera similar a lo que sucede con el modelo hidrogeológico conceptual, el cual se toma como referencia; el modelo numérico debe entenderse como un acercamiento a la realidad que trata de simular de la mejor manera posible y con base en la información a disposición, el comportamiento de los flujos subsuperficiales y subterráneos teniendo en cuenta la construcción del túnel Pamplona.

Para el caso específico del túnel Pamplona las simulaciones numéricas realizadas se han ejecutado involucrando los puntos de agua en superficie.

Para la elaboración del modelo numérico se utilizó el método de elementos finitos, código Feflow 7.0 (Wasy AG, Berlin) que aplica la ley de Darcy en todas sus partes. La cual es actualmente una de las herramientas de cálculo más utilizadas y reconocidas por la comunidad científica internacional en estudios hidrogeológicos realizados en contextos geológicos y estructurales complejos como aquel donde se construirá el túnel Pamplona.

No obstante, dada la complejidad geológica, estructural y por lo tanto de distribución de flujos en el contexto geológico presente en la zona de estudio, el modelo numérico realizado se cruza con otras metodologías en el tema específico de valoración de potenciales afectaciones a los puntos de agua por la presencia del túnel Pamplona, como por ejemplo el método DHI (Drowdawn Hazard Index), de esta manera no se confía este importante resultado a una sola herramienta de cálculo.

- Definición del Área Influencia y Análisis de la Afectación Potencial y Medidas

Todas las actividades y análisis realizados mediante la anterior metodología están enfocados a definir un área de influencia hidrogeológica. De forma posterior a la definición de esta área, se realiza también un análisis con el objeto de identificar la potencial

afectación del recurso hídrico subsuperficial y subterráneo (incluyendo puntos de agua) por las obras que integran el nuevo corredor vial.

Finalmente, de evidenciarse alguna afectación en cantidad o calidad del agua subsuperficial y subterránea, se plantean medidas de manejo sobre los cuerpos impactados.

- Análisis de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos

Para el análisis de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos se utilizó el método G.O.D. (Foster et al., 2002; Foster, 1987), muy eficaz en contextos análogos al objeto en estudio, que toma en cuenta tres datos fundamentales: a) el tipo de confinamiento del agua o tipo de acuífero (G), b) características litológicas de la zona no saturada (O) y c) la profundidad del agua (D). Se eligió este método frente a otros existentes, por ejemplo, DRASTIC, SINTACS, COP o EPIK, especialmente por la confiabilidad de los datos a disposición tomando en cuenta la extensión del área de estudio.

- Valoración del riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteada

Este análisis específico toma en consideración las principales obras que conforman el proyecto y valora la posibilidad de que ocurra algún daño causado por la presencia de condiciones peligrosas en alguna parte de este. El riesgo representa la probabilidad e importancia de que un posible peligro se haga realidad en términos de contaminación.

El objetivo del proceso para identificar y evaluar riesgos es obtener un mayor conocimiento acerca de los tipos de sustancias y productos transportados, así como de las principales fuentes de potencial contaminación. El requisito principal de una identificación y evaluación de riesgos es adquirir un entendimiento del modelo físico del sitio, la vulnerabilidad de los acuíferos, la localización de las aguas subsuperficial y subterráneas amenazadas para la contaminación y los tiempos de exposición a una contaminación. Estos factores son tenidos en cuenta en la valoración de riesgo realizada.

- Elaboración de la Red Monitoreo

En términos generales, son objetivos de una Red de Monitoreo para aguas subsuperficiales y subterráneas identificar las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del agua, su estado y variación estacional en cantidad y calidad, los efectos de los procesos naturales y los impactos antrópicos y la estimación de tendencias en cantidad y calidad.

Con base en lo anterior, para concluir y realizar seguimiento del análisis realizado, se elabora una red de monitoreo, especificando los puntos para el monitoreo, incluyendo periodicidad y parámetros a medir a lo largo de la construcción y operación del proyecto vial.

5.1.8.2.2 Área de influencia preliminar

Para la definición preliminar del área de influencia hidrogeológica se ha considerado específicamente el tipo de obra que se prevé implementar, en este caso una vía a cielo abierto con un túnel, y se ha valorado el potencial impacto que sobre el entorno hidrogeológico pudieran tener las estructuras que la conforman.

Las obras más importantes que conforman una carretera proyectada en zona de montaña, y que pueden incidir en mayor o menor grado en el abatimiento de los niveles freáticos en los acuíferos interceptados y/o redireccionamiento de los flujos que alimentan los diferentes puntos de agua en correspondencia y/o inmediaciones de las zonas de intervención, son:

- Puentes o viaductos de diferentes tipos y longitudes (impacto bajo a muy bajo). Por lo general su impacto se limita a un área relacionada con el tipo y tamaño de la fundación. En el caso específico de la UF1 no se construirán puentes ni viaductos.
- Terraplenes de diferentes alturas (impacto bajo a medio). Por lo general su impacto se traduce en la reducción de la permeabilidad en el terreno subyacente por el peso propio del terraplén. En el caso específico de la UF1 son pocos los terraplenes que se construirán y todos de ellos de baja altura.
- Vía a nivel o estructura de vía normal (impacto bajo). Por lo general su impacto se relaciona con la reducción local del área de infiltración y recarga potencial debido a la presencia de la carpeta asfáltica. La mayor parte del proyecto de la UF1 se desarrollará en esta condición.
- Cortes y/o taludes de diferentes alturas y diseños (impacto medio a alto). Por lo general su impacto se considera el de mayor relevancia especialmente para los flujos subsuperficiales, dado que, dependiendo de su altura, tiene la capacidad de afectarlos o interceptarlos, con el potencial de afectar puntos de agua ubicados en cotas superiores o inferiores respecto al eje de la vía proyectada. La mayor parte de los cortes y taludes previstos en la UF1 son menores a 15 m, con algunas excepciones especialmente ubicadas en inmediaciones a los portales del túnel que no superan los 30 m de altura.
- ZODMEs (Impacto medio – alto). Por lo general su impacto se limita al área de intervención propiamente dicha y un perímetro aledaño. En la UF1 se ha previsto el uso de ocho (8) ZODMEs de diferentes tamaños.
- Túnel (impacto alto). Sin duda alguna es la obra que mayor capacidad tiene de impactar su entorno hidrogeológico debido a su efecto dren, el cual genera un cono de abatimiento alrededor del túnel. En la UF1 se tiene prevista la construcción del túnel Pamplona.

Tomando en cuenta lo antes expuesto y el hecho que la selección del área de estudio tiene como objetivo incluir todas las zonas donde potencialmente pudiesen ocurrir impactos a causa de la construcción y operación de la vía proyectada, el área de estudio preliminar se enmarca de la siguiente manera:

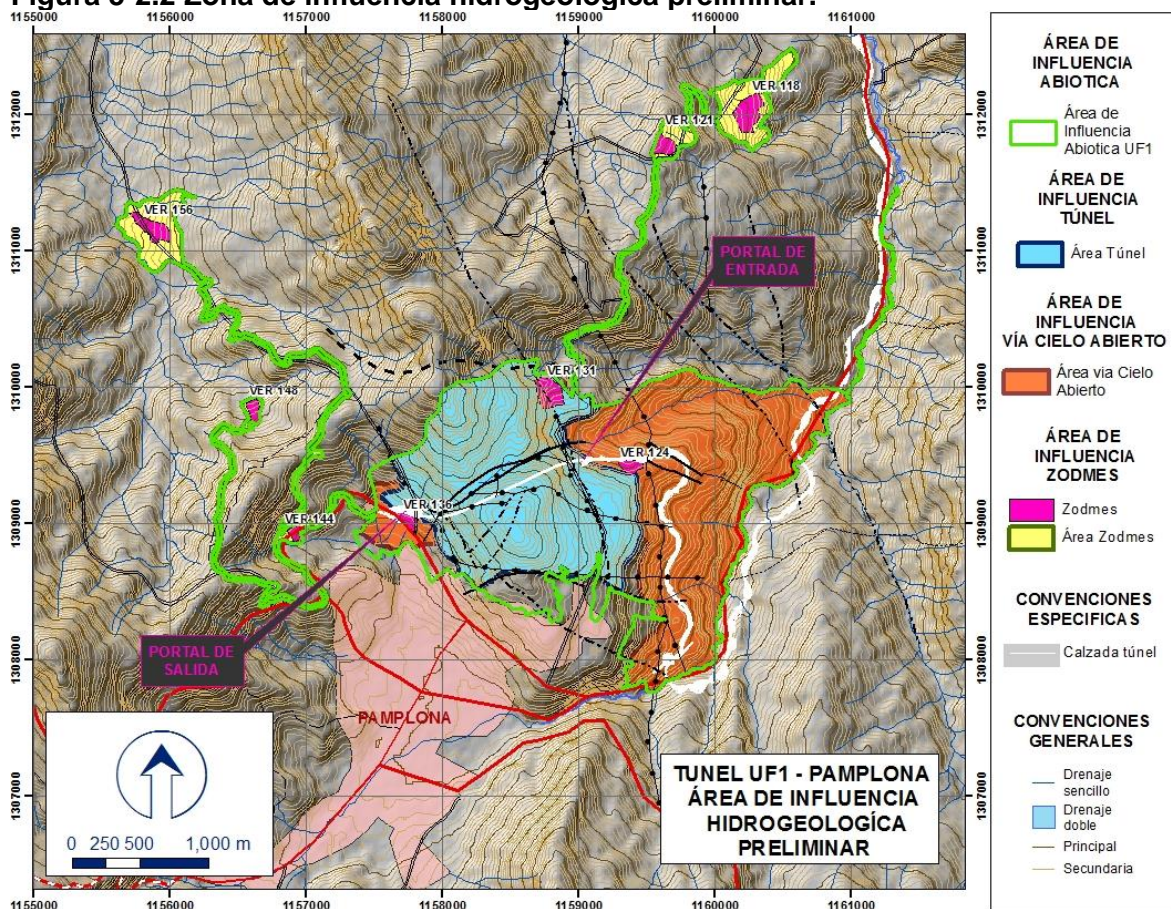
- Para la vía a cielo abierto se considera una distancia perpendicular a su trazado de 100 m para cotas superiores (buffer), mientras que para cotas inferiores se toma el

área comprendida entre el eje del trazado vial y el cauce del río Pamplonita, por ser este último el límite hidrogeológico más claro y evidente a lo largo de toda la UF1 para la vía a cielo abierto.

- Para el túnel se considera un área similar a aquella definida como área de influencia del medio abiótico, que en las inmediaciones de la parte central del eje del túnel alcanza aprox. 1 km de extensión.
- Para los ZODMEs se considera una zona equivalente al área de intervención más un polígono de 100 m a su alrededor.

En la Figura 5-2.2 se muestra el área de estudio preliminar, la cual se enmarca en el área de influencia abiótica del proyecto.

Figura 5-2.2 Zona de influencia hidrogeológica preliminar.



Fuente: Geodata, 2018.

5.1.8.2.3 Marco Teórico

Como base para la caracterización hidrogeológica del área de estudio, es preciso realizar una síntesis teórica sobre los conceptos básicos utilizados en el desarrollo del documento, así como las definiciones y clasificaciones implementadas.

- **Definiciones Hidrogeología**

- **Acuífero:**

Es una formación, grupo de formaciones o parte de una formación que contiene suficiente material saturado permeable para proveer cantidades significativas de agua a pozos, aljibes y manantiales (Wilson & Moore, 1998).

- **Acuitardo:**

Es una unidad geológica que no es capaz de transmitir cantidades significativas de agua, bajo gradientes hidráulicos ordinarios (Freeze & Cherry, 1979). En la actualidad el término acuitardo se reemplazó con el término capa confinante (Wilson & Moore, 1998). Sobre este tipo de unidades no es factible ubicar pozos y/o aljibes.

- **Acuífero Libre:**

Acuífero en el cual el nivel piezométrico se encuentra a presión atmosférica, dentro de la zona saturada (Wilson & Moore, 1998). La recarga a estos acuíferos se da desde los procesos de infiltración descendente a través de la zona no saturada.

- **Descarga:**

Se entiende como el volumen de agua que fluye en un tiempo unitario a través de una corriente o un acuífero.

- **Área de descarga:**

Corresponde a un área en la cual el agua subsuperficial, incluyendo agua subterránea y agua de la zona vadosa se descarga a la superficie, a cuerpos de agua superficiales o a la atmosfera (Wilson & Moore, 1998).

- **Descarga específica:**

Corresponde a una velocidad aparente calculada a partir de la ecuación de Darcy que corresponde al flujo de agua subsuperficial y subterránea por área unitaria de acuífero.

- Área de recarga:

Es un área bajo la cual el agua alcanza la zona saturada por medio de infiltración y percolación. Por debajo de esta zona existen componentes de gradiente hidráulico que hacen que el agua fluya a zonas más profundas del acuífero (Wilson & Moore, 1998).

- Filtración Difusa (SEEP):

Corresponde a un área, generalmente pequeña donde el agua percola de la tierra a la superficie. Es usado para flujos muy pequeños para ser considerados manantiales (Wilson & Moore, 1998).

- Flujo subsuperficial:

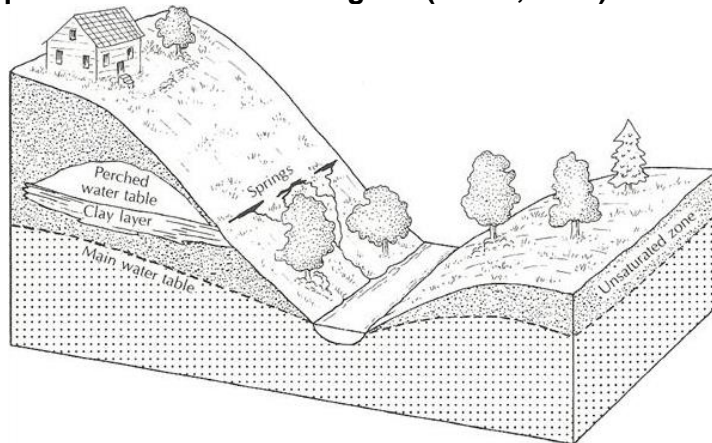
Sinónimo de filtración superficial, interflujo y flujo hipodérmico. Es una parte de la precipitación que no se ha filtrado hasta el nivel freático, pero que se descarga como flujo subsuperficial desde el terreno (Unesco, WMO, 2012)

- Resurgencia:

Reaparición por encima del suelo, al final de su recorrido subsuperficial o subterráneo, de una corriente de agua superficial que había desaparecido bajo tierra (Unesco, WMO, 2012).

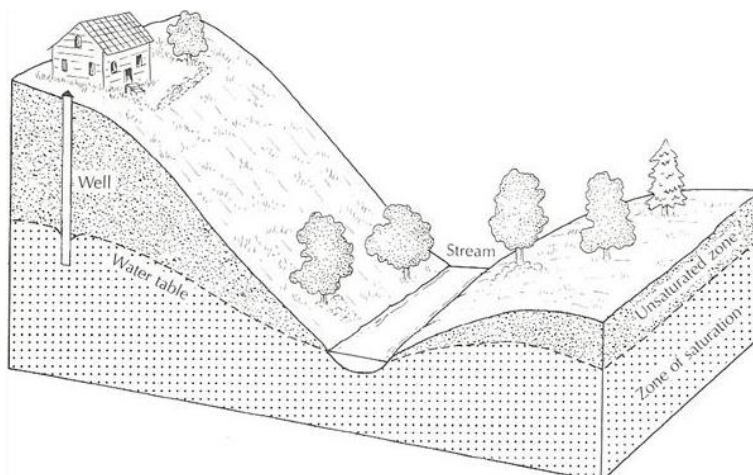
Con el fin de detallar los últimos 3 conceptos descritos, en la Figura 5-2.3 y la Figura 5-2.4 se muestran esquemas de manantiales, tal y como son descritos por Fetter (1980).

Figura 5-2.3. Esquema de un acuífero colgado (Fetter, 1980).



Fuente: Hidrogeocol, 2018

Figura 5-2.4. Acuífero libre, inconfinado o de nivel freático (Fetter, 1980)



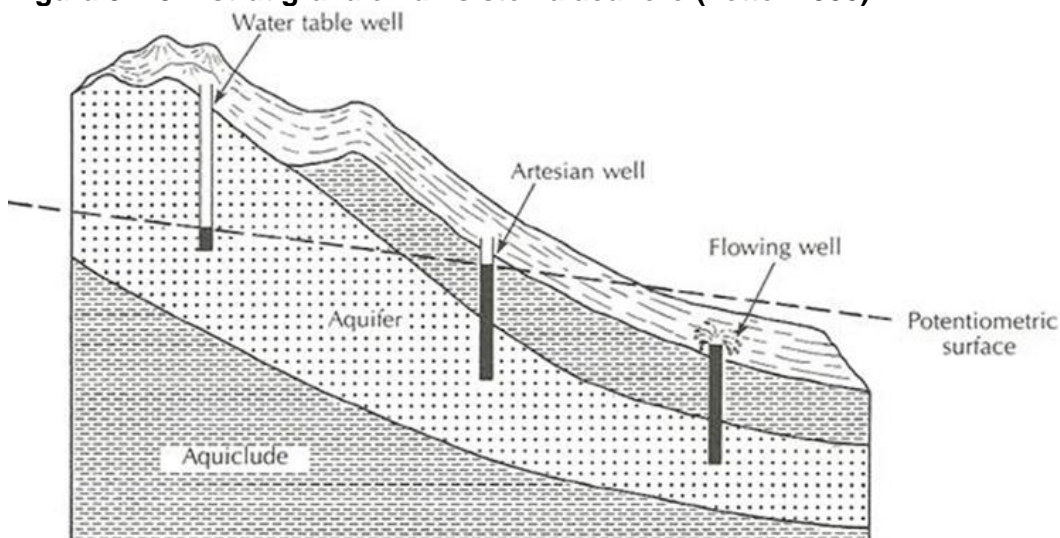
Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la Figura 5-2.3 se puede observar una zona que corresponde a manantiales (springs) ocasionados por niveles colgados (perched water table). Estos flujos de agua a la superficie corresponden a fenómenos locales no relacionados con la tabla de agua principal.

En la Figura 5-2.4 se observa el esquema de un acuífero libre de extensión regional, en el cual no hay niveles colgados, por lo cual no se observan afloramientos de agua en superficie a media ladera.

En la Figura 5-2.5 se muestra la estratigrafía de un sistema acuífero el cual se encuentra semiconfinado por capas de baja permeabilidad (dada la antigüedad de la imagen se mantiene el término acuicludo, ahora en desuso). La zona de recarga se muestra en la zona superior, en donde el acuífero tiene un comportamiento libre, agua abajo, el acuífero se hace confinado.

Figura 5-2.5. Estratigrafía en un sistema acuífero (Fetter 1980)



Fuente: Hidrogeocol, 2018

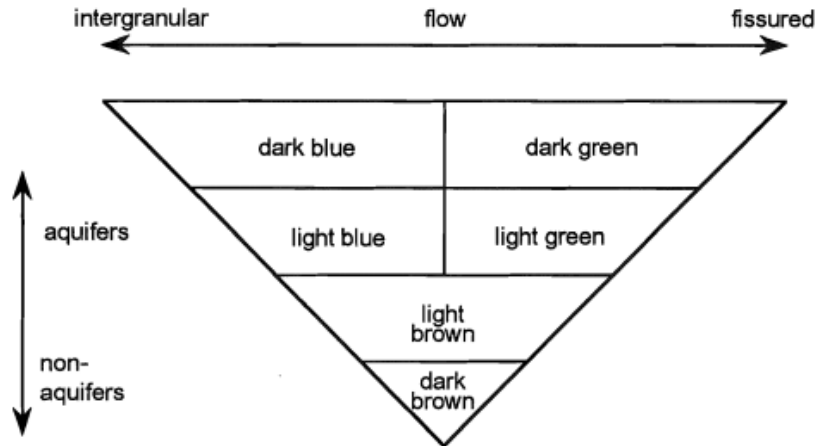
- **Clasificación de unidades hidrogeológicas**

La clasificación de las unidades hidrogeológicas busca determinar de forma global los principales aspectos que controlan el flujo de agua subsuperficial y subterránea dentro del área de estudio. Los resultados de la clasificación de unidades serán implementados en el modelo conceptual de forma posterior.

Las unidades hidrogeológicas en el área de estudio se clasifican siguiendo los lineamientos planteados por la Asociación Internacional de Hidrogeología (1995) (en adelante IAH, por sus siglas en inglés). La clasificación de la IAH se basa en el tipo de porosidad dominante en los sedimentos y rocas (Primaria o intergranular y secundaria o por fracturas) y a su potencialidad acuífera, reflejada ésta última en el valor de la Capacidad Específica y la Conductividad Hidráulica de cada unidad, clasificándose las dichas unidades en acuífero, capa confinante y/o unidad sin potencial acuífero.

En la Figura 5-2.6 se muestra el estándar de colores para la representación de unidades hidrogeológicas según la IAH (1995).

Figura 5-2.6. Esquema de colores para representación hidrogeológica – IAH (1995)



Fuente: Hidrogeocol, 2018

Figura 5-2.7. Ejemplo colores para representación hidrogeológica – IAH (1995)

Groundwater and rocks

Aquifers in which flow is mainly intergranular



extensive and highly productive aquifers



local or discontinuous productive aquifers or extensive but only moderately productive aquifers

Fissured aquifers, including karst aquifers



extensive and highly productive aquifers



local or discontinuous productive aquifers, or extensive but only moderately productive aquifers

Strata (granular or fissured rocks) forming insignificant aquifers with local and limited groundwater resources or strata with essentially no groundwater resources



minor aquifers with local and limited groundwater resources



strata with essentially no groundwater resources

Fuente: Hidrogeocol, 2018

- **Puntos hidrogeológicos**

- Pasos para la clasificación de puntos hidrogeológicos

A continuación, se enuncian los pasos del algoritmo de caracterización de los puntos hidrogeológicos:

1. Identificación de aspectos geológicos y geomorfológicos a nivel regional
2. Identificación de localización de surgencias de agua.
3. Realización de pruebas físicas de caracterización. (sondeos, slug, tomografías, SEVs, piezómetros, etc)
4. Filtro de caracterización de puntos de surgencia según ocurrencia geológica y distribución hidrogeológica.
5. Filtro de caracterización de puntos de surgencia según origen y sentido de los flujos.
6. Determinación de condiciones de cercanía y afectación a las obras viales para su clasificación en cuanto a criticidad y medidas requeridas.

Para la clasificación de los puntos hidrogeológicos se tienen en cuenta las definiciones contempladas al inicio del componente hidrogeológico:

- Manantial.

De acuerdo a la definición, es el afloramiento de agua desde una roca o suelo en la superficie del terreno o en otros cuerpos de agua superficial. En este estudio se considera el hecho de que se origina a partir de flujo subterráneo saturado, no de flujo subsuperficial.

- Interflujo o Flujo Subsuperficial.

Es la segunda clasificación, que corresponde a un flujo que se ha infiltrado pero que no llega hasta el nivel, sino que sigue trayectorias cortas y generalmente aflora en cursos de agua o en el suelo, formando cursos de agua superficial.

- Resurgencia.

Es la reaparición en el suelo de un agua o corriente que se ha infiltrado siguiendo trayectorias cortas, o sea se puede considerar también como flujo subsuperficial, y reaparece más aguas abajo del lugar de reinfiltración.

- Clasificación de los puntos hidrogeológicos

Los puntos de agua subsuperficial y subterránea en una determinada zona pueden estar subdivididos en puntos de agua de origen natural (flujos desde el suelo hacia la superficie) y puntos de agua de origen antrópico, que son aquellos en los cuales existe un flujo de agua desde el suelo hacia la superficie ocasionado a partir de actividades humanas.

Para el presente estudio se generó una clasificación con el fin de cumplir con los objetivos planteados y siguiendo las directrices de los Términos de Referencia del ANLA. Esta clasificación corresponde a una recopilación de la literatura disponible sobre el tema, así como a la experiencia de Hidrogeocol S.A. en el desarrollo de estudios hidrogeológicos.

Para realizar la clasificación de los puntos de agua que existen en la zona se empleó bibliografía académica altamente empleada a nivel mundial. Las principales fuentes citadas se muestran en la siguiente lista. Cabe resaltar que los dos primeros documentos, datan de los años 90's, sin embargo, aún se siguen citando ampliamente en publicaciones indexadas contemporáneas.

- Custodio, E. & Llamas, M.R. (1976). Hidrología Subterránea. OMEGA ESPAÑA
- Wilson, W. & Moore, J. (1998). Glossary of Hydrology. American Geological Institute. Capital City Press.
- Kresic, N. & Stevanovic, Z. (2009). Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management and Sustainability
- Fetter C.W. (2001). Applied Hydrogeology. Prentice Hall.
- Glosario Hidrológico Internacional, WMO UNESCO (2012)

Con base en la revisión de la literatura citada se realiza la definición del tipo de puntos de agua que se encuentran presentes en la zona de estudio.

- Puntos Antrópicos

Corresponden a todo elemento construido por el ser humano para la exploración y/o explotación de aguas subsuperficiales y subterráneas que no están disponibles de manera natural. Estos puntos se encuentran en un sistema hidrogeológico principalmente como:

- A. Pozos de Agua: Corresponden a excavaciones artificiales, generalmente cilíndricas, realizadas en el suelo. Poseen una profundidad lo suficientemente alta para permitir la penetración en roca con condiciones acuíferas (Wilson & Moore, 1998).
- B. Piezómetros: Corresponden a perforaciones utilizadas para la medición de carga hidráulica al interior de unidades acuíferas (Wilson & Moore, 1998).
- C. Aljibes: Corresponden a pozos someros, generalmente de gran diámetro, construidos mediante excavación manual o por medios diferente a taladros de perforación profunda (Wilson & Moore, 1998).
- D. Excavaciones (y/o modificaciones del terreno): Corresponden a cortes de material en el terreno que modifican la topografía, cortan el nivel freático en un acuífero libre y generan exfiltraciones a partir del suelo.

- Puntos Naturales

Corresponden a todo afloramiento natural de agua desde la matriz de suelo hacia la superficie. Pueden estar asociados a flujos en zona no saturada, a la naturaleza de las rocas, a la posición de la tabla de agua y a la topografía de la zona (Wilson & Moore, 1998).

- A. Manantial: Es un lugar en el cual el agua emerge de forma natural desde una roca o el suelo y fluye hacia la superficie o hacia una masa de agua superficial (Unesco, WMO, 2012). El manantial es entonces el afloramiento de agua subterránea diferente de los flujos subsuperficiales llamados también interflujos o flujos hipodérmicos, entre otros, los cuales que tienen generalmente trayectorias más cortas.

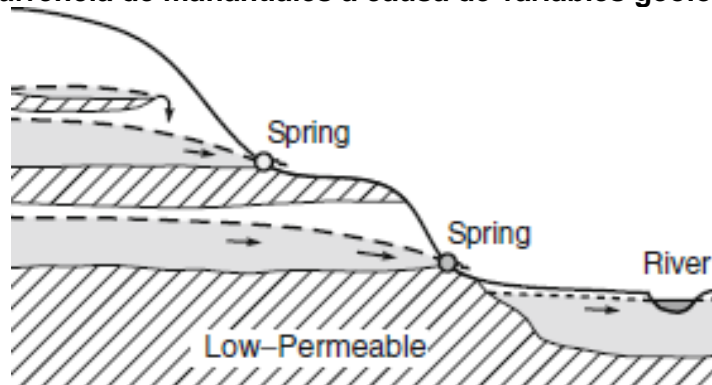
Los manantiales se clasifican de acuerdo con diferentes criterios, entre los cuales suelen ser los más usuales:

- Caudal y estacionalidad.
- Carácter de la carga hidráulica que crea la descarga.
- Unidad y estructura geológica y geomorfológica que controla el caudal (depresión, contacto, barrera, etc).
- Calidad y temperatura del agua

Se han establecido varios criterios para agrupar manantiales, algunos esquemas han sido propuestos por Fuller (1904), Keilhack (1912), Bryan (1919), Meinzer (1923), Clarke (1924), Stiny (1933), Wallace & Alfaro (2001), etc. De los anteriores esquemas, la clasificación de Meinzer, basada en 11 características de los manantiales (físicas y químicas) continúa siendo empleada, detallando únicamente los valores de caudal (1 variable de 11). La clasificación basada únicamente en la descarga promedio del manantial, sin especificar otros parámetros de descarga, no es muy útil y no permite realizar análisis cualitativos/cuantitativos válidos.

En las siguientes figuras se muestran algunos tipos de manantial, tal y como son definidos por Kresic (2010).

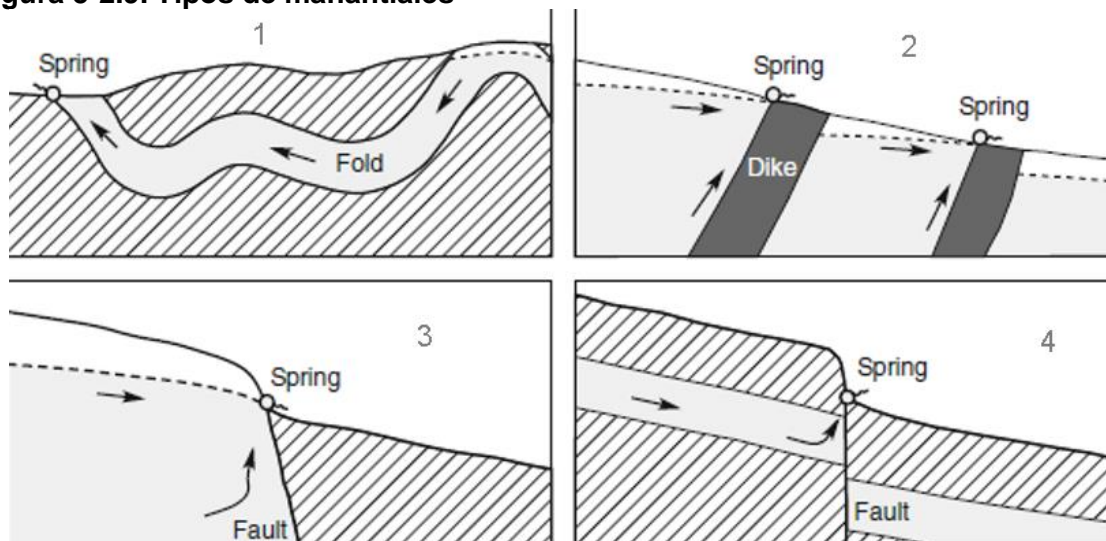
Figura 5-2.8. Ocurrencia de manantiales a causa de variables geológicas



Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la Figura 5-2.9 se muestra la ocurrencia de manantiales a causa de capas semiconfinantes en una unidad geológica.

Figura 5-2.9. Tipos de manantiales

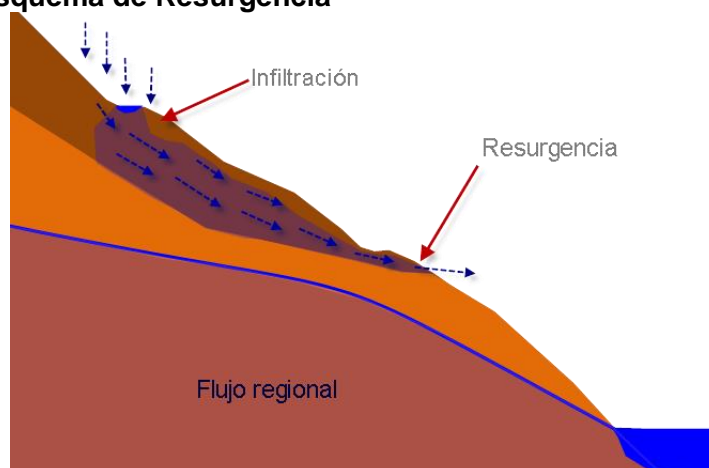


Fuente: Hidrogeocol, 2018 - Kresic (2010).

En la Figura 5-2.9 se muestran varios tipos de manantiales. El primero corresponde a un manantial de plegamiento, el segundo a manantiales por barreras de baja permeabilidad, el tercero a manantiales por fallas que ponen en contacto dos formaciones y el cuarto a un manantial por fallas normales que separan dos tipos de formaciones.

- B. Resurgencia (Flujo Secundario): Se define como la reaparición por encima del suelo, al final de su recorrido subterráneo, de una corriente de agua superficial que había desaparecido bajo tierra (Unesco, WMO 2012).

Figura 5-2.10. Esquema de Resurgencia

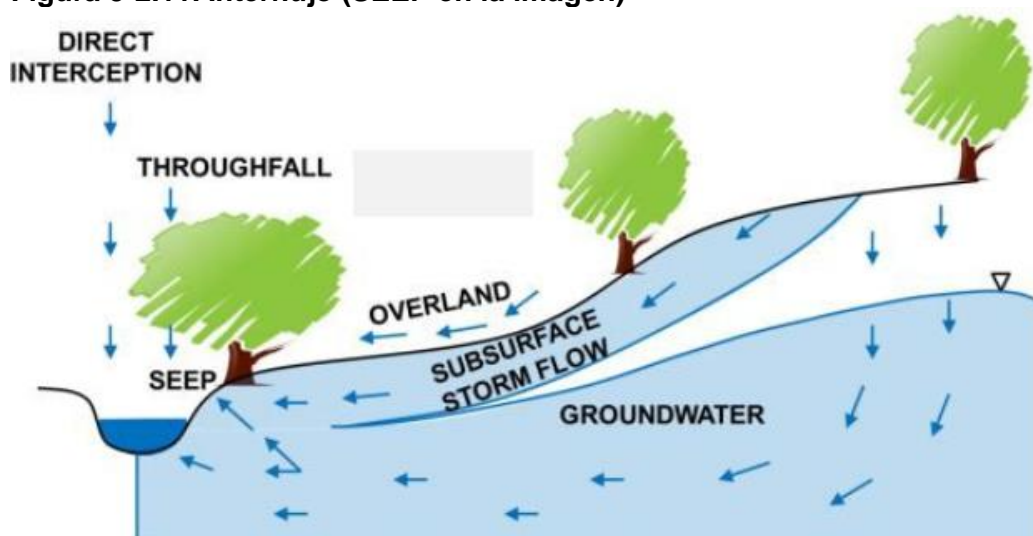


Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la Figura 5-2.10 se muestra de forma esquemática una resurgencia. Por definición las resurgencias no están asociadas al nivel de flujo regional de la zona, por lo que están asociadas a flujo subsuperficial.

- C. Interflujo: Es parte de la precipitación que no se ha filtrado hasta el nivel freático pero que se descarga como flujo subsuperficial en los cursos de agua. Figura 5-2.11 También se define como el flujo de agua desde zonas de saturación temporales que circula a través de los estratos superiores de una formación geológica a una velocidad muy superior a la de la escorrentía subterránea normal (Unesco, WMO, 2012). Por esta razón también el interflujo se puede considerar como flujo subsuperficial.

Figura 5-2.11. Interflujo (SEEP en la imagen)

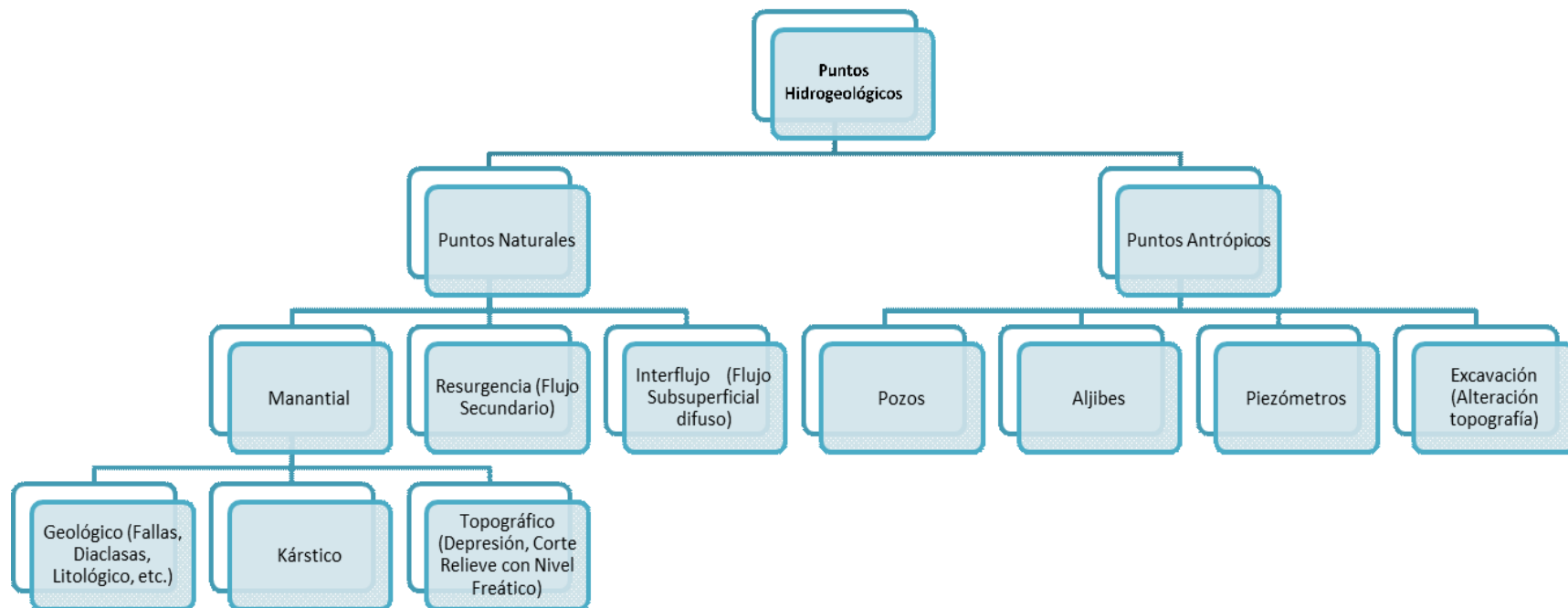


Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la Figura 5-2.11 se pueden observar los flujos asociados a escorrentía (overland y subsurface storm flow) que finalmente terminan en un SEEP.

En la Figura 5-2.12 se presenta el esquema generalizado de clasificación de puntos hidrogeológicos descritos en este numeral.

Figura 5-2.12. Clasificación de puntos de agua subsuperficial y subterránea



Fuente: Hidrogeocol, 2018

5.1.8.3 Geología de referencia

En el numeral 5.1.1 se presenta la geología que ha sido conciliada entre las diferentes áreas del proyecto. Esta constituye el modelo geológico de referencia para el desarrollo del componente hidrogeológico. Las características de las unidades y los rasgos estructurales se presentan en el numeral correspondiente.

5.1.8.4 Inventario y clasificación de puntos hidrogeológicos

El inventario se realiza con el objeto de recolectar, ordenar, almacenar y analizar la información básica de las captaciones de agua subsuperficial y subterránea en el área de estudio. Permite, además, evaluar la disponibilidad del recurso hídrico, tener una visión global de las características y comportamiento de las unidades potencialmente acuíferas y conocer la dirección del flujo subsuperficial y subterráneo.

El inventario se ejecuta consignando la información en el “Formulario Único Nacional Para el Inventario de Puntos de Agua Subterránea -FUNIAS-” (IDEAM), donde se describen las principales características físicas e hidrogeológicas de las captaciones referidas a manantiales o nacederos, pozos, piezómetros y aljibes. Posteriormente sobre cada punto se realiza una caracterización que permite clasificarlo.

Durante el desarrollo del inventario se ejecutaron las siguientes actividades:

- I. Identificación e inventario de puntos de agua subsuperficial y subterránea, que a su vez constituyen la línea base hidrogeológica a lo largo del corredor vial. Cada punto de agua identificado fue descrito siguiendo el Formulario Único Nacional para Inventarios de Aguas Subterráneas (FUNIAS), diseñado por el IDEAM, SGC y MINAMBIENTE. Se obtuvo como resultado una ficha de información de cada uno de los puntos de aguas, con registro fotográfico, cuyas captaciones fueron identificadas con un código y un número de identificación.
- II. Mediciones de parámetros in – situ de las aguas subsuperficiales y subterráneas (PH, conductividad eléctrica, Temperatura y Redox). Esta información fue diligenciada en el Formulario Único Nacional para Inventarios de Aguas Subterráneas (FUNIAS).
- III. Verificación de los puntos de monitoreo para análisis químico, corroborando que ellos cuenten con las condiciones idóneas de acceso y representatividad para la realización de la actividad, con el fin de ajustar o no las coordenadas de muestreo para posterior notificación al laboratorio contratado.
- IV. Reconocimiento de las fuentes de recarga y descarga de las aguas subsuperficiales y subterráneas y sus direcciones preferenciales de flujo.

Para el trabajo de campo se contó con las siguientes herramientas:

- I. Cartografía preliminar
- II. Formatos de campo (FUNIAS)
- III. Recipientes de volumen conocido para efectuar las correspondientes mediciones de caudales.

- IV. Sonda piezométrica.
- V. GPS (Garmin)
- VI. Equipos HANNA INSTRUMENTS, modelos HI98121, HI 98129, HI991300 y termómetro HI 98501 Termómetro digital Checktemp C -50 a 150°C, para medición de parámetros “in situ” de calidad de agua.
- VII. Otros como cámara digital, martillo geológico y brújula, cronómetro.

Se hicieron barridos completos de toda la zona de influencia del proyecto verificando sus condiciones geológicas e hidrogeológicas, identificando los puntos de aguas subsuperficiales y subterráneas e interactuando con la comunidad; ésta última considerada la fuente de información más importante para el presente estudio de inventario.

Para el reconocimiento de campo se contó con dos grupos de trabajo liderados por profesionales idóneos (geólogos), quienes estuvieron apoyados por cuatro baquianos, estos últimos habitantes de la zona de estudio. Los grupos de campo contaron con el apoyo y asesoría permanente de un grupo de especialistas en hidrogeología conformados por un geólogo senior y un especialista en hidrogeología ambiental e hidroquímica.

Desde el punto de vista hidrogeológico los datos y parámetros medidos “in situ” por cada punto de agua censado fueron:

- I. Caudal de los puntos de agua. El 100% de las mediciones de caudal se hicieron con método volumétrico.
- II. Conductividad eléctrica del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, Temperatura y Sólidos Totales Disueltos (SDT). Medidos con sonda multiparamétrica (HANNA INSTRUMENTS HI98121, HI 98129, HI991300 y HI 991300). Todas las medidas de pH y conductividad son automáticamente compensadas por temperatura. El instrumento cuenta con calibración de fábrica; en campo se estableció un control de la calibración con soluciones normalizadas provenientes del mismo fabricante del instrumento. La calibración del pH se realizó con frecuencia diaria.
- III. ORP (mV), medido con una sonda de ORP HANNA INSTRUMENTS, modelo HI 98120. Su sensor de temperatura expuesto provee un rápido tiempo de respuesta y su cercanía garantiza la exacta compensación de temperatura en las lecturas. El instrumento viene calibrado de fábrica; sin embargo, se hicieron lecturas periódicas de control.

5.1.8.4.1 Resultados de campo

Para el caso de la vía a cielo abierto de la UF1, el inventario se realizó en zonas aledañas al trazado vial proyectado, cubriéndose el área de estudio con énfasis en el corredor vial definido contractualmente y con mayor detalle en una franja respecto al eje de la vía que alcanza aprox. 350 m hacia la parte alta de la ladera y hacia la parte baja llega hasta el valle inferior del río Pamplonita. Con lo cual se logra un reconocimiento en campo que cubre con suficiencia el área de influencia hidrogeológica de la vía a cielo abierto.

Para el caso del túnel Pamplona el inventario alcanzó en la parte central del túnel una extensión de hasta aprox. 1 km a cada lado del trazado vial, con lo cual se logra un

reconocimiento en campo que cubre con suficiencia el área de influencia hidrogeológica de esta obra.

Los principales objetivos de naturaleza hidrogeológica que se tuvieron en cuenta para la realización del inventario fueron:

- I. Obtener un conocimiento lo más detallado posible del estado actual de los recursos hídricos subsuperficiales y subterráneos al interior del área de influencia de la vía a cielo abierto de la UF1.
- II. Identificar los puntos de agua localizados en correspondencia con los principales litotipos presentes en la zona. Específicamente se relacionan las siguientes unidades litológicas:
 - Depósitos Aluviales (Qal)
 - Depósitos coluvio-aluviales (Qca)
 - Depósitos Coluviales (Qc)
 - Depósitos de terraza (Qt)
 - Depósitos fluvio-torrenciales (Qft)
 - Depósitos conos de deyección (cd)
 - Formación Colón – Mito Juan (Kscm)
 - Formación la Luna (Ksl)
 - Formación Capacho (Kic)
 - Formación Aguardiente (Kia)
 - Formación Tibú - Mercedes (Kitm)
 - Formación Girón (Jg)
 - Ortoneis (Pdo)

Todas las campañas realizadas dieron lugar a un censo de 48 puntos de agua naturales y ocho (8) piezómetros. Los puntos de agua identificados, fueron inventariados en los respectivos formularios FUNIAS y se encuentran en el Anexo 5.1.3.1 del presente Estudio. Del mismo modo en dicho Anexo se presentan los certificados de calibración de los equipos utilizadas y los resultados de las verificaciones hechas en campo con las respectivas soluciones buffer.

En el mapa hidrogeológico (Anexo 5.1.3.3), se presentan todos los puntos de agua recopilados durante el inventario para la UF1 (túnel + vía a cielo abierto). Estos mismos puntos de agua se muestran en la


Figura 5-2.13 y se resumen en la **Tabla 5-2.1**. Puntos de agua naturales censados en la UF1.

Tabla 5-2.1. Puntos de agua naturales censados en la UF1

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicaci ón Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA01	Interflujo	ZODME 136	1157726	1308915	2381	Depósitos aluviales sobre Formación Girón	nov-17	0,048	7,8	190	17,9	100
							abr-18	0,284	7,8	350	16,4	180
							may-jun/18	-	7,2	180	17,8	95
UF1-PA02	Manantial	Túnel	1158098	1308642	2420		nov-17	0,221	7,97	390	19,3	190
							abr-18	0,352	7,37	390	16,7	200
							may-jun/18	-	7,2	358	17,4	190
UF1-PA03	Manantial	Túnel	1158038	1308669	2409		nov-17	0,214	7,91	400	17,6	200
							abr-18	0,212	7,47	430	16,8	210
							may-jun/18	-	8	385	16,6	204
UF1-PA04	Manantial	Túnel	1158043	1308721	2421		nov-17	1,029	7,57	350	16,9	170
							abr-18	1,1	7,4	390	16,7	190
							may-jun/18	-	7,3	343	16,4	182
UF1-PA05	Interflujo	Túnel	1158208	1308883	2442	Depósitos Coluviales sobre Formación Tibú-Mercedes	nov-17	0,157	7,14	150	15,7	70
							abr-18	0,177	7,05	170	15,5	80
							may-jun/18	-	7,5	152	14,7	81
UF1-PA06	Manantial	Túnel	1157761	1309240	2482	Depósitos coluviales sobre Formación Girón	nov-17	0,011	7,54	80	18,4	40
							abr-18	0,04	7,63	560	17,5	280

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
							may-jun/18	-	7,3	712	19,5	378
UF1-PA07	Manantial	Túnel	1158323	1309304	2568	Depósitos coluvioaluviales sobre Formación Aguardiente	nov-17	0,313	7,46	163	16,9	82
							abr-18	0,449	6,86	190	16,1	100
							may-jun/18	-	6,9	188	15,8	100
UF1-PA08	Interflujo	Túnel	1158483	1309452	2536		nov-17	0,172	5,52	20	15,8	10
							abr-18	0,544	5,42	30	14,5	10
							may-jun/18	-	5,92	21	14,2	11
UF1-PA09	Resurgencia	Túnel	1158987	1309630	2337	Depósitos coluviales sobre Formación Capacho	nov-17	2,211	5,96	45	18,7	22
							abr-18	2,116	6,54	40	16,9	20
							may-jun/18	-	6,8	39	15,9	21
UF1-PA10	Interflujo	Túnel	1158862	1309767	2372		nov-17	0,148	7,16	136	16,2	72
							abr-18	0,36	6,72	120	16,8	60
							may-jun/18	-	7	108	15,5	57
UF1-PA11	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159212	1309611	2287		nov-17	0,047	7,27	340	19,8	170
							abr-18	0,258	6,65	230	17,6	120
							may-jun/18	-	7,1	300	16,4	159
UF1-PA12	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159652	1308983	2257	Depósitos Coluviales sobre Formación Capacho	nov-17	0,058	7,92	460	18,1	230
							abr-18	0,132	6,46	570	16,2	290
							abr-18	0,113	7,87	560	17,8	280
							may-jun/18	-	7,7	482	17,9	255
UF1-PA13	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159760	1308981	2238		nov-17	0,041	7,85	570	25,1	280
							abr-18	0,053	7,65	590	18,9	290
							may-jun/18	-	7,6	585	20,5	310


ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicaci ón Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA14(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159716	1308814	2.258		nov-17	0,002	7,53	380	19	150
							abr-18	0,045	7,25	190	17	95
							abr-18	0,035	6,27	120	16,6	60
							abr-18	0,027	7,52	150	16,6	70
							may-jun/18		7,9	167	15,9	88
UF1-PA15(*)	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159493	1308677	2.300	Formación Aguardiente y Depósitos coluviales	nov-17	0,178	6,57	40	17,4	20
UF1-PA16(*)	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159469	1308439	2.301		abr-18	0,053	7.16	84	17.15	42
							abr-18	0,321	5,72	30	17,1	20
							nov-17	0,274	7,48	20	16,5	10
UF1-PA17	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159404	1308450	2317		abr-18	0,659	6,29	20	16	10
							nov-17	0,405	7,37	20	16,4	10
							abr-18	0,438	6,18	20	16	10
UF1-PA18	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159478	1308071	2270		may-jun/18	-	7,7	22	15,8	11
							nov-17	0,12	7,39	250	19,3	130
							abr-18	0,158	6,67	280	17,2	140
UF1-PA19	Interflujo	Túnel	1159096	1309390	2401	may-jun/18	-	7,3	262	18,5	139	
						nov-17	0,085	4,55	33	15,7	10	
						abr-18	0,268	4,25	30	15,2	20	
UF1-PA20	Interflujo	Túnel	1159042	1309370	2409	Depósitos coluviales sobre Formación Aguardiente	may-jun/18	-	4,6	26	16,6	14
							nov-17	0,065	5,07	20	14,4	10
							abr-18	0,088	4,29	30	14,2	10
UF1-PA21	Resurgencia		1159616	1308603	2250		may-jun/18	-	5,3	18	14,8	10
							abr-18	0,265	7,27	530	17,5	270

 Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small>	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA
Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta	

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
		Vía a cielo abierto				Formación Capacho	may-jun/18	-	7,3	530	17,5	270
UF1-PA22	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159379	1309509	2306	Depósitos coluviales sobre Formación Capacho	abr-18	0,077	5,82	180	20,3	90
							may-jun/18	-	5,7	181	18,6	96
UF1-PA23	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159561	1309195	2312	Formación Capacho	abr-18	0,219	6,86	890	17	440
							may-jun/18	-	7,6	825	16,1	437
UF1-PA24	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159722	1309169	2225	Depósito coluvial sobre Formación Capacho	abr-18	0,903	7,52	720	17	360
							may-jun/18	-	7,5	597	17,6	315
UF1-PA25	Interflujo	ZODME 144	1156797	1308859	2463	Ortoneis	may-18	0,624	6,63	80	16,4	40
							may-jun/18	-	6,8	66	16,2	35
UF1-PA26	Resurgencia	ZODME 148	1156807	1309800	2472	Ortoneis	may-18	0,066	6,05	70	17,6	30
							may-jun/18	-	6,05	70	17,6	30
UF1-PA27	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159737	1309074	2226	Depósitos Coluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,3	7,84	814	19,7	424
UF1-PA28	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159270	1309630	2269	Depósitos Coluvialuviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,009	6,87	381	16,8	197

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA29	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159417	1309678	2252	Depósitos Coluviales sobre Formación La Luna	may-jun/18	0,005	6,95	155	20,4	80
UF1-PA30	Resurgencia	ZODME 144	1156958	1308931	2421	Depósitos Coluviales sobre Ortoneis	may-jun/18	0,01	6,9	63	16,3	34
UF1-PA31	Interflujo	ZODME 148	1156575	1309824	2432	Ortoneis	may-jun/18	-	6,6	161	14,9	82
UF1-PA34	Interflujo	ZODME 118	1160146	1312162	2094	Depósitos Coluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,05	5,1	36	18,1	18
UF1-PA35(*)	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1160040	1309265	2199	Depósitos Coluviales sobre Formación La Luna	may-jun/18	0,054	7,21	284	15,86	142
UF1-PA36(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159934	1308255	2137	Depósitos Coluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,092	7,12	592	16	214
UF1-PA37(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159579	1308160	2246		may-jun/18	0,094	7,94	334	17,53	167

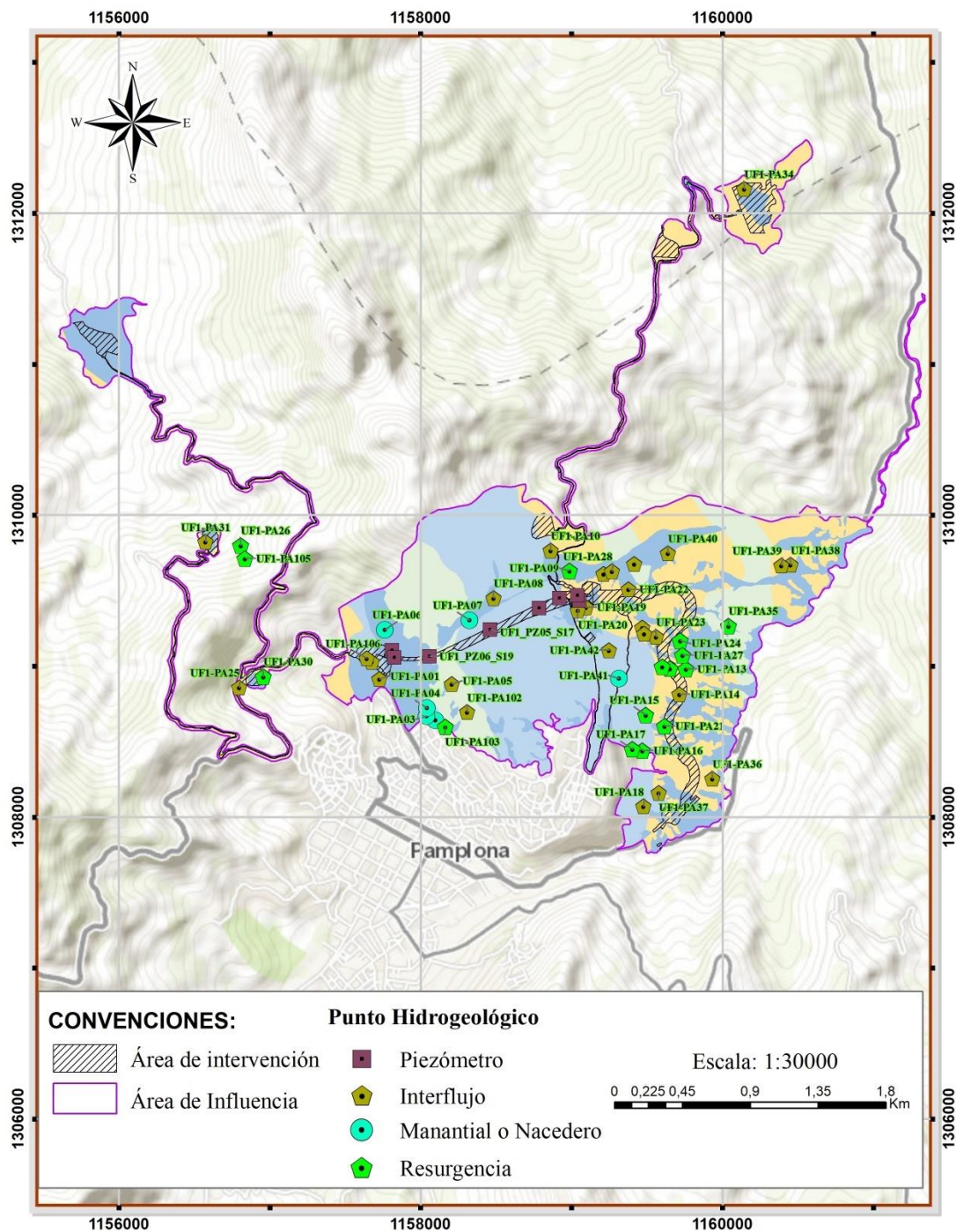
ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA38(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1160451	1309671	2053	Depósitos coluviales sobre Formación Colón Mito-Juan	may-jun/18	0,055	7,45	197	16,1	98
UF1-PA39(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1160391	1309668	2031		may-jun/18	0,092	7,24	161	16,8	81
UF1-PA40(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159640	1309748	2212	Depósitos coluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,085	7,11	178	16,82	89
UF1-PA41	Manantial	Vía a cielo abierto	1159315	1308919	2415	Formación Aguardiente	ago-18	0,024	7,61	614	16,7	396
UF1-PA42	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159250	1309106	2433		ago-18	-	6,78	317	15,4	198
UF1-PA43	Interflujo	ZODME 124	1159471	1309255	2345	Formación Capacho	ago-18	-	6,51	352	14,8	224
UF1-PA44	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159482	1309216	2340		ago-18	0,008	6,33	413	16,2	291
UF1-PA101	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159601	1308997	2285	Depositos Coluviales sobre Fm Capacho	dic-18	-	7,22	530	14,3	280
UF1-PA102	Interflujo	Túnel	1158309	1308696	2504	Fm Tibu Mercedes	dic-18	0,16	7,57	224	14,7	112

 Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small>	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA
Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta	

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA103	Resurgencia	Túnel	1158163	1308597	2443	Depósitos Coluviales sobre Formación Tibú-Mercedes	dic-18	-	7,5	340	17,3	167
UF1-PA104	Interflujo	Vía a cielo abierto	1157676	1309031	2399	Formación Giron	dic-18	0,09	6,82	25	17	125
UF1-PA105	Resurgencia	ZODME 148	1156837	1309714	2488	Ortoneis	dic-18	0,07	6,84	32	12,8	17
UF1-PA106	Interflujo	Vía a cielo abierto	1157643	1309053	2403	Formación Giron	dic-18	0,08	6,77	52	17,3	128
Nota: Los puntos con asterisco (*) se relacionan con puntos reportados en la UF2												

Fuente: Geodata, 2018.

Figura 5-2.13. Localización puntos de agua censados en la UF1




Fuente: Geodata, 2018.

Tabla 5-2.1. Puntos de agua naturales censados en la UF1

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Físicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA01	Interflujo	ZODME 136	1157726	1308915	2381	Depósitos aluviales sobre Formación Girón	nov-17	0,048	7,8	190	17,9	100
							abr-18	0,284	7,8	350	16,4	180
							may-jun/18	-	7,2	180	17,8	95
UF1-PA02	Manantial	Túnel	1158098	1308642	2420		nov-17	0,221	7,97	390	19,3	190
							abr-18	0,352	7,37	390	16,7	200
							may-jun/18	-	7,2	358	17,4	190
UF1-PA03	Manantial	Túnel	1158038	1308669	2409		nov-17	0,214	7,91	400	17,6	200
							abr-18	0,212	7,47	430	16,8	210
							may-jun/18	-	8	385	16,6	204
UF1-PA04	Manantial	Túnel	1158043	1308721	2421		nov-17	1,029	7,57	350	16,9	170
							abr-18	1,1	7,4	390	16,7	190
							may-jun/18	-	7,3	343	16,4	182
UF1-PA05	Interflujo	Túnel	1158208	1308883	2442	Depósitos Coluviales sobre Formación Tibú-Mercedes	nov-17	0,157	7,14	150	15,7	70
							abr-18	0,177	7,05	170	15,5	80
							may-jun/18	-	7,5	152	14,7	81
UF1-PA06	Manantial	Túnel	1157761	1309240	2482	Depósitos coluviales sobre Formación Girón	nov-17	0,011	7,54	80	18,4	40
							abr-18	0,04	7,63	560	17,5	280


ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
							may-jun/18	-	7,3	712	19,5	378
UF1-PA07	Manantial	Túnel	1158323	1309304	2568	Depósitos coluvioaluviales sobre Formación Aguardiente	nov-17	0,313	7,46	163	16,9	82
							abr-18	0,449	6,86	190	16,1	100
							may-jun/18	-	6,9	188	15,8	100
UF1-PA08	Interflujo	Túnel	1158483	1309452	2536		nov-17	0,172	5,52	20	15,8	10
							abr-18	0,544	5,42	30	14,5	10
							may-jun/18	-	5,92	21	14,2	11
UF1-PA09	Resurgencia	Túnel	1158987	1309630	2337	Depósitos coluviales sobre Formación Capacho	nov-17	2,211	5,96	45	18,7	22
							abr-18	2,116	6,54	40	16,9	20
							may-jun/18	-	6,8	39	15,9	21
UF1-PA10	Interflujo	Túnel	1158862	1309767	2372		nov-17	0,148	7,16	136	16,2	72
							abr-18	0,36	6,72	120	16,8	60
							may-jun/18	-	7	108	15,5	57
UF1-PA11	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159212	1309611	2287		nov-17	0,047	7,27	340	19,8	170
							abr-18	0,258	6,65	230	17,6	120
							may-jun/18	-	7,1	300	16,4	159
UF1-PA12	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159652	1308983	2257	Depósitos Coluviales sobre Formación Capacho	nov-17	0,058	7,92	460	18,1	230
							abr-18	0,132	6,46	570	16,2	290
							abr-18	0,113	7,87	560	17,8	280
							may-jun/18	-	7,7	482	17,9	255
UF1-PA13	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159760	1308981	2238		nov-17	0,041	7,85	570	25,1	280
							abr-18	0,053	7,65	590	18,9	290
							may-jun/18	-	7,6	585	20,5	310

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicaci ón Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA14(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159716	1308814	2.258		nov-17	0,002	7,53	380	19	150
							abr-18	0,045	7,25	190	17	95
							abr-18	0,035	6,27	120	16,6	60
							abr-18	0,027	7,52	150	16,6	70
							may-jun/18		7,9	167	15,9	88
UF1-PA15(*)	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159493	1308677	2.300	Formación Aguardiente y Depósitos coluviales	nov-17	0,178	6,57	40	17,4	20
UF1-PA16(*)	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159469	1308439	2.301		abr-18	0,053	7.16	84	17.15	42
							abr-18	0,321	5,72	30	17,1	20
							nov-17	0,274	7,48	20	16,5	10
UF1-PA17	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159404	1308450	2317		abr-18	0,659	6,29	20	16	10
							nov-17	0,405	7,37	20	16,4	10
							abr-18	0,438	6,18	20	16	10
UF1-PA18	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159478	1308071	2270		may-jun/18	-	7,7	22	15,8	11
							nov-17	0,12	7,39	250	19,3	130
							abr-18	0,158	6,67	280	17,2	140
UF1-PA19	Interflujo	Túnel	1159096	1309390	2401		may-jun/18	-	7,3	262	18,5	139
						nov-17	0,085	4,55	33	15,7	10	
						abr-18	0,268	4,25	30	15,2	20	
UF1-PA20	Interflujo	Túnel	1159042	1309370	2409	Depósitos coluviales sobre Formación Aguardiente	may-jun/18	-	4,6	26	16,6	14
							nov-17	0,065	5,07	20	14,4	10
							abr-18	0,088	4,29	30	14,2	10
UF1-PA21	Resurgencia		1159616	1308603	2250		may-jun/18	-	5,3	18	14,8	10
							abr-18	0,265	7,27	530	17,5	270


 Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small>	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA
Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta	

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
		Vía a cielo abierto				Formación Capacho	may-jun/18	-	7,3	530	17,5	270
UF1-PA22	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159379	1309509	2306	Depósitos coluviales sobre Formación Capacho	abr-18	0,077	5,82	180	20,3	90
							may-jun/18	-	5,7	181	18,6	96
UF1-PA23	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159561	1309195	2312	Formación Capacho	abr-18	0,219	6,86	890	17	440
							may-jun/18	-	7,6	825	16,1	437
UF1-PA24	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159722	1309169	2225	Depósito coluvial sobre Formación Capacho	abr-18	0,903	7,52	720	17	360
							may-jun/18	-	7,5	597	17,6	315
UF1-PA25	Interflujo	ZODME 144	1156797	1308859	2463	Ortoneis	may-18	0,624	6,63	80	16,4	40
							may-jun/18	-	6,8	66	16,2	35
UF1-PA26	Resurgencia	ZODME 148	1156807	1309800	2472	Ortoneis	may-18	0,066	6,05	70	17,6	30
							may-jun/18	-	6,05	70	17,6	30
UF1-PA27	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159737	1309074	2226	Depósitos Coluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,3	7,84	814	19,7	424
UF1-PA28	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159270	1309630	2269	Depósitos Coluvioaluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,009	6,87	381	16,8	197

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA29	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159417	1309678	2252	Depósitos Coluviales sobre Formación La Luna	may-jun/18	0,005	6,95	155	20,4	80
UF1-PA30	Resurgencia	ZODME 144	1156958	1308931	2421	Depósitos Coluviales sobre Ortoneis	may-jun/18	0,01	6,9	63	16,3	34
UF1-PA31	Interflujo	ZODME 148	1156575	1309824	2432	Ortoneis	may-jun/18	-	6,6	161	14,9	82
UF1-PA34	Interflujo	ZODME 118	1160146	1312162	2094	Depósitos Coluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,05	5,1	36	18,1	18
UF1-PA35(*)	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1160040	1309265	2199	Depósitos Coluviales sobre Formación La Luna	may-jun/18	0,054	7,21	284	15,86	142
UF1-PA36(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159934	1308255	2137	Depósitos Coluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,092	7,12	592	16	214
UF1-PA37(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159579	1308160	2246		may-jun/18	0,094	7,94	334	17,53	167

 Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small>	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA
Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta	

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA38(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1160451	1309671	2053	Depósitos coluviales sobre Formación Colón Mito-Juan	may-jun/18	0,055	7,45	197	16,1	98
UF1-PA39(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1160391	1309668	2031		may-jun/18	0,092	7,24	161	16,8	81
UF1-PA40(*)	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159640	1309748	2212	Depósitos coluviales sobre Formación Capacho	may-jun/18	0,085	7,11	178	16,82	89
UF1-PA41	Manantial	Vía a cielo abierto	1159315	1308919	2415	Formación Aguardiente	ago-18	0,024	7,61	614	16,7	396
UF1-PA42	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159250	1309106	2433		ago-18	-	6,78	317	15,4	198
UF1-PA43	Interflujo	ZODME 124	1159471	1309255	2345	Formación Capacho	ago-18	-	6,51	352	14,8	224
UF1-PA44	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159482	1309216	2340		ago-18	0,008	6,33	413	16,2	291
UF1-PA101	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159601	1308997	2285	Depositos Coluviales sobre Fm Capacho	dic-18	-	7,22	530	14,3	280
UF1-PA102	Interflujo	Túnel	1158309	1308696	2504	Fm Tibu Mercedes	dic-18	0,16	7,57	224	14,7	112

 Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small>	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA
Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta	

ID FINAL	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Fisicoquímicos			
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)
UF1-PA103	Resurgencia	Túnel	1158163	1308597	2443	Depósitos Coluviales sobre Formación Tibú-Mercedes	dic-18	-	7,5	340	17,3	167
UF1-PA104	Interflujo	Vía a cielo abierto	1157676	1309031	2399	Formación Giron	dic-18	0,09	6,82	25	17	125
UF1-PA105	Resurgencia	ZODME 148	1156837	1309714	2488	Ortoneis	dic-18	0,07	6,84	32	12,8	17
UF1-PA106	Interflujo	Vía a cielo abierto	1157643	1309053	2403	Formación Giron	dic-18	0,08	6,77	52	17,3	128
Nota: Los puntos con asterisco (*) se relacionan con puntos reportados en la UF2												

Fuente: Geodata, 2018.

5.1.8.4.2 Análisis de los datos de interés hidrogeológico provenientes del inventario

- **Caudales característicos de los puntos de agua**

Se analizaron los datos de caudales característicos ($Q=l/s$) mediante la metodología propuesta por Meinzer (1923). Se seleccionó esta metodología porque su división en ocho (8) grupos diferentes, contiene los intervalos suficientes para discriminar correctamente los bajos caudales obtenidos en los diferentes puntos de agua. censados. Donde el primer grupo generalmente corresponde a puntos de agua. muy grandes, con una capacidad de producción muy alta, y el octavo grupo a puntos de agua. muy pequeños, con una capacidad de producción muy modesta.

Tabla 5-2.2. Clasificación de puntos de agua de acuerdo con su caudal.

GRUPO	Q (L/s)
Primero	$Q \geq 2800 \text{ l/s}$
Segundo	$280 \text{ l/s} \leq Q < 2800 \text{ l/s}$
Tercero	$28 \text{ l/s} \leq Q < 280 \text{ l/s}$
Cuarto	$6,7 \text{ l/s} \leq Q < 28 \text{ l/s}$
Quinto	$0,67 \text{ l/s} \leq Q < 6,7 \text{ l/s}$
Sexto	$0,067 \text{ l/s} < Q < 0,67 \text{ l/s}$
Séptimo	$0,0083 \text{ l/s} \leq Q < 0,067 \text{ l/s}$
Octavo	$Q < 0,0083 \text{ l/s}$

Fuente: Meinzer, 1923

La clasificación propuesta por Meinzer es extensible a otros puntos de agua que en este estudio no se clasifican como manantiales.

En la Tabla 5-2.3 y Figura 5-2.14, se reportan los valores de caudales medios medidos “in situ” durante el inventario realizado.

Tabla 5-2.3. Caudales característicos de los puntos de agua inventariados.

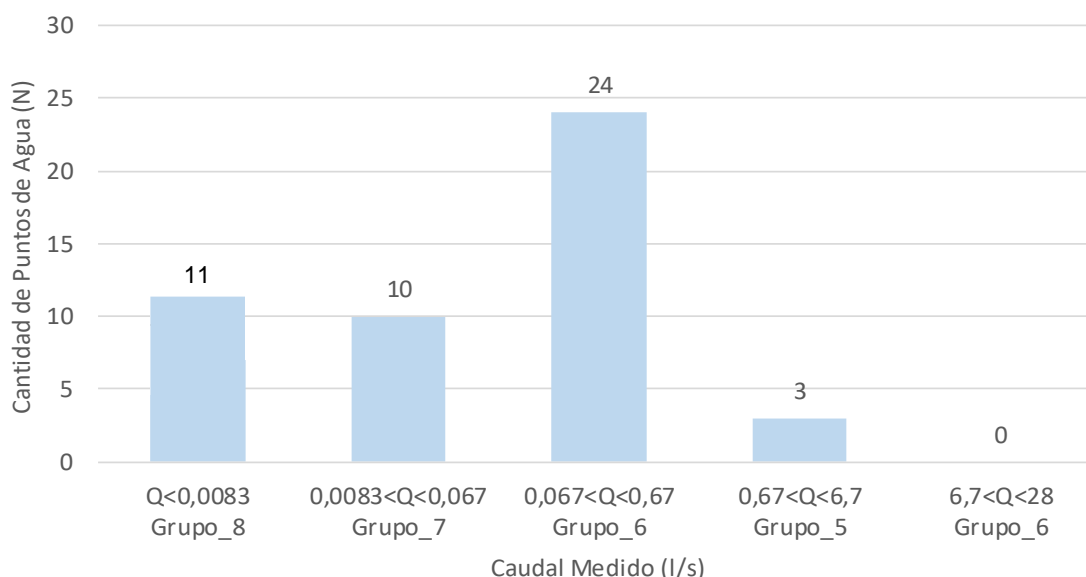
ID Punto	Tipo Punto	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Caudal (l/s)	Fecha
		E	N	Elev		
UF1-PA01	Interflujo	1157726	1308915	2381	0,284	abr/ago_2018
UF1-PA02	Manantial	1158098	1308642	2420	0,352	abr/ago_2018
UF1-PA03	Manantial	1158038	1308669	2409	0,212	abr/ago_2018
UF1-PA04	Manantial	1158043	1308721	2421	1,1	abr/ago_2018
UF1-PA05	Interflujo	1158208	1308883	2442	0,177	abr/ago_2018
UF1-PA06	Manantial	1157761	1309240	2482	0,04	abr/ago_2018
UF1-PA07	Manantial	1158323	1309304	2568	0,449	abr/ago_2018

ID Punto	Tipo Punto	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Caudal (l/s)	Fecha
		E	N	Elev		
UF1-PA08	Interflujo	1158483	1309452	2536	0,544	abr/ago_2018
UF1-PA09	Resurgencia	1158987	1309630	2337	2,116	abr/ago_2018
UF1-PA10	Interflujo	1158862	1309767	2372	0,36	abr/ago_2018
UF1-PA11	Interflujo	1159212	1309611	2287	0,258	abr/ago_2018
UF1-PA12	Resurgencia	1159652	1308983	2257	0,113	abr/ago_2018
UF1-PA13	Resurgencia	1159760	1308981	2238	0,053	abr/ago_2018
UF1-PA14	Interflujo	1159716	1308814	2258	0,035	abr/ago_2018
UF1-PA15	Resurgencia	1159493	1308677	2300	0,321	abr/ago_2018
UF1-PA16	Resurgencia	1159469	1308439	2301	0,659	abr/ago_2018
UF1-PA17	Resurgencia	1159404	1308450	2317	0,438	abr/ago_2018
UF1-PA18	Interflujo	1159478	1308071	2270	0,158	abr/ago_2018
UF1-PA19	Interflujo	1159096	1309390	2401	0,268	abr/ago_2018
UF1-PA20	Interflujo	1159042	1309370	2409	0,088	abr/ago_2018
UF1-PA21	Resurgencia	1159616	1308603	2250	0,265	abr/ago_2018
UF1-PA22	Interflujo	1159379	1309509	2306	0,077	abr/ago_2018
UF1-PA23	Interflujo	1159561	1309195	2312	0,219	abr/ago_2018
UF1-PA24	Resurgencia	1159722	1309169	2225	0,903	abr/ago_2018
UF1-PA25	Interflujo	1156797	1308859	2463	0,624	abr/ago_2018
UF1-PA26	Resurgencia	1156807	1309800	2472	0,066	abr/ago_2018
UF1-PA27	Resurgencia	1159737	1309074	2226	0,3	abr/ago_2018
UF1-PA28	Interflujo	1159270	1309630	2269	0,009	abr/ago_2018
UF1-PA29	Interflujo	1159417	1309678	2252	0,005	abr/ago_2018
UF1-PA30	Resurgencia	1156958	1308931	2421	0,01	abr/ago_2018
UF1-PA31	Interflujo	1156575	1309824	2432	0	abr/ago_2018
UF1-PA34	Interflujo	1160146	1312162	2094	0,05	abr/ago_2018
UF1-PA35	Resurgencia	1160040	1309265	2199	0,054	abr/ago_2018
UF1-PA36	Interflujo	1159934	1308255	2137	0,092	abr/ago_2018
UF1-PA37	Interflujo	1159579	1308160	2246	0,094	abr/ago_2018
UF1-PA38	Interflujo	1160451	1309671	2053	0,055	abr/ago_2018
UF1-PA39	Interflujo	1160391	1309668	2031	0,092	abr/ago_2018
UF1-PA40	Interflujo	1159640	1309748	2212	0,085	abr/ago_2018
UF1-PA41	Interflujo	1159315	1308919	2415	0,024	abr/ago_2018
UF1-PA42	Interflujo	1159250	1309106	2433	0	abr/ago_2018
UF1-PA43	Interflujo	1159471	1309255	2345	0	abr/ago_2018
UF1-PA44	Interflujo	1159482	1309216	2340	0,008	abr/ago_2018
UF1-PA101	Resurgencia	1159601	1308997	2285	0	dic_2018

ID Punto	Tipo Punto	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Caudal (l/s)	Fecha
		E	N	Elev		
UF1-PA102	Interflujo	1158309	1308696	2504	0,16	dic_2018
UF1-PA103	Resurgencia	1158163	1308597	2443	0	dic_2018
UF1-PA104	Interflujo	1157676	1309031	2399	0,09	dic_2018
UF1-PA105	Resurgencia	1156837	1309714	2488	0,07	dic_2018
UF1-PA106	Interflujo	1157643	1309053	2403	0,08	dic_2018

Fuente: Geodata, 2018.

Figura 5-2.14. Valores de caudal de los puntos de agua encontrados durante el inventario



Fuente: Geodata, 2018.

Del análisis de los datos reportados en la Figura 5-2.14, se destaca lo siguiente:

- 34 de los 48 puntos de agua aforados se ubican en los grupos 6 y 7. Lo que equivale a decir que el 77% de los puntos inventariados presentan caudales bajos a muy bajos, inferiores todos ellos a 0,67 l/s (21129 m3/año).
- 3 de los 48 puntos de agua aforados se ubican en el grupo 5. Lo que equivale a decir que el 7% de los puntos inventariados presentan caudales moderados a bajos, inferiores todos ellos a 2,15 l/s (78840 m3/año).
- 11 de los 48 puntos de agua aforados se ubican en el grupo 8. Lo que equivale a decir que el 16% de los puntos inventariados presentan caudales despreciables a insignificantes, inferiores a 0,0083 l/s (262 m3/año).

Respecto a la cantidad de agua presente en los puntos de agua aforados se tiene que en la totalidad de puntos medidos durante el inventario se registraron los caudales medios indicados en la Tabla 5-2.3.

Los bajos caudales son indicativos de una circulación poco profunda generalmente asociadas a zonas de recarga y almacenamientos de poca extensión, o a interflujos y resurgencias, presentes en los depósitos cuaternarios y en las zonas alteradas y fracturadas del basamento rocoso o rocas permeables. Esto conlleva además a prever una alta posibilidad de afectación de la cantidad de agua medida en los puntos de agua censados ante periodos prolongados de sequía.

Para tener una valoración de la variación del caudal medio de los puntos censados, se tomó una muestra de 20 puntos de agua a los cuales se les aforó su caudal en dos periodos climáticos (noviembre del 2017 y abril_may del 2018). En la Tabla 5-2.4 se muestran estos puntos y los caudales medidos.

Los datos mostrados en la Tabla 5-2.4 evidencian un incremento de la oferta hídrica de aproximadamente un 38% en el mes de abril 2018 respecto al mes de noviembre del 2017. Este aparente incremento en oferta es proporcional a cambios estacionales debidos al del ciclo hidrológico bimodal.

En la Fuente: Geodata, 2018.

Figura 5-2.15 se nota la distribución de las excedencias de caudal antes citado. Por lo general los caudales mayores permanecen iguales mientras que los bajos caudales son más sensibles a los cambios de precipitación, evidenciando una alta vulnerabilidad ante periodos prolongados de sequía.

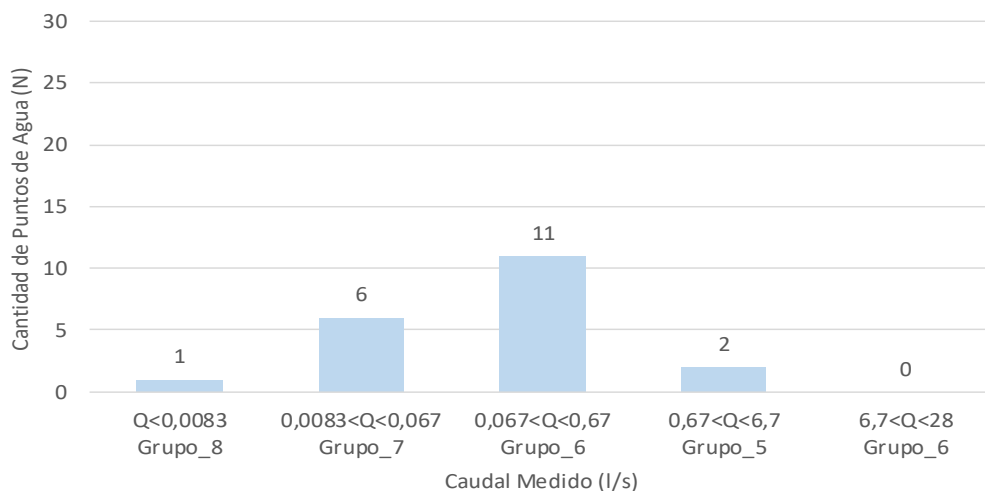
Tabla 5-2.4. Caudales característicos medios de 20 puntos de agua aforados en dos periodos climáticos (Nov_2017 y Abr_2018).

ID Punto	Tipo Punto	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Caudal (l/s)	
		E	N	Elev	nov-17	abril-may/18
UF1-PA01	Interflujo	1157726	1308915	2381	0,048	0,284
UF1-PA02	Manantial	1158098	1308642	2420	0,221	0,352
UF1-PA03	Manantial	1158038	1308669	2409	0,214	0,212
UF1-PA04	Manantial	1158043	1308721	2421	1,029	1,100
UF1-PA05	Interflujo	1158208	1308883	2442	0,157	0,177
UF1-PA06	Manantial	1157761	1309240	2482	0,011	0,040
UF1-PA07	Manantial	1158323	1309304	2568	0,313	0,449
UF1-PA08	Interflujo	1158483	1309452	2536	0,172	0,544
UF1-PA09	Resurgencia	1158987	1309630	2337	2,211	2,116
UF1-PA10	Interflujo	1158862	1309767	2372	0,148	0,360
UF1-PA11	Interflujo	1159212	1309611	2287	0,047	0,258

ID Punto	Tipo Punto	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Caudal (l/s)	
		E	N	Elev	nov-17	abril-may/18
UF1-PA12	Resurgencia	1159652	1308983	2257	0,058	0,113
UF1-PA13	Resurgencia	1159760	1308981	2238	0,041	0,053
UF1-PA14	Interflujo	1159716	1308814	2258	0,002	0,035
UF1-PA15	Resurgencia	1159493	1308677	2300	0,178	0,321
UF1-PA16	Resurgencia	1159469	1308439	2301	0,274	0,659
UF1-PA17	Resurgencia	1159404	1308450	2317	0,405	0,438
UF1-PA18	Interflujo	1159478	1308071	2270	0,120	0,158
UF1-PA19	Interflujo	1159096	1309390	2401	0,085	0,268
UF1-PA20	Interflujo	1159042	1309370	2409	0,065	0,088
					5,80	8,03

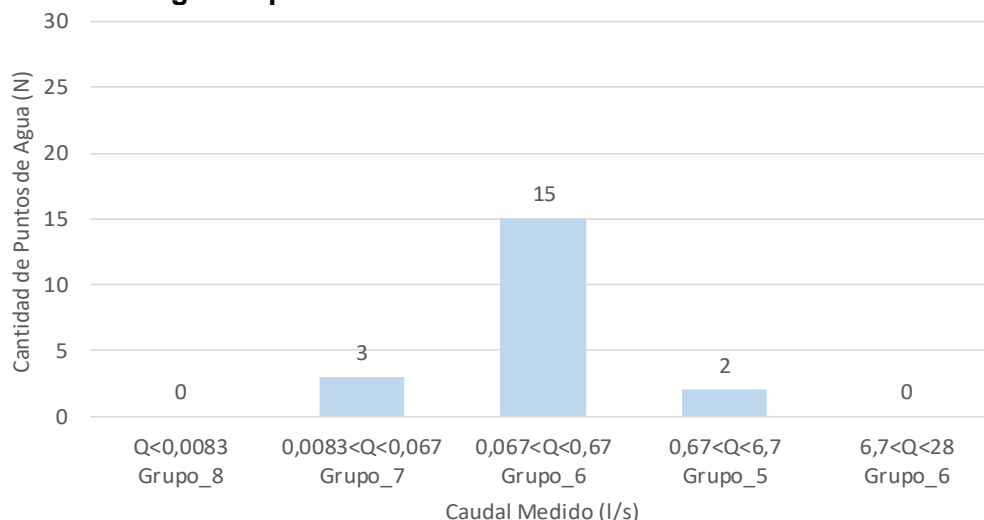
Fuente: Geodata, 2018.

Figura 5-2.15. Valores de caudal para los 20 puntos de agua aforados en dos periodos climáticos – primer periodo.



Fuente: Geodata, 2018.

Figura 5-2.16. Valores de caudal para los 20 puntos de agua aforados en dos periodos climáticos – segundo período.



Fuente: Geodata, 2018.

- **Conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos en puntos de agua naturales**

La conductividad eléctrica del agua subsuperficial y subterránea (aquí expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C) depende de una serie de factores ligados esencialmente a la naturaleza litológica del acuífero. Además de esto, también la temperatura del agua, su profundidad y el tiempo de residencia en el acuífero afectan los valores de conductividad eléctrica. Éste último factor depende a su vez de la longitud del recorrido y de la velocidad de flujo.

La conductividad eléctrica provee información sobre la cantidad total de sales disueltas (mg/L), dado que su valor es directamente proporcional a la concentración total. Los dos factores son correlacionables con la siguiente relación lineal¹.

$$\text{SDT} = \alpha \cdot \text{COND}$$

Donde α , que corresponde al coeficiente angular de la recta, puede variar dependiendo de las especies disueltas en el agua.

En la Tabla 5-2.5, Figura 5-2.7 y Figura 5-2.18 se reportan la distribución de la conductividad y STD en cada uno de los puntos de agua muestreados durante el inventario.

¹ Célico, 1986.

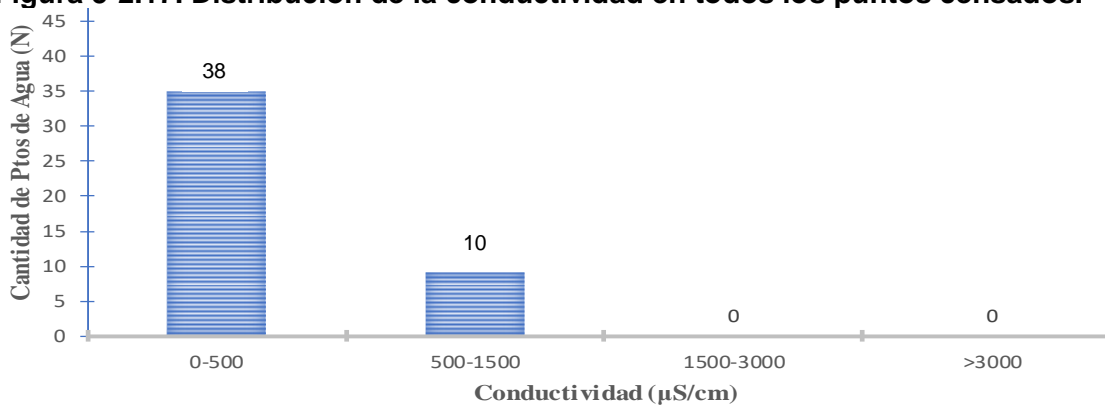
Tabla 5-2.5. Valores de conductividad y STD de los puntos censados.

ID Punto	Tipo Punto	CE	SDT	T
		(μS/cm)	(mg/l)	°C
		abr-ago/18	abr-ago/18	abr-ago/18
UF1-PA01	Interflujo	350	180	16,4
UF1-PA02	Manantial	390	200	16,7
UF1-PA03	Manantial	430	210	16,8
UF1-PA04	Manantial	390	190	16,7
UF1-PA05	Interflujo	170	80	15,5
UF1-PA06	Manantial	560	280	17,5
UF1-PA07	Manantial	190	100	16,1
UF1-PA08	Interflujo	30	10	14,5
UF1-PA09	Resurgencia	40	20	16,9
UF1-PA10	Interflujo	120	60	16,8
UF1-PA11	Interflujo	230	120	17,6
UF1-PA12	Resurgencia	560	280	17,8
UF1-PA13	Resurgencia	590	290	18,9
UF1-PA14	Interflujo	150	70	16,6
UF1-PA15	Resurgencia	84	42	17,2
UF1-PA16	Resurgencia	20	10	16
UF1-PA17	Resurgencia	20	10	16
UF1-PA18	Interflujo	280	140	17,2
UF1-PA19	Interflujo	30	20	15,2
UF1-PA20	Interflujo	30	10	14,2
UF1-PA21	Resurgencia	530	270	17,5
UF1-PA22	Interflujo	180	90	20,3
UF1-PA23	Interflujo	890	440	17
UF1-PA24	Resurgencia	720	360	17
UF1-PA25	Interflujo	80	40	16,4
UF1-PA26	Interflujo	70	30	17,6
UF1-PA27	Resurgencia	814	424	19,7
UF1-PA28	Interflujo	381	197	16,8
UF1-PA29	Interflujo	155	80	20,4
UF1-PA30	Resurgencia	63	34	16,3
UF1-PA31	Interflujo	161	82	14,9
UF1-PA34	Interflujo	36	18	18,1
UF1-PA35	Resurgencia	284	142	15,9
UF1-PA36	Interflujo	592	214	17,9

ID Punto	Tipo Punto	CE	SDT	T
		($\mu\text{S}/\text{cm}$)	(mg/l)	$^{\circ}\text{C}$
		abr-ago/18	abr-ago/18	abr-ago/18
UF1-PA37	Interflujo	334	167	17,5
UF1-PA38	Interflujo	197	98	16,1
UF1-PA39	Interflujo	161	81	16,8
UF1-PA40	Interflujo	178	89	16,8
UF1-PA41	Manantial	614	396	16,7
UF1-PA42	Interflujo	317	198	15,4
UF1-PA43	Interflujo	352	224	14,8
UF1-PA44	Interflujo	413	291	16,2
UF1-PA101	Resurgencia	530	280	14,3
UF1-PA102	Interflujo	224	112	14,7
UF1-PA103	Resurgencia	340	167	17,3
UF1-PA104	Interflujo	25	125	17
UF1-PA105	Resurgencia	32	17	12,8
UF1-PA106	Interflujo	52	128	17,3

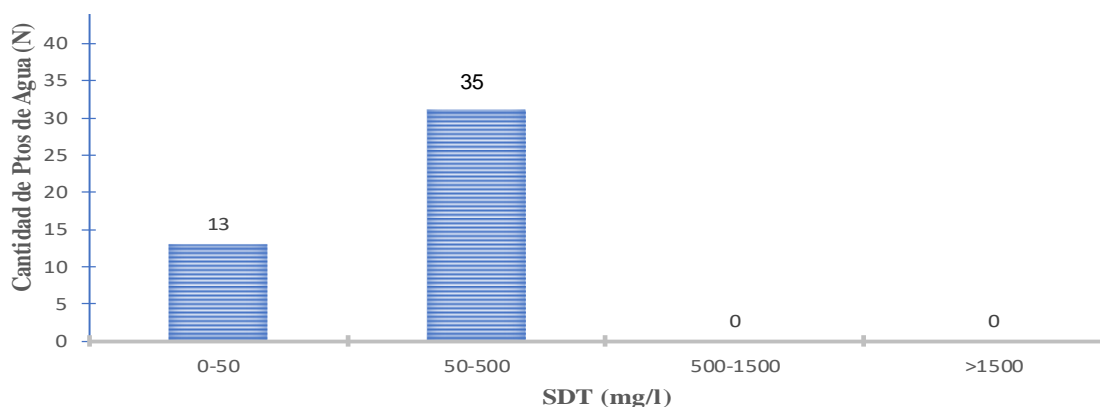
Fuente: Geodata, 2018.

Figura 5-2.17. Distribución de la conductividad en todos los puntos censados.



Fuente: Geodata, 2018.

Figura 5-2.18. Distribución de los STD en todos los puntos censados.



Fuente: Geodata, 2018.

De los 48 puntos de agua reportados en la

Figura 5-2.17 y Figura 5-2.18 se destaca lo siguiente:

- 38 puntos de agua que representan el 80% del total de puntos muestreados, presentan valores de conductividad comprendidos entre 0 y 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponde a una mineralización total inferior a 250 mg/L .
- 10 puntos de agua restantes que representan el 20% del total de puntos muestreados, presentan valores de conductividad comprendidos entre 500 y 890 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponden a una mineralización total comprendida entre 250 mg/L y 440 mg/L .

Existen diferentes clasificaciones del agua en función de su mineralización total. Una de estas, aplicada al agua potable y mineral en Europa², identifica cuatro categorías:

- | | |
|--|--------------------------------|
| - STD $\leq 50 \text{ mg}/\text{l}$ | Agua poco mineralizada |
| - STD $< 50 \text{ y } \leq 500 \text{ mg}/\text{l}$ | Agua mineral |
| - STD $< 500 \text{ y } \leq 1500 \text{ mg}/\text{l}$ | Agua medianamente mineralizada |
| - STD $> 1500 \text{ mg}/\text{l}$ | Agua rica en sales minerales |

Bajo esta clasificación, el agua muestreada en los 48 puntos de agua naturales censados se ubica en los siguientes rangos (ver Figura 5-2.17):

- 13 puntos de agua que representan el 30% del total de puntos muestreados, presentan valores de STD comprendidos entre 0 y 50 mg/l .
- Los 35 puntos de agua restantes que representan el 70% del total de puntos muestreados, presentan valores de STD comprendidos entre 50 mg/l y 440 mg/l .

² Appelo & Postma, 2006.

Lo anterior indica que la totalidad del agua muestreada durante el inventario corresponde a agua mineral a poco mineralizada (100% del total).

Esta baja conductividad y mineralización es un indicativo adicional de la estrecha correlación entre los puntos de agua con la recarga directa del agua de lluvia, evidenciando flujos en su mayoría subsuperficiales de trayectorias cortas.

Existen 10 puntos de agua (UF1-P06, UF1-P12, UF1-P13, UF1-P21, UF1-P23, UF1-P24, UF1-P27, UF1-P36, UF1-P41, UF1-P101) cuyos valores de conductividad se ubican por encima de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual puede indicar mayor tiempo de circulación, probablemente influenciados localmente por circuitos un poco más profundos o que son alimentados por sectores más amplios que permiten una mayor circulación en los depósitos cuaternarios, generando un enriquecimiento de aniones/cationes a través de rocas más solubles como p.e. calizas meteorizadas, sin descartar la contribución de insumos utilizados en la agroindustria frecuente en la región. En este caso en particular se puede estar ante la presencia de flujos mixtos donde la mayor parte de alimentación del punto se atribuye a flujos subsuperficiales.

5.1.8.5 Caracterización Hidrogeoquímica del agua muestreada

La red de muestreo hidrogeoquímico, de carácter esencialmente hidrogeológico, tiene como objeto caracterizar químicamente el agua presente en los puntos de agua censados en la zona de influencia de la UF1, de acuerdo con los parámetros relacionados en la Tabla 5 de la resolución 751 de marzo del 2015. Esta actividad representa un dato útil para la definición del modelo hidrogeológico conceptual.

De los 48 puntos de agua censados durante el inventario entre los meses de noviembre y diciembre del 2017, fueron seleccionados Diecinueve (19) puntos (Figura 5-2.19), de los cuales 11 fueron agregados recientemente como información adicional según solicitud de la autoridad ambiental ANLA (UF1-PA19, UF1-PA11, UF1-PA22, UF1-PA23, UF1-PA101, UF1-PA27, UF1-PA24, UF1-PA14, UF1-PA21, UF1-PA36, UF1-S15-PZ3).

Desde la perspectiva hidrogeológica, estos puntos satisfacen los requerimientos hechos de acuerdo con los criterios enumerados en el parágrafo siguiente.

El protocolo de muestreo y análisis satisface lo establecido por el IDEAM para este tipo de agua, como explícitamente ha sido requerido en los Términos de Referencia. Los análisis fueron llevados a cabo por el laboratorio CIMA (Corporación Integral del Medio Ambiente).

5.1.8.5.1 Criterios para la selección de los puntos de agua

Entre los puntos de agua identificados durante el inventario fueron muestreados ocho (8) puntos, que se consideran representativos para la definición de una red de muestreo y monitoreo hidroquímico de particular interés hidrogeológico.

Los criterios utilizados para la selección de los puntos antes citados son de naturaleza hidrogeológica y se relacionan a continuación:

- Puntos de agua localizados en correspondencia con los litotipos más representativos de la zona. Los cuales han sido relacionados en el parágrafo 5.1.8.6.1 del presente informe.
- Puntos de agua más mineralizados y/o caracterizados por caudales mayores.
- Puntos de agua distribuidos especialmente a lo largo del trazado vial proyectado.
- Puntos de agua mayormente utilizados por la comunidad.

5.1.8.5.2 Puntos de agua seleccionados

Aplicando los criterios antes indicados fueron seleccionados Diecinueve (19) puntos de agua, los cuales se resumen en la Tabla 5-2.6 y Figura 5-2.19.

5.1.8.5.3 Parámetros analizados

En atención a la resolución 751 de marzo de 2015 y con especial énfasis en aquellos datos de interés hidrogeológico se relacionan a continuación los parámetros que fueron muestreados en cada uno de los Diecinueve (19) puntos seleccionados (Tabla 5-2.8).

Con el objeto de guardar coherencia en la identificación del punto de muestreo, en la Tabla 5-2.7 se incluye la lista de equivalencias entre el código de laboratorio y los distintos nombres genéricos dados a los puntos de agua muestreados:

Tabla 5-2.6. Puntos de agua seleccionados para muestreo y análisis hidrogeoquímico en la UF1.

ID	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Físico-químicos				Redox-Eh/
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)	
UF1-PA02	Manantial	Túnel	1158098	1308642	2420	Depósitos coluviales sobre Fm Girón	nov-17	0,221	7,9 7	390	19,3	190	124
UF1-PA05	Interflujo		1158208	1308883	2442	Depósitos coluviales sobre Fm Tibú-Mercedes	nov-17	0,157	7,1 4	150	15,7	70	318
UF1-PA07	Manantial		1158323	1309304	2568	Depósitos coluvialuvial sobre Fm Aguardiente	nov-17	0,313	7,4 6	163	16,9	82	189
UF1-PA09	Resurgencia		1158987	1309630	2337	Depósitos coluviales sobre Fm Capacho	nov-17	2,211	5,9 6	45	18,7	22	289
UF1-PA10	Interflujo		1158862	1309767	2372		nov-17	0,148	7,1 6	136	16,2	72	64
UF1-PA11	Interflujo	Vía a cielo abierto	1159212	1309611	2287		nov-17	0,047	7,2 7	340	19,8	170	-
UF1-PA13	Resurgencia		1159760	1308981	2238	Formación Aguardiente y Depósitos coluviales	nov-17	0,041	7,8 5	570	25,1	280	184
UF1-PA14	Interflujo		1159716	1308814	2258		dic-17	0,002	7,5 3	380	19	150	-
UF1-PA17	Resurgencia		1159404	1308450	2317		nov-17	0,405	7,3 7	20	16,4	10	284
UF1-PA18	Interflujo		1159478	1308071	2270	Formación Aguardiente y Depósitos coluviales	nov-17	0,12	7,3 9	250	19,3	130	200
UF1-PA19	Interflujo	Túnel	1159096	1309390	2401	Depósitos coluviales sobre Fm Aguardiente	nov-17	0,085	4,5 5	33	15,7	10	-
UF1-PA21	Resurgencia	Vía a cielo abierto	1159616	1308603	2250	Fm Capacho	abr-18	0,265	7,2 7	530	17,5	270	-
UF1-PA22	Interflujo		1159379	1309509	2306	Depósitos coluviales sobre Fm Capacho	abr-18	0,077	5,8 2	180	20,3	90	-

ID	Tipo de Punto	Ubicación Obra	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Geología	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Físico-químicos				Redox-Eh/
			E	N	Elev				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)	
UF1-PA23	Interflujo		1159561	1309195	2312	Fm Capacho	abr-18	0,219	6,8 6	890	17	440	-
UF1-PA24	Resurgencia		1159722	1309169	2225	Depósitos coluviales sobre Fm Capacho	abr-18	0,903	7,5 2	720	17	360	-
UF1-PA27	Resurgencia		1159737	1309074	2226		may-jun/18	0,3	7,8 4	814	19,7	424	-
UF1-PA36	Interflujo		1159934	1308255	2137		may-jun/18	0,092	7,1 2	592	16	214	-
UF1-PA101	Resurgencia		1159601	1308997	2285		dic-18	-	7,2 2	530	14,3	280	-
UF1-S15-PZ37	Piezometro	Túnel	1159040	1309470	2373	Fm Capacho	dic-18	-	7,4 3	380	19	230	-

Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.7. Equivalencias de nomenclaturas de puntos en análisis de laboratorio

Código Laboratorio	ID Punto Hidrogeológico	Tipo de Punto	Otros códigos relacionados
26495	UF1-PA02	Manantial	MA-03
26494	UF1-PA05	Interflujo	MA-06
26493	UF1-PA07	Manantial	MA-08
26001	UF1-PA09	Resurgencia	MA-08B
26497	UF1-PA10	Interflujo	MA-09
44290	UF1-PA11	Interflujo	UF1-PA11
26496	UF1-PA13	Resurgencia	MA-12
44297	UF1-PA14	Interflujo	UF1-PA14
26846	UF1-PA17	Resurgencia	MA-15B

Código Laboratorio	ID Punto Hidrogeológico	Tipo de Punto	Otros códigos relacionados
26498	UF1-PA18	Interflujo	MA-16
44289	UF1-PA19	Interflujo	UF1-PA19
44298	UF1-PA21	Resurgencia	UF1-PA21
44291	UF1-PA22	Interflujo	UF1-PA22
44292	UF1-PA23	Interflujo	UF1-PA23
44295	UF1-PA24	Resurgencia	UF1-PA24
44294	UF1-PA27	Resurgencia	UF1-PA27
44299	UF1-PA36	Interflujo	UF1-PA36
44293	UF1-PA101	Resurgencia	UF1-PA101
44300	UF1-S15-PZ37	Piezometro	UF1-S15-PZ37

Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.8. Parámetros hidrogeoquímicos medidos en los puntos de agua seleccionados en el área de influencia de la UF1, de acuerdo con la resolución 751 de marzo del 2015.

PARTE1:

Parámetro	Método	Límite cuantificación	Unidades	UF1-PA07	UF1-PA05	UF1-PA02	UF1-PA13	UF1-PA10	UF1-PA18	UF1-PA17	UF1-PA09	UF1-PA19	UF1-PA11
				26493	26494	26495	26496	26497	26498	26846	26001	44289	44290
Fecha				8/12/2017	8/12/2017	8/12/2017	8/12/2017	5/12/2017	5/12/2017	11/12/2017	28/11/2017	8/12/2018	8/12/2018
Hora				8:00	10:00	12:00	13:00	9:00	13:00	10:00	7:30	10:15	12:15
T° Ambiente			° C	21,8	23,2	24,1	19,4	23,2	22,3	18,6	15,3	28,5	26,1
T° Muestra			° C	13,53	14,58	16,35	15,09	15,79	17,57	16,06	14,9	15,8	16
pH			Unidades	6,5	7,66	7,36	7,9	7,79	7,5	8,1	6,19	4,35	6,73
Conductividad			µs/cm	38	275	662	1202	271	619	36	79	60	200

Parámetro	Método	Límite cuantificación	Unidades	UF1-PA07	UF1-PA05	UF1-PA02	UF1-PA13	UF1-PA10	UF1-PA18	UF1-PA17	UF1-PA09	UF1-PA19	UF1-PA11
				26493	26494	26495	26496	26497	26498	26846	26001	44289	44290
Sólidos disueltos totales			mg/L	19	138	331	601	135	309	18	40	20	90
Sólidos sedimentables			mL/L	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	7	-0,1	-0,1	0,1	0,5
Oxígeno disuelto			mg/L	1,35	1,19	1,19	1,76	1,65	1,33	1,3	1,53	N/A	N/A
Acidez	SM 2310 B	5	mg CaCO3/L	14	6	12	13	7	10	6	<5	39	9
Alcalinidad Total	SM 2320 B	4	mg/L CaCO3	<4	8	62	76	24	60	5	<4	<5	67
Aluminio Total	SM 3030 E 3111 D	0,3	mg Al/L	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	0,3	1,2	<0,3	<0,3	N/A	N/A
Arsénico Total	SM 3030 K - EPA 200-9 - ICP/MS	0,0045	mg Metal/L	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,005	<0,005
Bario Total	SM 3030 E 3111 D	0,1	mg Ba/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Bicarbonatos	SM 2320 B	10	mg CaCO3/L	<10	8	62	76	24	60	<10	<10	N/A	N/A
Cadmio Total	SM 3030 E, 3111 B	0,005	mg Cd/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	<0,005	<0,005
Calcio Total	SM 3030 E, 3111 B	0,1	mg Ca/L	1,2	21,1	72,4	140,4	23,8	57,6	1,3	2,8	N/A	N/A
Cloruros	SM 4500 - CL C	5	mg Cl-/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	N/A	N/A
Cobre total	SM 3030 E, 3111 B	0,015	mg Cu/L	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Coliformes fecales termotolerantes	SM 9223 B Modificado	<1	NMP/100mL	<1	98	<1	17	183	98	32	127	10	630
Coliformes totales	SM 9223 B	<1	NMP/100mL	410	410	100	26030	2950	740	785	373	200	68900
Color Verdadero	SM 2120 C	4,97	UPC	15.150	<4,970	<4,970	6.390	11.720	13.510	<4,970	<4,970	<5	36
Cromo total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Cr/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
DBO5	SM 5210 B. ASTM D-888-12 Método C	10	mgO2/L	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	14	8

Parámetro	Método	Límite cuantificación	Unidades	UF1-PA07	UF1-PA05	UF1-PA02	UF1-PA13	UF1-PA10	UF1-PA18	UF1-PA17	UF1-PA09	UF1-PA19	UF1-PA11
				26493	26494	26495	26496	26497	26498	26846	26001	44289	44290
DQO	SM 5220 C	10	mgO ₂ /L	25	<10	24	21	18	40	13	<10	24	12
Dureza Calcica	SM 3500-Ca B	5	mg CaCO ₃ /L	<5	26	143	252	54	166	<5	9	<5	58
Dureza Total	SM 2340 C	5	mg CaCO ₃ /L	<5	26	146	264	60	176	<5	12	13	65
Fenoles Totales	S.M. 5530 B-S.M. 5530 D	0,002	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,1	<0,1
Fluoruros	EPA 300.0	0,05	mg F/L	<0,05	<0,05	<0,05	0,2	0,06	0,09	<0,05	<0,05	N/A	N/A
Fósforo Total	S.M 4500- P B,E	0,02	mg P/L	1,08	0,06	0,07	0,05	0,12	0,08	0,11	0,07	<0,05	0,17
Grasas y aceites	NTC 3362: 2011-12-09, Numeral 4, Método C	0,5	mg/L	1,1	<0,5	0,6	<0,5	1,6	1,2	<0,5	2,6	1,2	1,5
Hierro Total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Fe/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1,95	6,02	0,78	<0,05	N/A	N/A
Magnesio Total	SM 3030 E, 3111 B	0,3	mg Mg/L	<0,3	2,5	5,3	6,8	1,4	2,5	0,7	0,6	N/A	N/A
Manganeso Total	SM 3030 E, 3111 B	0,03	mg Mn/L	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,09	0,43	<0,03	<0,03	N/A	N/A
Mercurio Total	SM 3030 K - EPA 200.8 - ICP/MS	0,0006	mg Metal/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0005	<0,0005
Molibdeno Total	SM 3030 E 3111 D	0,2	mg Mo/L	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	N/A	N/A
Nitratos	J. Rodier, 9 na Edición, 2011	0,3	mg NO ₂ ⁻ -N/L	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	N/A	N/A
Nitritos	SM 4500 NO ₂ - B	0,003	mg NO ₃ ⁻ -N/L	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,003	N/A	N/A
Nitrógeno total Kjeldhal	SM 4500-Norg C-4500NH ₃ B,C	2	mg N/L	<2	<2	2	<2	<2	<2	<2	<2	3	2
Níquel Total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Ni/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ortofosfatos	SM 4500-P E	0,06	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	N/A	N/A

Parámetro	Método	Límite cuantificación	Unidades	UF1-PA07	UF1-PA05	UF1-PA02	UF1-PA13	UF1-PA10	UF1-PA18	UF1-PA17	UF1-PA09	UF1-PA19	UF1-PA11
				26493	26494	26495	26496	26497	26498	26846	26001	44289	44290
Plata Total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Ag/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Plomo Total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Pb/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Potasio Total	SM 3030 E 3500 K B	0,1	mg K/L	<0,1	0,3	0,4	0,7	1,2	1,2	0,2	0,4	N/A	N/A
Selenio Total	SM 3030 K - EPA 200.8 - ICP/MS	0,0055	mg Metal/L	<0,0055	<0,0055	<0,0055	<0,0055	<0,0055	<0,0055	<0,0055	<0,0055	<0,003	<0,003
Silicio Total	SM 4500-SIO2 D AZUL DE HEROPOLI	0,175	mg/L	3,51	2,63	3,01	3,05	3,73	2,73	1,58	3,53	N/A	N/A
Sodio Total	SM 3030 E, 3500-Na B	0,2	mg Na/L	0,5	0,6	0,6	11,6	2,5	2,6	0,6	0,7	N/A	N/A
Sulfatos	SM 4500 SO4 - E	2	mg SO4 ²⁻ /L	5	4	20	134	8	10	<2	<2	N/A	N/A
Sólidos Suspendidos Totales	SM 2540 D	5	mg/L	<5	<5	<5	<5	139	36	4	<5	<15	18
Turbiedad	SM 2130 B	0,3	NTU	0,5	0,4	<0,3	0,6	83,2	20,1	2,3	1	29	25
Zinc Total	SM 3030 E, 3111 B	0,01	mg Zn/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,02	<0,02

Fuente: Geodata, 2018

PARTE 2:

Parámetro	Método	Límite cuantificación	Unidades	UF1-PA22	UF1-PA23	UF1-PA101	UF1-PA27	UF1-PA24	UF1-PA14	UF1-PA21	UF1-PA36	UF1-S15-PZ3
				44291	44292	44293	44294	44295	44297	44298	44299	44300
Fecha				8/12/2018	8/12/2018	8/12/2018	9/12/2018	9/12/2018	9/12/2018	9/12/2018	9/12/2018	8/12/2018
Hora				13:30	16:30	18:00	8:15	10:00	12:15	13:20	15:30	9:00
T° Ambiente			° C	32,3	17,2	15,8	21,5	23,1	28,9	22,7	21,5	29
T° Muestra			° C	20,3	17	14,3	19,7	17	19	17,5	16	19
pH			Unidades	5,11	7,3	7,22	5,77	7,4	6,93	7,19	7,15	7,43

Parámetro	Método	Límite cuantificación	Unidades	UF1- PA22	UF1- PA23	UF1- PA101	UF1- PA27	UF1- PA24	UF1- PA14	UF1- PA21	UF1- PA36	UF1-S15- PZ3
				44291	44292	44293	44294	44295	44297	44298	44299	44300
Conductividad			µs/cm	220	950	530	350	630	300	500	870	380
Sólidos disueltos totales			mg/L	120	470	280	190	330	150	270	460	230
Sólidos sedimentables			mL/L	<0,01	0,3	12	8	0,2	11	0,3	0,1	0,5
Oxígeno disuelto			mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Acidez	SM 2310 B	5	mg CaCO3/L	37	13	16	37	16	21	8	14	5
Alcalinidad Total	SM 2320 B	4	mg/L CaCO3	<5	241	214	9	263	136	208	212	134
Aluminio Total	SM 3030 E 3111 D	0,3	mg Al/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Arsénico Total	SM 3030 K - EPA 200-9 - ICP/MS	0,0045	mg Metal/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Bario Total	SM 3030 E 3111 D	0,1	mg Ba/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Bicarbonatos	SM 2320 B	10	mg CaCO3/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cadmio Total	SM 3030 E, 3111 B	0,005	mg Cd/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,012	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Calcio Total	SM 3030 E, 3111 B	0,1	mg Ca/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cloruros	SM 4500 - CL C	5	mg Cl-/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cobre total	SM 3030 E, 3111 B	0,015	mg Cu/L	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	0,021	<0,015	0,042	<0,015	<0,015
Coliformes fecales termotolerantes	SM 9223 B Modificado	<1	NMP/100mL	12	5	2603	52	2603	410	10	20	9208
Coliformes totales	SM 9223 B	<1	NMP/100mL	86640	3990	198630	1210	2820	12200	12910	1610	241960
Color Verdadero	SM 2120 C	4,97	UPC	<5	<5	31	66	7	26	<5	<5	<5
Cromo total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Cr/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
DBO5	SM 5210 B. ASTM D-888-12 Método C	10	mgO2/L	<2	7	11	16	4	5	2	2	5
DQO	SM 5220 C	10	mgO2/L	<10	12	25	25	<10	10	<10	<10	<10
Dureza Calcica	SM 3500-Ca B	5	mg CaCO3/L	58	437	230	17	327	127	111	245	141
Dureza Total	SM 2340 C	5	mg CaCO3/L	77	800	279	27	332	147	241	331	142

Parámetro	Método	Límite cuantificación	Unidades	UF1-PA22	UF1-PA23	UF1-PA101	UF1-PA27	UF1-PA24	UF1-PA14	UF1-PA21	UF1-PA36	UF1-S15-PZ3
				44291	44292	44293	44294	44295	44297	44298	44299	44300
Fenoles Totales	S.M. 5530 B-S.M. 5530 D	0,002	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Fluoruros	EPA 300.0	0,05	mg FI/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Fósforo Total	S.M 4500- P B,E	0,02	mg P/L	<0,05	<0,05	1,46	<0,05	0,17	0,28	<0,05	<0,05	<0,05
Grasas y aceites	NTC 3362: 2011-12-09, Numeral 4, Método C	0,5	mg/L	<1,0	1,4	4,3	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	3,6
Hierro Total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Fe/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Magnesio Total	SM 3030 E, 3111 B	0,3	mg Mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Manganeso Total	SM 3030 E, 3111 B	0,03	mg Mn/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Mercurio Total	SM 3030 K - EPA 200.8 - ICP/MS	0,0006	mg Metal/L	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0007	<0,0005
Molibdeno Total	SM 3030 E 3111 D	0,2	mg Mo/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Nitratos	J. Rodier, 9 na Edición, 2011	0,3	mg NO ₂ ⁻ -N/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Nitritos	SM 4500 NO ₂ - B	0,003	mg NO ₃ ⁻ -N/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Nitrógeno total Kjeldhal	SM 4500-Norg C-4500NH ₃ B,C	2	mg N/L	<2	2	<2	3	2	<2	<2	<2	<2
Níquel Total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Ni/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ortofosfatos	SM 4500-P E	0,06	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Plata Total	SM 3030 E, 3111 B	0,05	mg Ag/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Plomo Total	SM 3030 E. 3111 B	0,05	mg Pb/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Potasio Total	SM 3030 E 3500 K B	0,1	mg K/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Selenio Total	SM 3030 K - EPA 200.8 - ICP/MS	0,0055	mg Metal/L	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Silicio Total	SM 4500-SIO ₂ D AZUL DE HEROPOLI	0,175	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

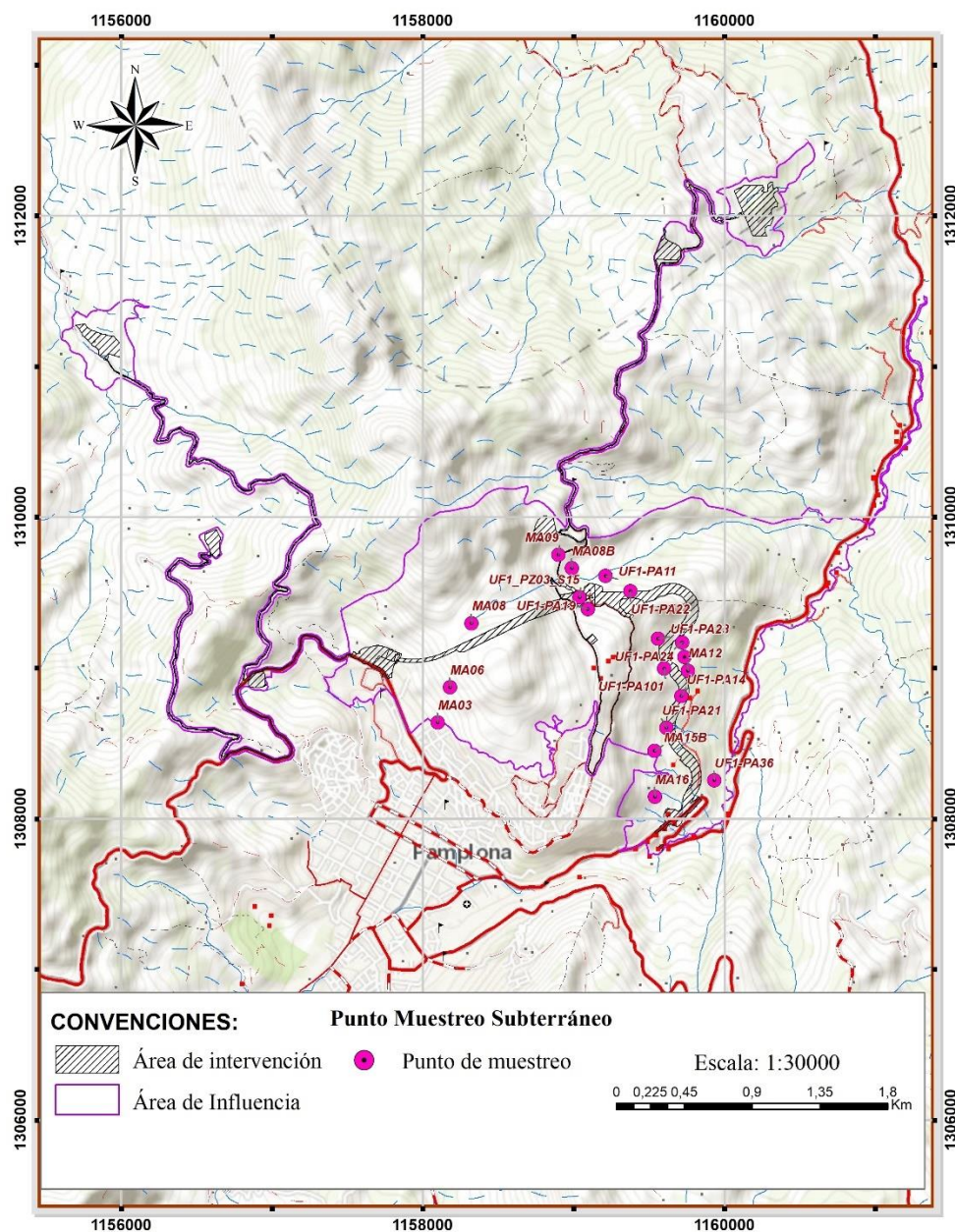
Parámetro	Método	Límite cuantificación	Unidades	UF1-PA22	UF1-PA23	UF1-PA101	UF1-PA27	UF1-PA24	UF1-PA14	UF1-PA21	UF1-PA36	UF1-S15-PZ3
				44291	44292	44293	44294	44295	44297	44298	44299	44300
Sodio Total	SM 3030 E, 3500-Na B	0,2	mg Na/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Sulfatos	SM 4500 SO4 - E	2	mg SO4 ²⁻ /L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Sólidos Suspendidos Totales	SM 2540 D	5	mg/L	<15	16	679	<15	<15	256	19	<15	48
Turbiedad	SM 2130 B	0,3	NTU	6,1	5,3	900	1,1	2,1	200	6,7	0,5	27
Zinc Total	SM 3030 E, 3111 B	0,01	mg Zn/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,29	<0,02	0,34	<0,02	<0,02

Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.5.4 Clasificación Hidrogeoquímica

En el siguiente capítulo se describen las características hidrogeoquímicas de Diecinueve (19) puntos de agua seleccionados en el área de influencia de la UF1, localizados al norte y noreste de la ciudad de Pamplona (Figura 5-2.19).

Figura 5-2.19. Ubicación del muestreo hidroquímico de la UF1



Fuente: Geodata, 2018

Las formaciones donde surgen los Diecinueve (19) puntos de agua estudiados están caracterizadas por litologías que van desde Areniscas de grano fino, lutitas, rocas calizas y conglomerados, dentro de los cuales es posible encontrar números minerales (feldespatos, carbonatos, silicatos entre otros) de fácil disolución por el flujo de las aguas que circulan en el subsuelo. Entre los elementos más importantes para la clasificación de las aguas que se pueden encontrar en estas litologías están: el Ca, Na, Mg, Al, K, Fe, Cl, SO₄ y HCO₃.

El flujo subsuperficial y subterráneo que atraviesa las formaciones geológicas conocidas como Aguardiente, Capacho, Tibú-Mercedes y algunos depósitos coluviales, es el que controla la hidrogeoquímica de los puntos de agua analizados, que en general están caracterizados por la presencia de niveles de calizas, que probablemente influencia la presencia de Ca y carbonatos.

En los análisis presentados en este capítulo se propone una clasificación mediante diferentes diagramas (Piper, Schoeller e Stiff), para los ocho (8) puntos que son representativos de los Diecinueve (19) caracterizados, lo cual permite definir una caracterización hidrogeoquímica inicial de la zona de estudio para el periodo noviembre/diciembre 2017.

La interacción agua-roca determina la disolución de minerales y la carga iónica del agua, que puede ser estudiada y clasificada con base en sus fases químicas, utilizando los mencionados diagramas geoquímicos de Piper, Shoeller y Stiff. Adicionalmente, se utiliza el método del Índice de Saturación (*saturation index*) el cual es útil para determinar si el agua se encuentra saturada, insaturada, o sobresaturada con respecto a un mineral específico.

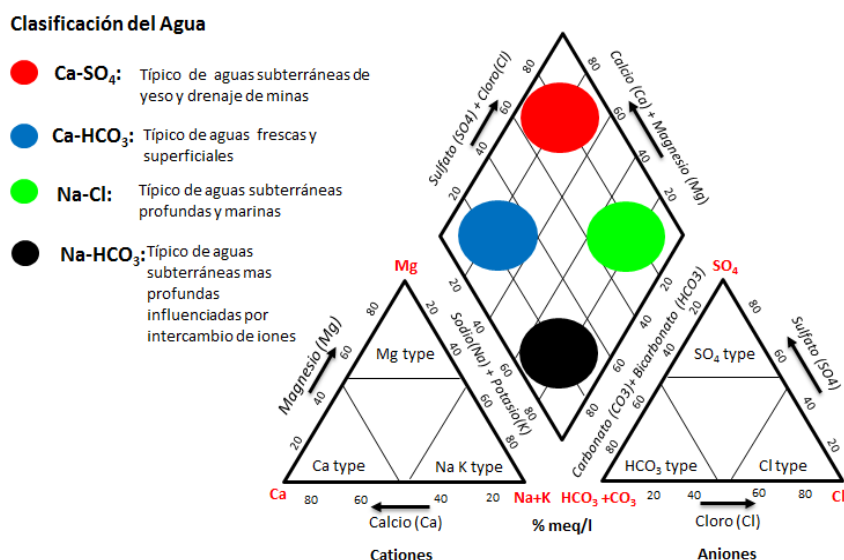
El diagrama de Piper está conformado por un rombo en cuyos extremos inferiores se localizan dos triángulos equiláteros, uno para los cationes y uno para los aniones. La concentración se expresa en meq/l. En los dos triángulos, la posición del punto se localiza teniendo en cuenta que cada lado se subdivide en 100 partes. En el esquema (rombo), el punto representativo de todo el análisis se sitúa en la intersección de la recta paralela al lado Mg²⁺ (pasando por el punto representativo de los cationes), con aquella paralela al lado SO₄²⁻ (pasando por el punto representativo de los aniones). Como se muestra en la Figura 5-2.20 se representan las características hidrogeoquímicas de los puntos de agua según su posición espacial dentro del rombo superior.

El diagrama de Shoeller se compone de 7 escalas verticales logarítmicas, equidistantes entre sí, que representan la concentración de los aniones principales (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺++K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻), más uno extra, en este caso relacionado con los STD (sólidos totales disueltos) expresados en meq/l. La ventaja de este gráfico es que a diferencia del diagrama de Piper, se conservan los valores absolutos de la concentración de los iones individuales. Esto permite distinguir el agua de baja mineralización de aquella más mineralizada. La pendiente de cada segmento que une los puntos representativos de dos iones diferentes representa la relación característica entre los iones mismos; por lo tanto, relaciones iguales implican la existencia de segmentos paralelos o sub paralelos, mientras que segmentos con pendientes diferentes o invertidas indican que el agua tiene características hidrogeoquímicas diferentes.

El diagrama de Stiff está constituido por el diseño en meq/L, de tres o más aniones y cationes, los cuales pueden ser trazados para evaluar los cambios de la calidad del agua, en un lugar durante el tiempo: También pueden ser útiles para evaluar el cambio de la calidad del agua que fluye a través de una unidad geológica diferente, o para evaluar diferentes condiciones geoquímicas del subsuelo.

Estos tres tipos de representación de las ocho fuentes estudiadas son útiles para clasificar el agua con base en sus componentes principales. En la Figura 5-2.20 se describen los tipos de aguas que se pueden discriminar según el diagrama de Piper.

Figura 5-2.20. Clasificación química de los tipos de agua en el diagrama de Piper.

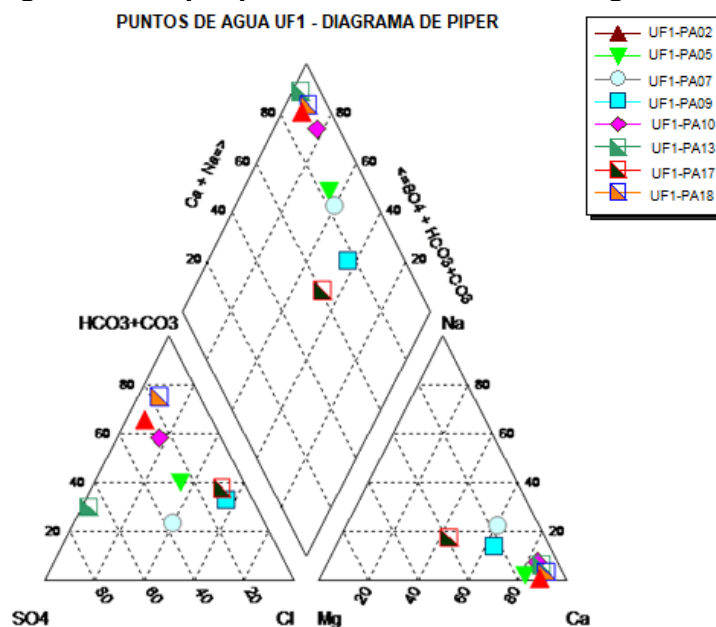


Fuente: Geodata, 2018

La Figura 5-2.21 muestra los resultados de los análisis de las ocho fuentes disponibles, de las cuales resultan claramente dos facies dominantes: Ca-Mg-SO₄ y Ca-Mg-HCO₃-Cl. Esta clasificación según la distinción mostrada en la Figura 5-2.20, indicarían aguas que de una parte provienen de recargas subsuperficiales, influenciadas por la degradación de minerales del yeso, y por otra parte demuestran una tendencia de aguas subterráneas un poco más profundas pero que se ven influenciadas por aguas ricas en Ca.

Para simplificar la clasificación grafica de los puntos de agua, estos han sido muestreados en dos zonas del área de la UF-1, las muestras que se tomaron cerca a la traza del túnel y las muestras a cielo abierto. El primer caso corresponde a los puntos de agua ubicados cerca al túnel (UF1-P02, UF1-P05, UF1-P07, UF1-P09, UF1-P10), mientras que el segundo grupo, se representa por los cuadrados con la división a dos colores (UF1-P13, UF1-P17, UF1-P18). Las bajas concentraciones de Cl influyen el comportamiento espacial dentro del gráfico, de hecho, todas las muestras resultaron con concentraciones menores a 5mg/L. esta característica es típica de aguas que ha tenido un tiempo de circulación relativamente breve.

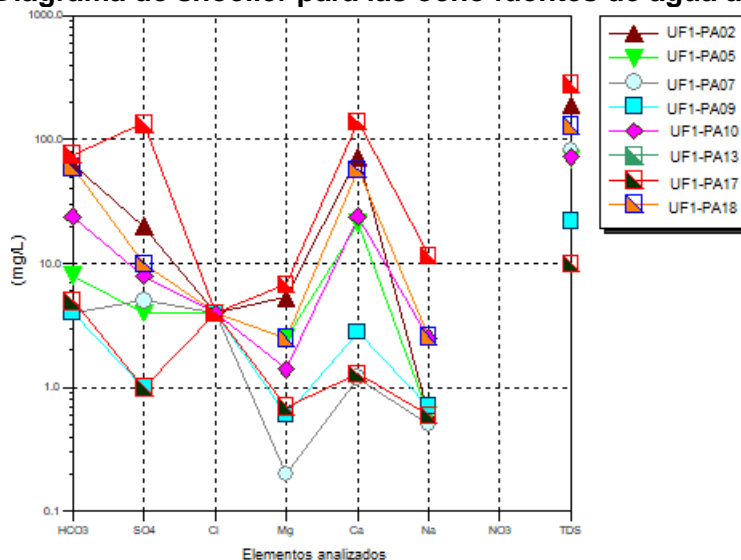
Figura 5-2.21. Diagrama de Piper para las ocho fuentes de agua analizadas



Fuente: Geodata, 2018

En la Figura 5-2.22 se muestra el diagrama de Shoeller para las ocho fuentes de agua analizadas, se puede observar como la mayor parte de las muestras presentan una gran variabilidad en la concentración del Ca, Na, HCO₃ y SO₄ y Mg. Se evidencia también las concentraciones bajas de Cl, que indicarían una relativa corta circulación y aguas subsuperficiales.

Figura 5-2.22. Diagrama de shoeller para las ocho fuentes de agua analizadas



Fuente: Geodata, 2018

Los puntos de agua observados en la zona del túnel (UF1-PA02, UF1-PA05, UF1-PA07, UF1-PA09, UF1-PA10), presentan una gran variedad de concentraciones en casi todos los elementos descritos, indicando una circulación muy variable influenciada por flujos que podría representar recorridos a lo largo de las formaciones geológicas presentes (Ortoneis, Fm Girón, Fm Aguardiente, Fm Tibú-Mercedes, Fm Capachos, depósitos cuaternarios), así como a través de las fracturas, fallas y posibles elementos estructurales que permiten una rápida mezcla entre diferentes acuíferos.

La nula concentración del NO_3 expuesta en la Figura 5-2.22, indica que las ocho fuentes no han sido afectadas por contaminación antrópica, pues la mayor de las concentraciones calculada no supera valores de 5.0 mg/L, la cual respeta los valores límites propuestos por la comunidad Europea para las aguas de consumo humano (Directiva 2000/60/EU). En contraposición a este comportamiento las concentraciones observadas de los SO_4 (de 1 a 108 mg/L) y del Ca (de 1.2 a 140 mg/L), indicarían que la diversidad hidrogeoquímica puede ser causada por minerales asociados a los sulfatos del Ca presente dentro las formaciones aflorantes.

En la Tabla 5-2.6 se exponen los valores de STD (Sólidos Totales Disueltos) calculados para los puntos de agua analizados, la mayoría de las muestras demuestran concentraciones menores a 280 mg/l. Según los límites propuestos por la comunidad europea (Directiva 2000/60/EU), los valores de STD inferiores a 50 mg/l corresponde a aguas poco mineralizadas, mientras que valores de STD comprendido entre 50 y 500 mg/l corresponden a aguas minerales. Adoptando esta clasificación resulta que seis de las ocho muestras son aguas minerales y los dos restantes corresponderían con agua poco mineralizadas.

- **Facies hidrogeoquímicas**

De los resultados obtenidos y una vez analizadas las facies hidrogeoquímicas de los puntos de agua se puede decir que los aniones que controlan principalmente las aguas dentro de los acuíferos pertenecen a Ca-Mg-HCO_3 y Ca-HCO_3 con algunas variaciones hacia el Mg y los SO_4 (ver Tabla 5-2.9.).

Tabla 5-2.9. Facies hidrogeoquímicas de los puntos de agua analizados.

Puntos de Agua	Facies hidrogeoquímica
UF1-PA02	Ca-HCO ₃
UF1-PA05	Ca-Mg
UF1-PA07	Ca-Cl-SO ₄ -HCO ₃
UF1-PA09	Ca-Mg-Cl-HCO ₃
UF1-PA10	Ca-HCO ₃
UF1-PA13	Ca-SO ₄
UF1-PA17	Ca-Mg-Cl-HCO ₃
UF1-PA18	Ca-HCO ₃

Fuente: Geodata, 2018

Para poder establecer variaciones temporales se hace necesario un muestreo temporal, que permita analizar el comportamiento de las facies durante periodos lluviosos y secos y

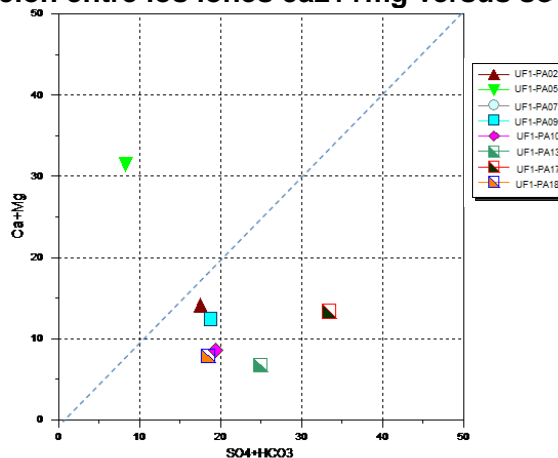
así poder corroborar posibles variaciones hidrogeoquímicas dentro de los acuíferos. En este estudio se evidencia únicamente una caracterización puntual relacionada específicamente con las condiciones del acuífero durante el periodo de muestreo, realizado durante los meses de noviembre a diciembre de 2017.

Para las muestras tomadas cercanas a la traza del túnel (UF1-PA02, UF1-PA05, UF1-PA07, UF1-PA09, UF1-PA10) se esperaría una mineralización mayor a los puntos de agua muestreados a cielo abierto. Esta característica validaría la hipótesis anteriormente propuesta; que el flujo subsuperficial y subterráneo está influenciado por recorridos que contribuyen no solo a crear una variedad hidrogeoquímica, sino que probablemente las condiciones estructurales de esta zona de estudio (fallas presentes), podrían generar un mayor y más rápido flujo y directamente una mezcla de diferentes circuitos subterráneos.

Algunas correlaciones estequiometrias entre los iones de los Cl con el Na, pueden ser útiles para definir si existe o no una correlación estequiometria. Si la correlación Na/Cl es mayor que 1, el origen del Na se debe a la degradación de los silicatos (Meybeck, 1987), si en cambio la relación Na/Cl está por debajo de la línea de correlación, entonces el Cl puede tener origen diferente a la degradación de los silicatos, probablemente de elementos con Cl, probablemente del Yeso presente en venas dentro de los niveles arenosos/arcillosos existentes en la Fm Aguardiente, Tibú-Mercedes y Capachos. Debido a las bajas concentraciones de Cl medidas en todas las ocho muestras, no se pueden establecer una correlación válida.

En la Figura 5-2.23, se representa la relación entre la suma de los cationes del Ca + Mg, versus la suma de los aniones del $\text{SO}_4 + \text{HCO}_3$ en términos de meq/l, la cual permite validar los procesos de degradación que están actuando en los puntos de agua al momento del muestreo. Es posible evidenciar que siete de las ocho muestras caen por debajo de la línea de correlación 1:1, indicando que el fenómeno dominante es la degradación de los silicatos, siendo más importante que la los carbonatos. Solo en la muestra UF1-PA05, es la degradación de los carbonatos el factor principal de la degradación.

Figura 5-2.23. Correlación entre los iones $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}$ versus $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3$ en meq/l.

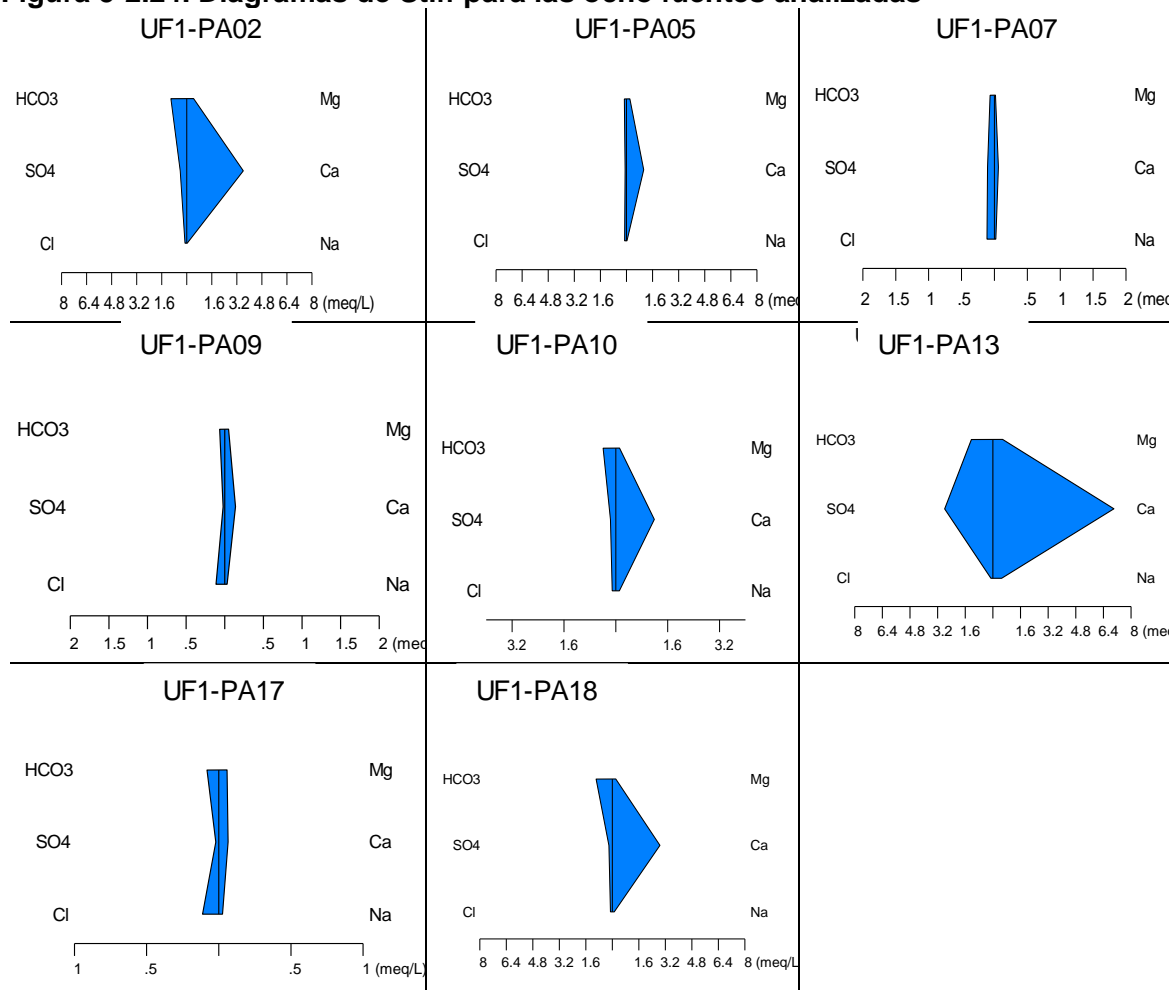


Fuente: Geodata, 2018

Este desbalance hacia el sector $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3$ podría deberse a minerales ricos en sulfatos y en iones CO_3 y a la disolución del yeso (CaSO_4), o también a la disolución de las plagioclasas y de los anfíboles, minerales presentes en las formaciones aflorantes en el área. Otro factor que puede validar la disolución dominante de los silicatos es el hecho que los valores de TDS son menores a 500mg/L.

Por último, en la Figura 5-2.24, se muestran los gráficos representativos para cada una de las ocho fuentes analizadas según el método de Stiff. Este método permite establecer fácilmente correlaciones gráficas, y de este modo crear grupos hidrogeoquímicos. De hecho, los puntos de agua UF1-P02, UF1-P05, UF1-P10, UF1-P13 y UF1-P18 parecerían pertenecer a un grupo específico, mientras el resto de los puntos presentan una geometría diferente que permitiría ponerlas en otro grupo. Este método de discriminación es útil para representar geográficamente las características hidrogeoquímicas de las fuentes, pues permite clasificar en un mapa geometrías rápidamente diferenciables y fáciles de entender.

Figura 5-2.24. Diagramas de Stiff para las ocho fuentes analizadas



Fuente: Geodata, 2018

Además de los tres métodos antes presentados, de manera solamente indicativa se menciona el índice de saturación, el cual permite definir si las muestras presentan una sobre-saturación, o están insaturados, respecto a los minerales para los cuales se han calculado (Anhidrita, Yeso, Dolomía, Calcita). Esto sirve para determinar los minerales que están influyendo principalmente en la formación de los iones en suspensión. Si los cálculos del índice de saturación demuestran un valor mayor a 1, sería probable la precipitación de uno de estos iones.

El hecho que todos los puntos de agua en este análisis preliminar de índice de saturación presentan valores negativos, menores a 0, puede tomarse a este nivel de estudio como un indicativo que las aguas no han tenido suficiente tiempo dentro del acuífero para reaccionar con este, y se pueden definir como inmaduras desde el punto de vista hidrogeoquímico. Esta característica es coherente con otros parámetros de los puntos de agua como la concentración de CL y el potencial redox, el cual indica condiciones oxidantes en todos los puntos de agua muestreados ($Eh > 0$).

- **Muestreo de puntos aleatorios por isótopos.**

Por último, se realizó la prueba de isótopos Deuterio y Oxígeno 18, en seis puntos aleatorios (UF1-PA14, UF1-PA101, UF1-PA23, UF1-PA13, UF1-PA24, UF1-PA21). Los análisis realizados se muestran en los anexos de este capítulo y evidencian la existencia de cantidades “atmosféricas” de deuterio y oxígeno 18 demostrando el poco tiempo de residencia de las aguas. Al analizar respecto a la curva meteórica aplicable se encuentra que los valores son muy cercanos a los valores determinados para las condiciones atmosféricas de la región.

5.1.8.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual UF1 (Túnel y Vía a Cielo Abierto)

5.1.8.6.1 Principales unidades geológicas y su comportamiento hidrogeológico

La mayoría de las formaciones geológicas presentes a lo largo del corredor vial en términos generales se pueden agrupar de la siguiente manera.

- **Sedimentos y rocas con porosidad primaria de limitado interés hidrogeológico:**

- Corresponden a depósitos recientes no consolidados constituidos especialmente por coluviones dispersos en las laderas (Qc), algunos depósitos aluviales circunscritos especialmente en las zonas aledañas al cauce actual del río Pamplonita (Qal) y en menor proporción a depósitos de diferente origen (Qant, Qcd, Qft, Qt). La composición dominante de los depósitos cuaternarios más representativos en la zona de estudio (Qc/Qal), es variable, generalmente constituida por granulometrías gruesas, alguna de ellas embebidas en matriz compuesta por gran cantidad de arenas y gravas, arenas arcillosas y mezcla de finos. Su comportamiento hidrogeológico más probable corresponde a acuíferos libres, discontinuos y heterogéneos de muy limitada extensión, poco productivos, de porosidad primaria y permeabilidad de media a alta.

- b) Formaciones geológicas consolidadas compuestas por secuencias de areniscas con intercalaciones menores de lutitas y limolitas (Kia, Jg, Tpb), con porosidad primaria y secundaria (doble porosidad), por lo que en términos generales la permeabilidad es baja a intermedia. Su comportamiento hidrogeológico más probable se relaciona con acuíferos semiconfinados de extensión regional y limitado interés hidrogeológico.

• **Rocas con porosidad secundaria de limitado interés hidrogeológico:**

- a) Formaciones geológicas consolidadas con presencia importante de niveles de calizas e intercalaciones menores de lutitas y areniscas (Ksl y Kitm), con porosidad secundaria dada por fracturas y/o disolución (pseudocarst), por lo que la permeabilidad dominante es, en términos generales, intermedia, siendo su comportamiento hidrogeológico más probable el de acuíferos confinados a semiconfinados de poca extensión y productividad baja a moderada.

Rocas con porosidad secundaria y primaria sin interés hidrogeológico:

- a) Formaciones geológicas consolidadas compuestas por rocas cristalinas (PDo) y rocas sedimentarias dominadas, estas últimas, por secuencias de lutitas con intercalaciones menores de calizas, limolitas y areniscas de grano fino (Ksc, Kic), por lo que la permeabilidad dominante es, en términos generales, baja a muy baja y principalmente de tipo secundario, siendo su comportamiento hidrogeológico más probable el de acuitados y/o acuícludos, con presencia eventual de flujos locales asociados a fracturas y disolución de las calizas.










En la mayor parte de la zona de influencia de la UF1 existe lo que podría llamarse un “acuífero superficial”, fracturado, discontinuo y heterogéneo de limitado interés hidrogeológico; el cual contiene una napa libre, constituido por depósitos cuaternarios y de alteración del macizo rocoso.







En el Anexo 5.1.3.3, se presenta el mapa hidrogeológico del sector en el que se ilustra la distribución de las unidades geológicas, que para fines del presente trabajo han sido consideradas como complejos hidrogeológicos, se indican las direcciones preferenciales del flujo subsuperficial y subterráneo, así como las principales zonas de recarga y descarga identificadas en la zona de influencia del proyecto. La nomenclatura utilizada en el mapa hidrogeológico sigue las recomendaciones de la International “*International Association of Hydrogeologists_ (IAH)*”³.

En la Tabla 5-2.10, se indican los principales complejos hidrogeológicos presentes en la zona de estudio, donde se indica, además, el intervalo de variación de la permeabilidad asignada a cada una de ellas a nivel regional.

³ W.F. Struckmeier and J. Margat, IAH, 1995.

Tabla 5-2.10. Complejos hidrogeológicos UF1.

DESCRIPCIÓN DE LOS COMPLEJOS HIDROGEOLÓGICOS				
SÍMBOLO	Unidad Geológica	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA	"IAH" Mapa
Qant	 Depósitos antrópicos	Se trata de depósitos mayoritariamente arcillo-limosos con algunas gravas y bloques de roca de composición variable (procedentes de la construcción de la vía) sobre suelos residuales que se sitúan a ambos lados de la vía existente. Sus espesores máximos reconocidos son del orden de 5 - 10 m.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m ² /d; S= 5.0 x 10 ⁻⁴ a 1.8 x 10 ⁻³	Qant
Qal	 Depósitos aluviales	Acumulaciones de sedimentos poco consolidados y de poco espesor que se encuentran en el curso actual de los ríos y quebradas; principalmente en el río Pamplonita, conformados por cantos, gravas, arenas, limos y arcillas de composición variada.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m ² /d; S= 5.0 x 10 ⁻⁴ a 1.8 x 10 ⁻³	Qal
Qca	 Depósitos coluvio aluviales	Ubicados dos depósitos coluvio-aluviales dentro del área de influencia de ésta unidad funcional. A lo largo de drenajes, formando un valle, desarrollados en un relieve ondulado de pendientes montañosas donde superficialmente se observan bloques de roca.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m ² /d; S= 5.0 x 10 ⁻⁴ a 1.8 x 10 ⁻³	Qca
Qc	 Depósitos coluviales	Depósitos producto de desprendimientos del terreno asociados al sistema complejo de fallas de la zona, en un relieve de montañas. Materiales sueltos de composición variable, de acuerdo al material parental. Depósitos de ladera de espesor variable, angulares, que incluye depósitos de talud, y depósitos de derrumbe. Característica general de plasticidad media, con gran cantidad de arenas y gravas, arenas arcillosas y mezclas de finos.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m ² /d; S= 5.0 x 10 ⁻⁴ a 1.8 x 10 ⁻³	Qc
Qt	 Depósitos de terraza	Sedimentos restringidos a zonas aledañas del río Pamplona, conformado por bloques, gravas, arenas y arcillas, no consolidados, depositados formando diferentes espesores en periodos actuales.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m ² /d; S= 5.0 x 10 ⁻⁴ a 1.8 x 10 ⁻³	Qt
Qft	 Depósitos fluvioaluviales	Depósitos de gravas, cantos y bloques en matriz limo-arcillosa, matriz soportados, de mediana a pobremente consolidados.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m ² /d; S= 5.0 x 10 ⁻⁴ a 1.8 x 10 ⁻³	Qft
Qcd	 Depósitos cono de deyección	Mezcla de gravas, cantos y bloques decimétricos o métricos en matriz de fracción fina, matriz soportado. Posible presencia de nivel freático de carácter estacional.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m ² /d; S= 5.0 x 10 ⁻⁴ a 1.8 x 10 ⁻³	Qcd
Tpb	 Formación Barco	Paleoceno Inferior. Conformada por intercalaciones de arenisca, shale y arcillolita.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado de baja productividad. Porosidad dominante: primaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Con posibilidad de flujos locales asociados a niveles de arenisca. capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m.	Tpb
Kscm	 Formación Colon-Mito Juan	Campaniano-Maastrichtiano. Lutitas gris oscuro a verdoso fragmentadas, con capas de limolitas con meteorización moderada.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero a acuitado. Porosidad dominante: secundaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son complejo de rocas sedimentarias que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación, de productividad muy baja. Capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m.	Kscm

DESCRIPCIÓN DE LOS COMPLEJOS HIDROGEOLÓGICOS				
SÍMBOLO	Unidad Geológica	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA	“IAH” Mapa
K2l	 Formación la Luna	Turoniano-Santoniano. Capas centimétricas de calizas y lutitas, con moderada meteorización, de color gris oscuro a claro para las calizas; y las lutitas de gris oscuro a negro, con presencia esporádica de nódulos calcáreos y algunas capas delgadas de chert.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero confinado a semiconfinado. Porosidad dominante: secundaria por fracturación/disolución (pseudokarts). Esta porosidad puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por rocas sedimentarias carbonatadas cretácicas, consolidadas de ambiente marino, de productividad moderada. Capacidad específica promedio mayor de 5,0 l/s/m.	Ksl
Kic	 Formación Capacho	Albiano Superior-Turoniano. Compuesto principalmente de lutitas gris oscuro o negro con intercalaciones de calizas fosilíferas de color gris. El área de esta unidad aflorante en la UF1, se encuentra cubierta en gran mayoría por depósitos coluviales.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero. Porosidad dominante: secundaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son comoplejo de rocas sedimentarias que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación y/o disolución (pseudokarts), de muy baja productividad. Eventual presencia de flujos locales asociados a fracturas y disolución de las calizas. Capacidad específica promedio menor de 0,05 l/s/m.	Kic
Kia	 Formación Aguadiente	Albiano Inferior y Medio. Arenisca clara y dura (competente) con algunas capas de limolitas, y meteorización baja. Hacia la zona del túnel Pamplona la unidad se observó litológicamente con predominancia arenosa a areniscas silíceas blancas a grises muy bien cementadas de grano fino a grueso y localmente conglomeráticas, en capas medias (20 a 60 cm) a gruesas (60 cm a 2 m) y localmente muy gruesas (>2 m) con estratificación plano paralela, de alta competencia. Localmente puede presentar capas de areniscas friables y contenidos de pirita. Se considera que las areniscas representan más del 75% y el 25% restante corresponde a lutitas grises con mayor incidencia en el techo de la formación.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado. Porosidad dominante: primaria y secundaria por fracturación. Esta doble porosidad puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional, de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias clásicas de edades cretácicas depositadas en ambientes marinos. Capacidad específica promedio menor de 0,05 l/s/m.	Kia
Kitm	 Formación Tibu-Mercedes	Aguadiente Superior-Turoniano Inferior. Calizas grises toseras y arenosas, con lutitas grises oscuras y algunas intercalaciones de areniscas claras. Esta unidad presenta dentro del área de influencia de la UF1 capas de lodolitas calcáreas, limosas, grises, areniscas grises y calizas grises, en capas planas a lenticulares. La parte superior está conformada por areniscas cuarzosas, grises, grano fino, en capas delgadas y medianas, con intercalaciones de lodolitas grises oscuras y negras, calcáreas y calizas grises, que son más predominantes hacia el techo de la unidad, siguiendo el tren estructural de la secuencia cretácica.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado. Porosidad dominante: secundaria por fracturación/disolución (pseudokarts), la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional, de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias carbonatadas-clásicas de edades cretácicas depositadas en ambientes marinos. Capacidad específica promedio mayor de 5,0 l/s/m.	Kit
Jg	 Formación Girón	Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Se presentan conglomerados matriz soportados con una diferencia de partículas que conforman el amazón, de color rojizo a violeta, se encuentra generando una morfología abrupta de alta montaña. La unidad sigue paralela al sistema de fallas de Pamplona y Chilaga y es altamente fracturada. La matriz es de arenita de cuarzo (con proporciones menores de plagioclasas y lílicos), media, bien seleccionada, subredondeados. El amazón está compuesto por guijos y cantos subredondeados de arenitas de cuarzo fino, con buena selección, subangular, de color violeta, y en proporciones menores guijos y cantos subredondeados de rocas ígneas y cuarzo lechoso.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado. Porosidad dominante: primaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Sistema de acuíferos discontinuos de extensión regional de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias clásicas. Capacidad específica entre 0,05 y 1 l/s/m.	Jg
Pdo	 Otonais	Neis cuarzomonzonítico y granodiorítico (origen ígneo). Dentro de la UF1 esta unidad se encuentra aflorando en una pequeña parte del extremo occidental, donde se evidenció saprolito de la misma, específicamente de color rosáceo, con abundante feldespato potásico transformándose a cadinita, observándose además mica moscovita y cuarzo. La unidad se encuentra ampliamente fracturada y muy meteorizada, dando lugar a suelos arcillosos de color amarillento.	Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero. Porosidad dominante: secundaria por fracturación, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Corresponde a rocas graníticas que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación, de muy baja productividad. Capacidad específica promedio menor de 0,05 l/s/m.	Pdo

Fuente: Geodata con base en la geología del proyecto, 2018

5.1.8.6.2 Principales zonas de recarga y descarga

Las principales áreas de recarga se identifican con zonas donde afloran las unidades con mayor potencial de infiltración, incluidos depósitos cuaternarios de cualquier tipo, zonas de mayor influencia tectónica caracterizadas por discontinuidades persistentes, zonas con pendientes moderadas y continuas, zonas con vegetación arbustiva, así como zonas donde la precipitación es mayor. La zona interceptada por el trazado vial se caracteriza a nivel regional por presentar, en términos generales, zonas con mayor capacidad de recarga ubicadas hacia la parte alta, especialmente hacia el sector de la montaña conocida como Cristo Rey, y zonas con mayor capacidad de descarga ubicada en la parte baja de las cuencas, en particular hacia el valle inferior del río Pamplonita (ver mapa hidrogeológico en Anexo 5.1.3.3).

En términos generales, las zonas donde se da el proceso de recarga, en mayor o menor grado, de acuerdo con su espesor y permeabilidad retienen el agua de lluvia permitiendo su infiltración en profundidad, para posteriormente drenarla de forma natural en el área de descarga representada especialmente por las laderas bajas del río pamplonita. Otras áreas de descarga natural menos significativas la constituyen los pequeños valles Intermontanos de las quebradas presentes en la zona, todas ellas tributarias del río Pamplonita, siendo la más representativa de ellas la Qda San Antonio, la cual recoge gran parte de las aguas subsuperficial y subterráneas que provienen del sector de Cristo Rey. Otro medio de descarga natural lo constituyen los distintos puntos presentes en la región e identificados durante el inventario (ver mapa hidrogeológico).

La principal área de recarga se ubica en la parte alta de la montaña conocida como conocida como Cristo Rey; sector donde se emplaza el túnel Pamplona. Esta zona se encuentra bisectada por una falla geológica regional que corre en dirección dominante E-W y constituye el elemento estructural más importante desde el punto de vista hidrogeológico de la zona de estudio, dado que no solamente facilita la infiltración por la depresión intermontana creada, sino que además direcciona los flujos principales en la misma dirección. Este elemento estructural a la vez que condiciona los flujos subsuperficiales y subterráneos en dirección paralela a su rumbo, al parecer actúa como barrera hidrogeológica en dirección transversa (N-S).

5.1.8.6.3 Dirección preferencial del flujo subsuperficial y subterráneo

De acuerdo con el análisis de los datos provenientes del inventario presentados en este informe, es de esperar en la zona de influencia del corredor vial una circulación poco profunda y rápida tanto del agua subsuperficial como del agua subterránea.

En consecuencia, se espera que en las zonas donde predominan las unidades geológicas dominadas por lutitas con intercalaciones de calizas, limolitas y areniscas de grano fino (Kic, Kscm, Kic y Pdo), caracterizadas por presentar permeabilidades bajas a muy bajas; la dirección dominante del flujo subsuperficial y subterráneo siga el contacto entre los depósitos cuaternarios y el basamento rocoso menos alteradas, influenciado por las pendientes moderadas de las laderas del terreno que drenan hacia los valles de los principales cursos de agua superficiales antes mencionados. Mientras que en los sectores

donde predominan las unidades geológicas más permeables y fracturadas (Tpb, Kia, Kit, Jg); es de esperar que gran parte del flujo subsuperficial y subterráneo penetre al interior de las capas de areniscas, conglomerados, calizas y siga las direcciones del buzamiento de las principales discontinuidades presentes en las mismas (ver mapa hidrogeológico en Anexo 5.1.3.3).

En relación con la circulación intermedia o mixta relacionada probablemente con algunos puntos de agua que presentan mayores conductividades y considerando el marco geológico y estructural reportado en el informe geológico, es de esperar que en las zonas de mayor fracturación, representadas por fallas y diaclasas maestras, presentes potencialmente en el macizo rocoso subyacente (muchas de ellas cubiertas por depósitos recientes), tengan lugar infiltraciones localizadas que seguirán en profundidad la posición dominante de estas discontinuidades geológicas, en dirección preferencial hacia los principales cursos de agua superficiales y cuencas superficiales vecinas que se encuentren conectadas a través de fallas, como las indicadas en el mapa geológico del sector, las cuales para efectos del presente estudio han sido consideradas como potenciales conexiones hidráulicas entre los acuíferos superficiales y aquellos más profundos. Finalmente, una vez ocurrida la saturación de la cobertura cuaternaria de los macizos rocosos, es de esperar que el flujo comience un proceso de escorrentía superficial, siguiendo la topografía dominante hasta integrarse con el sistema de drenaje.

Existen por lo menos cinco (5) fallas geológicas regionales de rumbo preferencial N-S (algunas de ellas inferidas), que segmentan la zona de estudio en por lo menos seis partes. Estas fallas regionales tienen el potencial de condicionar las direcciones de flujo subsuperficial y subterráneo a lo largo de su traza facilitando la interconexión de la zona de estudio con la zona de alta montaña ubicada más al norte.

Los análisis de los datos obtenidos durante el inventario en la mayoría de los puntos censados permiten prever una circulación dominante de carácter subsuperficial y rápida en la zona de influencia de la UF1. Con una menor incidencia de flujos mixtos o intermedios.

5.1.8.6.4 Dinámica del flujo de agua subsuperficial y subterránea

Se describe cada punto de agua censado en la zona de estudio de la UF1, tanto para el túnel como para la vía a cielo abierto. Esta descripción constituye un modelo hidrogeológico local o de detalle por cada punto censado, en el que se tienen en cuenta aspectos geológicos, geomorfológicos, estructurales, fisicoquímicos, investigaciones (tomografías eléctricas, sondeos mecánicos, piezómetros) y de cobertura vegetal para definir el punto de surgencia. La mayoría de estos aspectos se consignan en los respectivos formatos Funias y se analizan y describen en el Anexo 5.1.3.2, al cual se remite.

En capítulos sucesivos se complementa la descripción de modelo hidrogeológico conceptual para el túnel Pamplona, ver específicamente análisis de los puntos de agua censados.

5.1.8.7 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la contaminación

Para el objeto del presente proyecto, es preciso realizar un análisis de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las unidades acuíferas identificadas y descritas. La evaluación de la vulnerabilidad de estas unidades permite establecer el grado de defensa natural del acuífero ante la potencial alteración de la calidad del agua subsuperficial y subterránea, basándose en la determinación de las propiedades físicas del medio no saturado, que lo convierten en una herramienta de protección del recurso.

Con la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación antrópica, se establece la facilidad con la cual ingresan las sustancias que puedan degradar la calidad del agua subsuperficial y subterránea, mediante infiltración a través del suelo y la zona no saturada. Foster (1987), dice que la definición más confiable de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos es “la medida del grado de inaccesibilidad de los contaminantes a través de la zona no saturada de un acuífero y el grado de atenuación a la contaminación que posean las capas de ésta zona, como resultado de retención y/o reacción físico – química”.

La utilidad del mapa de vulnerabilidad a la contaminación, lo determina la escala de trabajo y la cantidad y calidad de la información. Existen varias metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación y su aplicación depende principalmente de la escala de presentación y de la información existente. Para el presente proyecto, se tuvo en cuenta la propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial del 2010, en la cual se presentan las descripciones de las principales metodologías, su utilidad y limitaciones. Las metodologías en general califican la vulnerabilidad a la contaminación mediante una escala cualitativa que generalmente va desde una vulnerabilidad muy baja o despreciable, hasta vulnerabilidad extrema. En la Tabla 5-2.11, se pueden observar las definiciones prácticas de las categorías de vulnerabilidad según el documento del Banco Mundial, 2007.

Para la presente investigación se desarrolla el método GOD, un método de puntuación en los que cada parámetro está dividido en clases a las cuales se atribuye un valor específico. A continuación, se explica en detalle la metodología GOD que se aplicará.

Tabla 5-2.11 Definición de clases de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos

CLASE DE VULNERABILIDAD	DESCRIPCIÓN
EXTREMA	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación
ALTA	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados en muchos escenarios de contaminación.
MODERADA	Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
BAJA	Sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo
DESPRECIABLE	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Fuente: Banco Mundial, 2007. Protección de la Calidad del Agua Subterránea guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales Guía Técnica parte B.

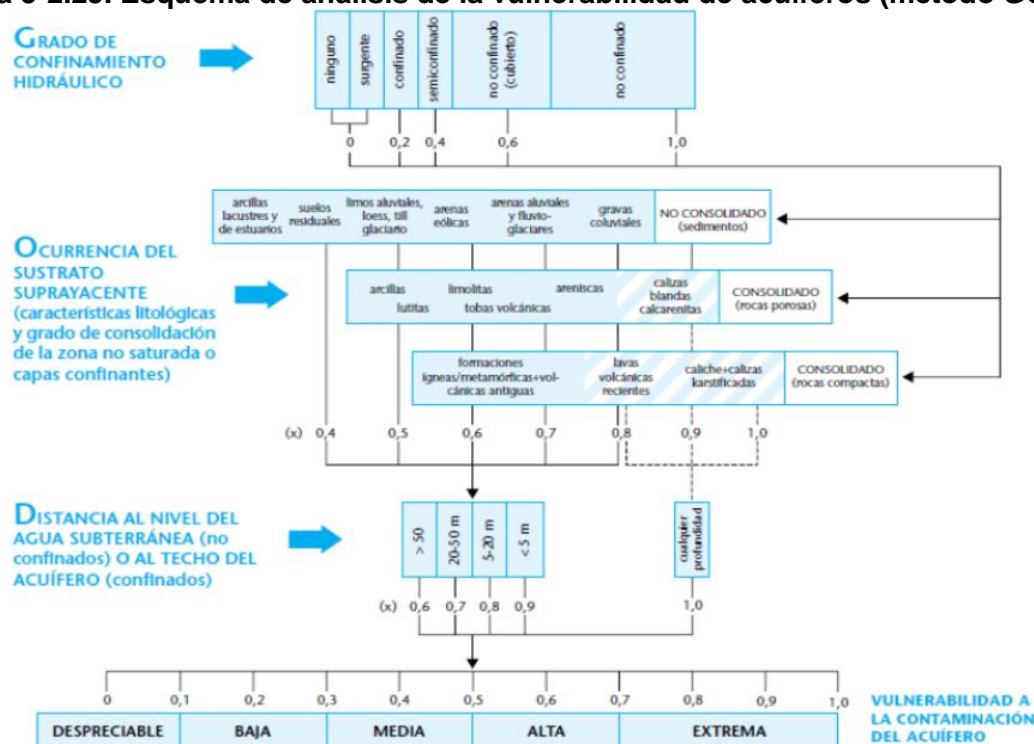
5.1.8.7.1 Metodología GOD

En Colombia según el nivel de información hidrogeológica se ha empleado el método GOD (Foster, 1987), recomendado para áreas con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de estos. Este método considera tres parámetros de evaluación: “G” para la ocurrencia del agua subsuperficial y subterránea, “O” para la condición del sustrato litológico (zona no saturada) y “D” para la profundidad del agua subsuperficial y subterránea.

La metodología GOD da un puntaje a cada variable de acuerdo con la capacidad de atenuación del suelo. 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 un índice cero “0” indica una vulnerabilidad despreciable y el índice “1” revela vulnerabilidad extrema a la contaminación (Ver Tabla 5-2.11).

Los suelos tienen un papel muy importante en la valoración de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, ya que dependiendo de sus características texturales (arcillas no expansivas o expansivas, franco, franco arcillosos a franco arenoso, arenas o gravas) y su contenido de materia orgánica, son susceptibles a la lixiviación o transporte de contaminantes. El grado de susceptibilidad de los suelos a la lixiviación de contaminantes aumenta de suelos conformados por arcillas no expansivas (menor susceptibilidad) a los suelos constituidos por gravas (mayor susceptibilidad).

Figura 5-2.25. Esquema de análisis de la vulnerabilidad de acuíferos (método GOD).



Fuente: Foster et al., 2002; Foster, 1987, modificada Min. Ambiente 2010.

La vulnerabilidad intrínseca se representa mediante un mapa temático que muestra cualitativa o cuantitativamente ciertas características de un ambiente subsuperficial, que hace susceptible de contaminación al agua subsuperficial y subterránea.

Los mapas de vulnerabilidad son útiles como herramienta de planificación, de ordenamiento territorial, de gestión del presupuesto y de educación a la comunidad. Además, permiten identificar áreas susceptibles de transporte de contaminantes, definir zonas de protección, diseñar redes de monitoreo y definir acciones en caso de emergencia hídrica.

A continuación se muestra la Metodología GOD desarrollada por Foster (1987) para evaluar el Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de los acuíferos.

5.1.8.7.1 Grado Confinamiento Hidráulico (G)

Se refiere a la condición de confinamiento del acuífero y establece las siguientes categorías: no confinado, no confinado-cubierto, semiconfinado, confinado y sin presencia de acuífero. La condición de confinamiento de los acuíferos es una función que interviene directamente en la vulnerabilidad natural del agua subsuperficial y subterránea ante una contaminación potencial, ya que en general en acuíferos confinados o cautivos con un espesor considerable de capa confinante, el acceso de contaminantes es más restringido.

La valoración de este parámetro tiene como soporte principal el Mapa Hidrogeológico del área de estudio y la información litológica disponible para algunos pozos y piezómetros del área, como también información de sondeos eléctricos verticales y estudios de suelos. En particular la información aportada por 33 perforaciones realizadas tanto para la vía a cielo abierto como para el túnel (ver Anexo 5.1.3.6).

Teniendo en cuenta las condiciones litológicas más someras, dominantes en el área de influencia de la UF1, puestas en evidencia por las perforaciones mecánicas realizadas, se dan valores a las unidades hidrogeológicas en la Tabla 5-2.12 presentada a continuación.

Tabla 5-2.12 Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas según grado de confinamiento.

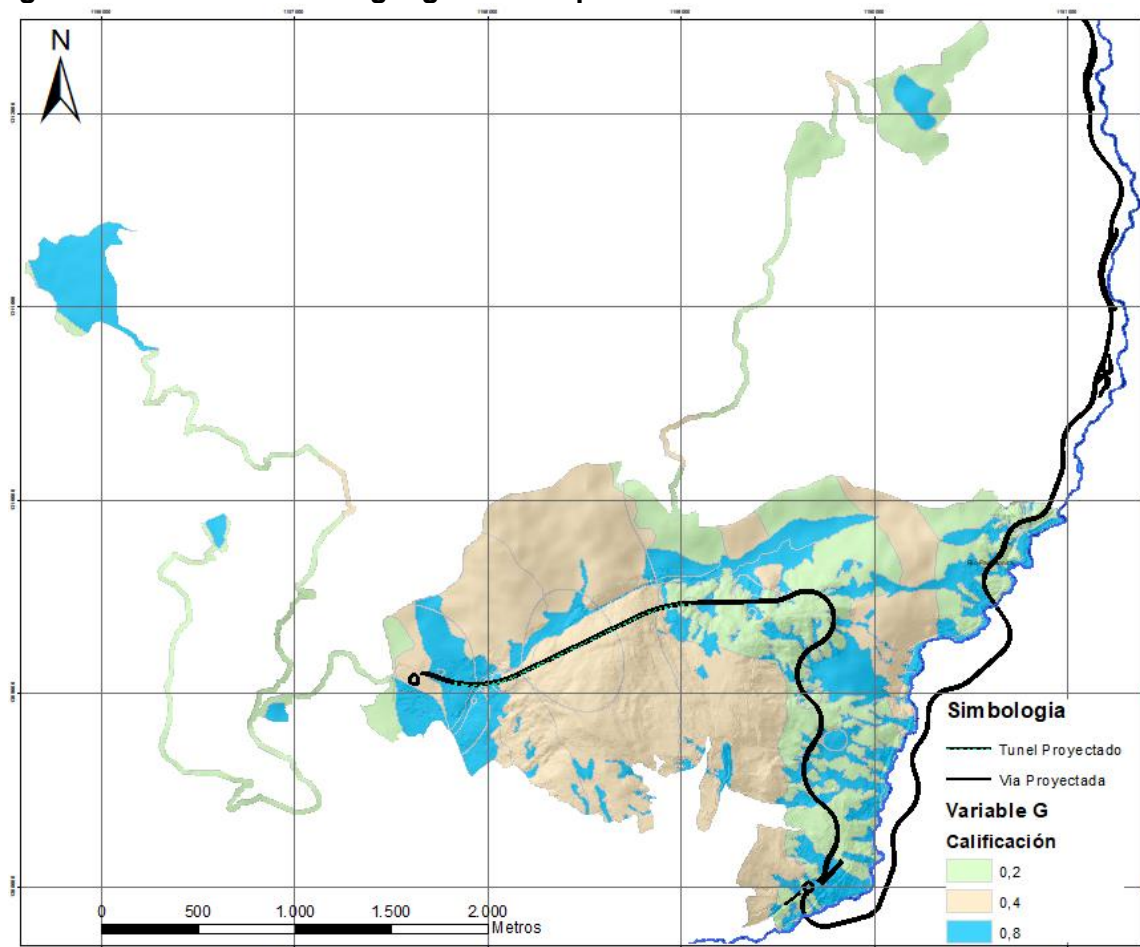
Nombre Unidad Hidrogeológica	Nomenclatura	Valor asignado
Acuífero Cuaternario	Qant	0,8
	Qal	0,8
	Qca	0,8
	Qc	0,8
	Qt	0,8
	Qft	0,8
	Qcd	0,8
Acuífero Barco	Tpb	0,4
Acuiclúdo Colón - Mito Juan	Kscm	0,2
Acuífero La Luna	Ksl	0,4

Nombre Unidad Hidrogeológica	Nomenclatura	Valor asignado
Acuitardo Capacho	Kic	0,2
Acuífero Aguardiente	Kia	0,4
Acuífero Tibú-Mercedes	Kitm	0,4
Acuífero Girón	Jg	0,4
Acuiclúdo Ortoneis	Jg	0,2

Fuente: Geodata, 2018

Es clara la presencia dominante de un acuífero no confinado consistente en lentes discontinuos que por su limitada capacidad de almacenamiento debida a aspectos geomorfológicos se convierte mayoritariamente en zonas de flujos subsuperficiales, localizados en correspondencia con los depósitos cuaternarios que sirven de cobertura al basamento rocoso conformado por las principales unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

Figura 5-2.26. Distribución geográfica del parámetro G.



Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.7.2 Ocurrencia del Sustrato Suprayacente (O)

Este parámetro incluye una caracterización global de la zona que suprayace al acuífero, en cuanto a la naturaleza litológica y al grado de consolidación y fracturamiento de la roca. 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 (como carbonatos, sulfatos e hidróxidos); 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 móviles y persistentes.

Las características litológicas de la zona no saturada en la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos pueden dar indicios de la condición de confinamiento de los acuíferos.

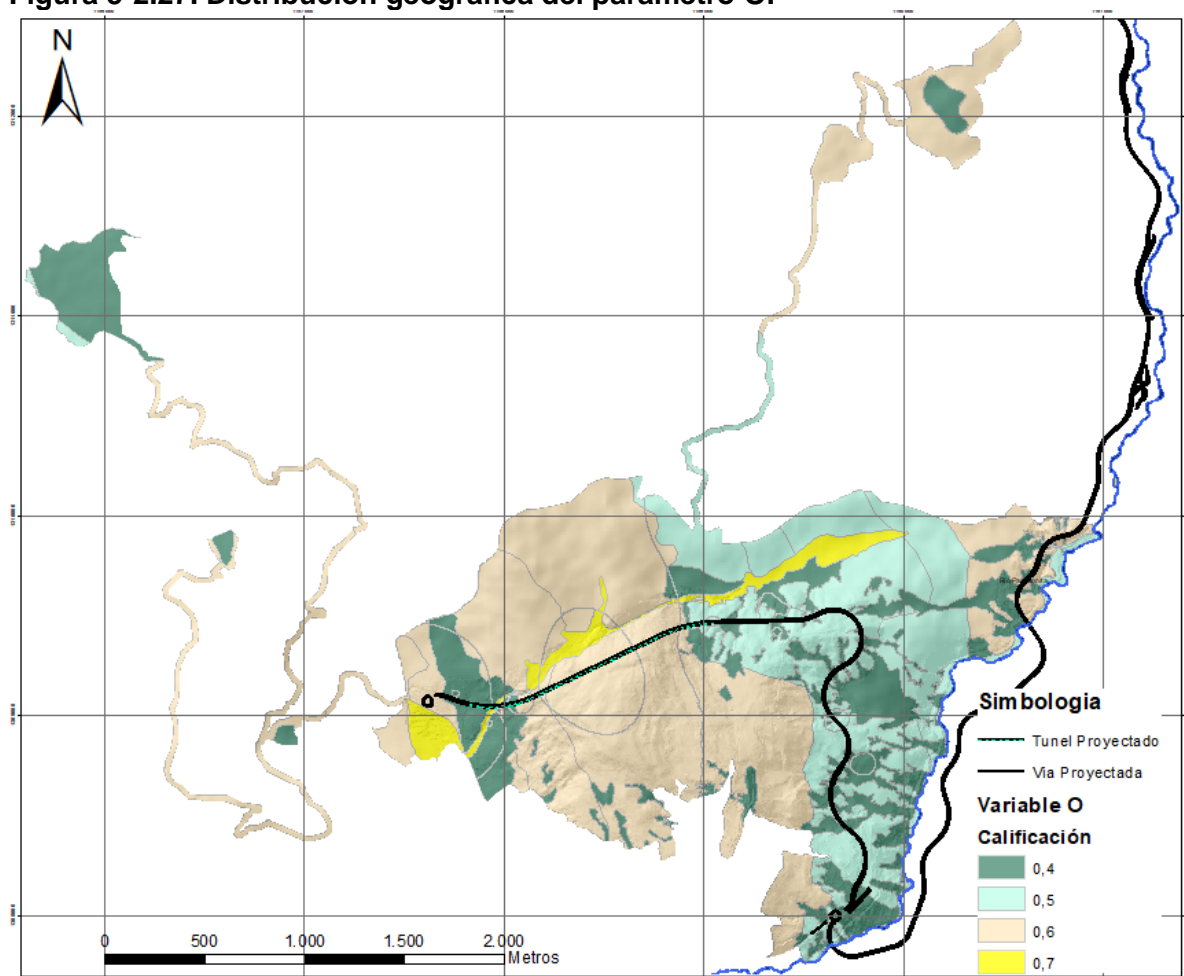
Según las características litológicas evidenciadas en las perforaciones realizadas, se asignaron a este parámetro los valores relacionados en la Tabla 5-2.13 presentada a continuación:

Tabla 5-2.13 Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas según sustrato suprayacente.

Nombre Unidad Hidrogeológica	Nomenclatura	Valor asignado
Depósitos antrópicos	Qant	0,4
Depósitos aluviales	Qal	0,7
Depósitos coluvio-aluviales	Qca	0,7
Depósitos coluviales	Qc	0,4
Depósitos de terraza	Qt	0,5
Depósitos fluvio-torrenciales	Qft	0,5
Depósitos conos de deyección	Qcd	0,4
Formación Barco	Tpb	0,6
Formación Colón - Mito Juan	Kscm	0,5
Formación La Luna	Ksl	0,5
Formación Capacho	Kic	0,5
Formación Aguardiente	Kia	0,6
Formación Tibú-Mercedes	Kitm	0,6
Formación Girón	Jg	0,6
Formación Ortoneis	Jg	0,6

Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.27. Distribución geográfica del parámetro O.



Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.7.3 Distancia al Nivel de Agua Subsuperficial y Subterránea (D)

Corresponde a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados. La profundidad del agua subsuperficial y subterránea es el parámetro más difícil de valorar. Esta profundidad puede estar sujeta a variaciones estacionales para el caso de acuíferos libres, cuya recarga depende en gran medida de la precipitación y las inundaciones que varían de acuerdo con las condiciones climáticas.

Según la profundidad del nivel freático y de acuerdo con la Figura 5-2.25 se asignaron a este parámetro los valores relacionados en la Tabla 5-2.14:

Tabla 5-2.14. Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas por distancia al nivel del agua subsuperficial y subterránea.

Profundidad del nivel freático	Valor asignado
>50	0,6
20 - 50 m	0,7
5 - 20 m	0,8
<5m	0,9

Fuente: Foster et al., 2002

En el presente estudio los valores de la profundidad del agua subsuperficial y subterránea (D) han sido obtenidos a partir de la información suministrada por las perforaciones mecánicas realizadas a lo largo del trazado de la UF1 (Anexo 5.1.3.6) y modelo de elevación del terreno (MDT).

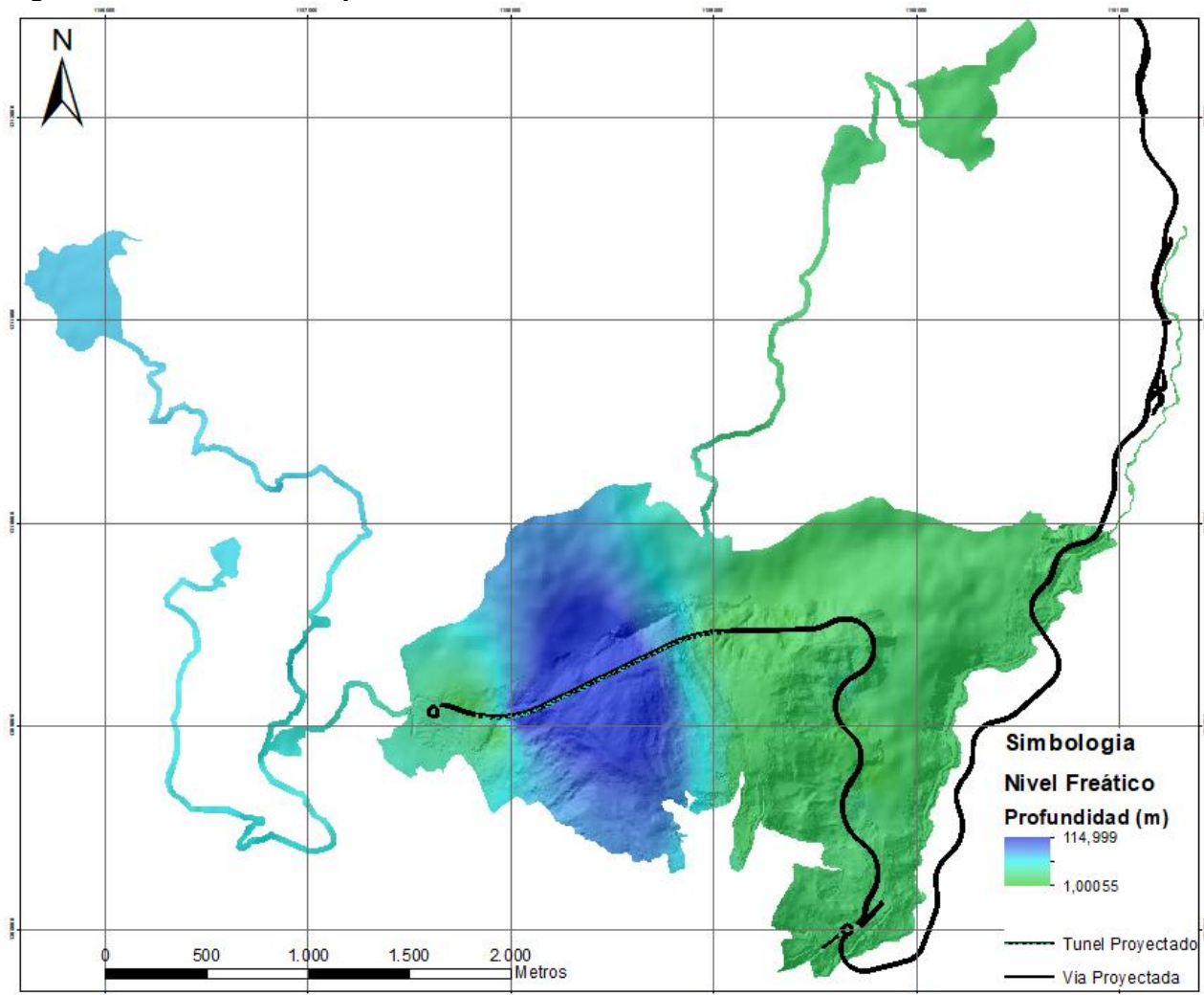
El nivel del agua subsuperficial y subterránea se ha obtenido interpolando los valores de las isopiezas del nivel del agua subsuperficial y subterránea, elaborado como “shapefile” en ambiente GIS a partir de los datos extraídos de las perforaciones y red hidrográfica de la zona de estudio, en donde su principal elemento lo constituye el río Pamplonita y la quebrada San Antonio en el sector Cristo Rey. El proceso de interpolación ha permitido obtener un “raster” con resolución de 1m x 1m, en el que a cada celda le corresponde un valor de la profundidad relativa del nivel del agua en el subsuelo. Estos datos además permitieron que, en zonas con poca información, los datos fueran interpolados para mejorar la fiabilidad del modelo.

En la Figura 5-2.28 y Figura 5-2.29 se aprecia el análisis y resultado de la variable D a en el área de influencia de la UF1.

Es necesario tener en cuenta que los niveles indicados corresponden a la distancia real desde el nivel de las obras hasta la superficie de la zona saturada más cercana verticalmente. En el caso del túnel, se está por debajo de niveles freáticos colgados donde el agua en el macizo rocoso no es susceptible a contaminación por la obra ya que las líneas de flujo se concentran en dirección a las líneas equipotenciales del túnel. Este aspecto se desarrolla con mayor detalle en el numeral 5.1.8.10.6. En la parte a cielo abierto, se presentan primordialmente flujos subsuperficiales en zona vadosa que generan delgadas zonas saturadas sobre materiales muy poco permeables existentes a muy poca profundidad como lo son por ejemplo las arcillolitas. Sin embargo, estos flujos son predominantemente de muy bajo caudal y retornan a la superficie en recorridos muy cortos y de muy poca duración.

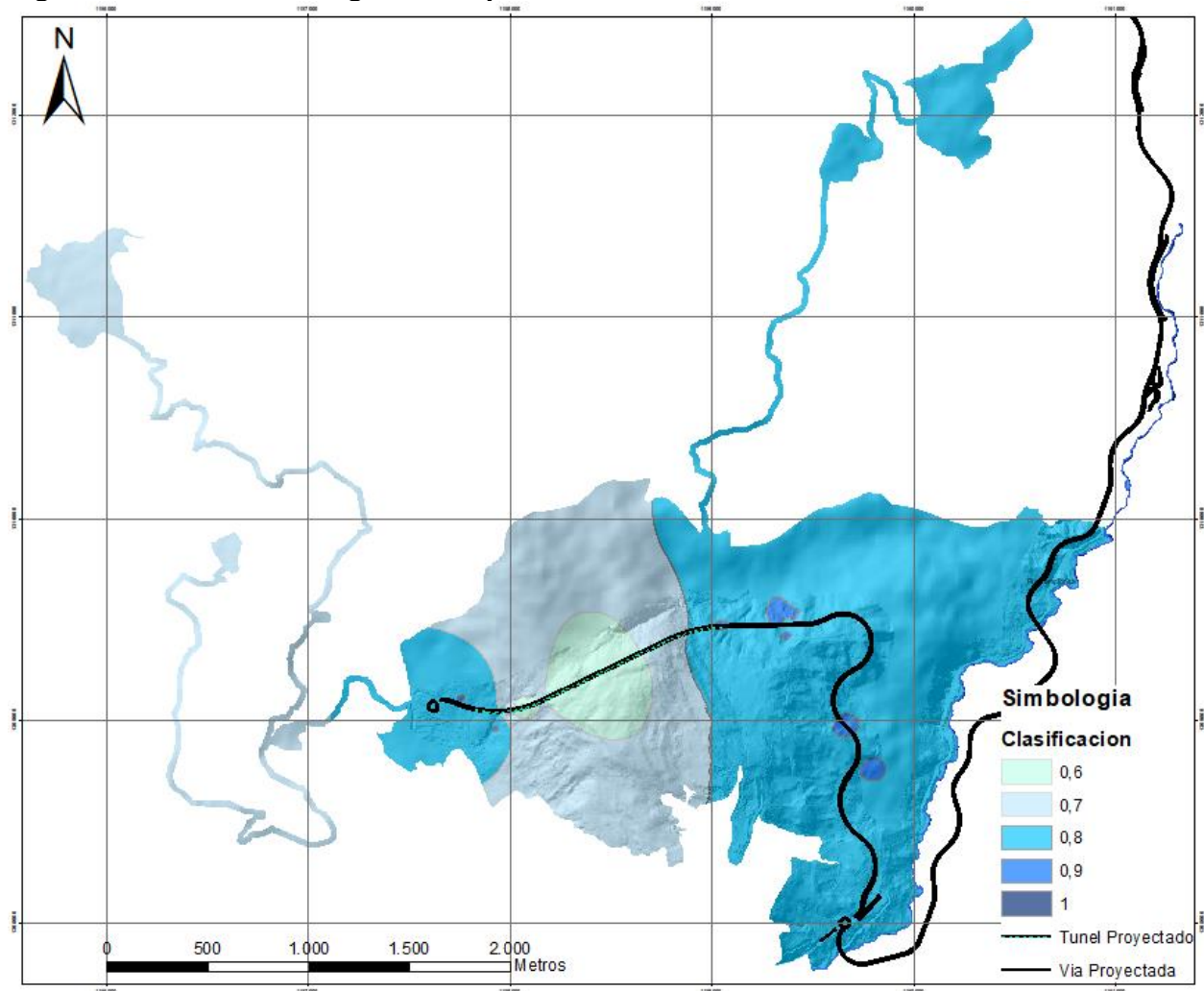
A partir de estos valores, se clasificaron los rangos de acuerdo con la Tabla 5-2.14, en función de la profundidad del nivel freático. El resultado se presenta en la Figura 5-2.29.

Figura 5-2.28. Valores de profundidad del nivel freático en la zona de estudio.



Fuente: Geodata, 2018.

Figura 5-2.29. Valores asignados al parámetro D en la zona de influencia de la UF1.



Fuente: Geodata, 2018.

5.1.8.7.4 Clasificación de la Vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad se calculó mediante la multiplicación de las variables de los tres componentes citados anteriormente (G.O.D), de acuerdo con la metodología descrita en la Figura 5-2.25 con lo cual se llega a la siguiente expresión:

$$I = G \times O \times D$$

Donde,

G: Tipo de confinamiento del agua subsuperficial y subterránea (tipo de acuífero). Se utilizó la información litológica y aquella relacionada con la capa freática.

O: Características litológicas de la zona no saturada del acuífero. Se utilizó la información litológica que incluye la zona no saturada.

D: Profundidad del agua subsuperficial y subterránea o profundidad del nivel freático. Se utilizó la información del nivel freático.

De este modo, con el método aplicado se obtuvo un resultado que permitió discriminar los sectores vulnerables de aquellos de menor criticidad presentes a lo largo de la zona de estudio. El valor del índice (I) varía también entre 0 (vulnerabilidad muy baja) y 1 (vulnerabilidad elevada). El método prevé 5 (cinco) rangos de vulnerabilidad relacionados en la Tabla 5-2.15.

Tabla 5-2.15. Rangos de vulnerabilidad.

Vulnerabilidad	Rango de Valores
Muy Baja o despreciable	0.0 a 0.1
Baja	0.1 y 0.3
Moderada	0.3 y 0.5
Alta	0.5 y 0.7
Elevada o Extrema	0.7 y 1.0

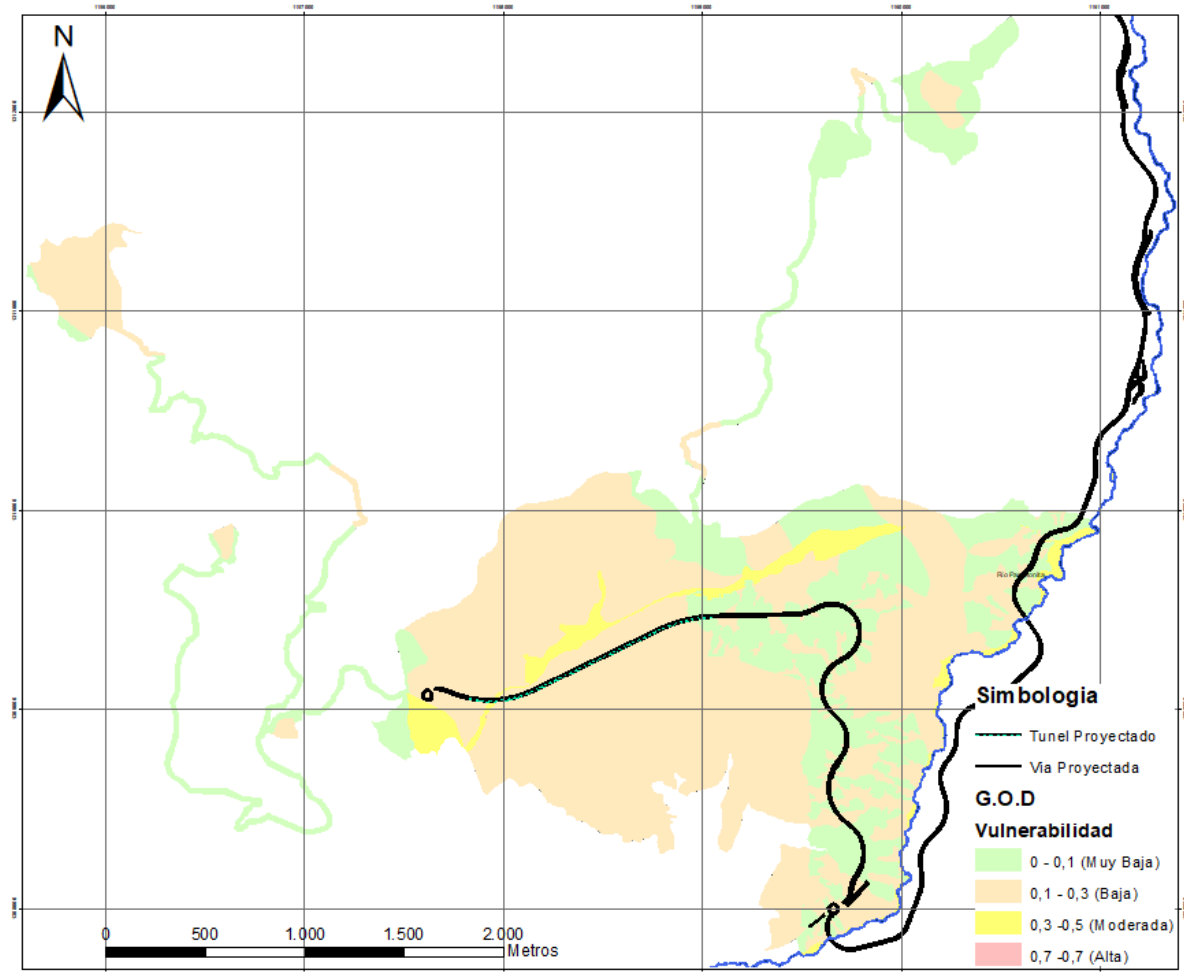
Fuente: Geodata, 2018

Con esto elementos conceptuales, se procedió a trabajar en el entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica ArcGIS). El proceso de interpolación ha permitido obtener en términos generales un “raster” con resolución de 1m x 1m, con lo cual se aseguró el cubrimiento adecuado de toda el área de trabajo.

El valor asignado a cada una de las variables se basó en la información tomada de las perforaciones realizadas, observaciones de campo y análisis hidrogeológico. Siendo las perforaciones insumo importante para la asignación de la información litológica y sobre la profundidad del nivel freático.

Los resultados del procedimiento aplicado para calcular la vulnerabilidad del acuífero se muestran en la Figura 5-2.30.

Figura 5-2.30. Distribución geográfica de la vulnerabilidad intrínseca en la UF1.



Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.8 Valoración del riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas

La evaluación de Riesgos es un instrumento para estimar la probabilidad de que ocurra algún daño causado por la presencia de condiciones peligrosas en alguna parte del proyecto. El riesgo representa la probabilidad e importancia de que un posible peligro se haga realidad.

El objetivo del proceso para identificar y evaluar riesgos es obtener un mayor conocimiento acerca de los tipos de sustancias y productos transportados, así como de las principales fuentes de potencial contaminación. El requisito principal de una identificación y evaluación de riesgos es adquirir un entendimiento del modelo físico del sitio, la vulnerabilidad de los

acuíferos, la localización de las aguas subsuperficiales y subterráneas amenazadas por la contaminación y los tiempos de exposición a una contaminación.

Para la UF1 se ha analizado la siguiente información:

- Mapa de obras en fase de construcción (túneles, carretera nueva, carretera existente, vías de acceso, ZODMEs).
- Mapa de puntos o áreas de peligro de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras.
- Mapa de vulnerabilidad de los acuíferos (GOD).
- Matriz de cálculo de riesgo de contaminación del acuífero.
- Mapa de riesgo de contaminación del acuífero.

5.1.8.8.1 Metodología aplicada

Este documento ha sido realizado a partir de un análisis crítico de los procedimientos y ecuaciones propuestas por las principales líneas de normas y directrices nacionales e internacionales sobre la aplicación del análisis de riesgos para este tipo de obras. En particular, se han considerado como referencia los documentos emitidos por la ASTM, EPA, UNICHIM, CONCAWE. Estos documentos son el punto de referencia para el estudio del riesgo, ya que proporcionan la información necesaria para la elección de los parámetros, las ecuaciones para la descripción del transporte de contaminantes y para el cálculo de los límites de riesgo. Por lo general son el resultado del trabajo realizado por las agencias gubernamentales (por ejemplo, la EPA "*Environmental Protection Agency*" Estados Unidos.) o grupos de investigación que combinan diferentes competencias (por ejemplo UNICHIM "*Associazione per l'Unificazione nel Settore dell'Industria Chimica*", asociación italiana federada al UNI) con el objetivo de crear una guía de referencia técnica para la aplicación del análisis de los criterios de riesgo.

El "Análisis de riesgos para el transporte terrestre de mercancías peligrosas en la ciudad de barranquilla" (Gloria Estebana Bastidas Rodriguez y Fabio Andres Monsalvo Carrillo, 2011), propuesta para la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico en el marco del Programa de Ingeniería Industrial Barranquilla, es otro ejemplo de aplicación metodológica que ha proporcionado una indicación útil para los análisis en este estudio.

La reconstrucción del medio real (tanto natural como antropogénico), de sus elementos y de las interacciones entre ellos, por medio de herramientas cualitativas o matemáticas lleva el nombre de "Modelo". Esta abstracción permite, a partir de una geometría real y por lo tanto compleja, dar vida a un esquema físico teórico simplificado. Como parte del análisis de riesgo relacionado con la contaminación de un acuífero, es necesario identificar el Modelo Conceptual del Sitio. Este proceso es el resultado de las investigaciones y análisis del sitio y su definición comprende esencialmente la reconstrucción de los tres componentes principales de los caracteres que constituyen el modelo:

Fuente ⇒ Transporte ⇒ Objetivo

Para lo cual se definen:

- a. las fuentes de peligro de contaminación, o fuentes de amenaza
- b. La vulnerabilidad del acuífero desde la superficie
- c. La localización de los acuíferos

El riesgo (R), como definición originalmente derivada de los procedimientos de seguridad industrial, es la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento dañoso, o vulnerabilidad (V) con la entidad de los daños causados por el mismo evento (D):

$$R = V \times D$$

El daño resultante de un evento incidental (D), a su vez, puede ser dado por el producto de un factor de peligrosidad (Fp), dependiente de la entidad del daño teóricamente posible, y un factor de contacto (Fc), dependiente de la duración de la exposición:

$$D = Fp \times Fc$$

Los numerales del 5.1.8.10.3 al 5.1.8.10.4 integran y complementan la metodología utilizada en la evaluación del riesgo del presente estudio.

5.1.8.8.2 Análisis de la vulnerabilidad

En el presente estudio hidrogeológico se ha realizado un análisis de vulnerabilidad de los acuíferos, mediante el método GOD (Foster et al., 2002; Foster, 1987). Esta información representa el primer dato necesario para investigar las características propias de un acuífero expuesto a una amenaza.

El método GOD se basa en tres variables que permiten el cálculo de la vulnerabilidad del acuífero:

- El confinamiento del agua subsuperficial y subterránea (G)
- Las diferentes capas geológicas pertenecientes al acuífero y su respectivo grado de consolidación (O)
- La profundidad del nivel freático (D).

En el proyecto de la UF1, se obtuvo el índice de vulnerabilidad según la siguiente operación:

$$I = G \times O \times D$$

El valor del índice (I) varía entre 0 (vulnerabilidad baja) y 1 (vulnerabilidad elevada). El método prevé 5 (cinco) clases de vulnerabilidad, a las cuales se ha aplicado un puntaje de 1 a 5, necesario para calcular el riesgo de contaminación de los acuíferos.

El análisis realizado, así como los resultados obtenidos mediante la aplicación del método GOD en la UF1, se pueden ver con detalle en el apartado 5.1.8.9 del presente informe.

5.1.8.8.3 Factores de peligrosidad de las fuentes de amenaza

Como se describió anteriormente, el daño resultante de un hipotético evento incidental es el producto de un factor de peligrosidad (Fp), dependiente de la entidad del daño teóricamente posible, y un factor de contacto (Fc), dependiente de la duración de la exposición.

- **Factor de Peligrosidad (Fp)**

Para la identificación, descripción y análisis de amenazas se debe identificar y ordenar el tipo de fuente de amenaza de infiltración de sustancias peligrosas que podrían contaminar los acuíferos y el medio ambiente, esto con el propósito de facilitar una priorización de riesgos, el cual puede consistir en una simple categorización. Para este fin se utilizó la Tabla 5-2.16. En la primera columna se describen todas las posibles fuentes de amenazas. En las columnas siguientes se describen las características que contribuyen a definir la peligrosidad y se coloca el puntaje, de 1 a 3, y la calificación que corresponda. Como se ve, el puntaje de Fp varía de 1 a 9 y sugiere prioridades donde 1 representa el de menor importancia y 9 el de mayor riesgo de contaminación.

Tabla 5-2.16. Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de peligrosidad (Fp)

Fuente de amenaza	Geometría			Fenómeno			Puntaje Fp	Peligrosidad
	Puntual	Lineal	Areal	Material orgánico	Aceites y grasas	Metales pesado, pH ácido		
Nueva carretera cielo abierto	0	2	0	0	2	0	4	MEDIA
Carretera existente cielo abierto	0	2	0	0	2	0	4	MEDIA
Botadero (ZODMEs)	0	0	3	0	2	3	8	ALTA
Accesos Viales	0	2	0	0	2	0	4	MEDIA

Fuente: Geodata, 2018

- **Factor de contacto (Fc)**

El factor de contacto (Fc), o duración de la exposición, se calcula asignando los puntajes de 0, 1 o 2 a los tiempos de duración de la fuente de contaminación, dependiendo si la fuente es temporal (puntaje 1) o permanente (puntaje 2). En la Tabla 5-2.17 se describen las clasificaciones adoptadas.

Tabla 5-2.17. Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de contacto (Fc)

Fuente de amenaza	Duración		Puntaje Fc	Peligrosidad
	Temporal	Permanente		
Nueva carretera cielo abierto	0	2	2	ALTA
Carretera existente cielo abierto	0	2	2	ALTA
Botadero (ZODMEs)	0	2	2	ALTA
Accesos Viales	0	2	2	ALTA

Fuente: Geodata, 2018

El factor Fc varia de 1 a 2 y sugiere prioridades donde 1 representa el riesgo de menor importancia y 2 el de mayor riesgo de contaminación. La peligrosidad en este caso puede variar de baja (puntaje 1) a alta (puntaje 2).

5.1.8.8.4 Evaluación del riesgo

Esta etapa cumple para la evaluación y valoración del riesgo basada en la mencionada metodología de calificación. El fundamento básico de la metodología es asignar puntajes a la vulnerabilidad de los acuíferos y a los factores de amenaza y de exposición, con ello valorar el riesgo. Esta metodología permite desarrollar de forma general y cualitativa el análisis de amenaza y vulnerabilidad con el fin de determinar el nivel de riesgo a través de la combinación de diversas variables. Asimismo, aporta elementos de prevención y mitigación de los riesgos, los cuales constituirán la base para formular los planes de acción.

Una vez identificadas, descritas y analizadas las amenazas y desarrollado el análisis de vulnerabilidad, se procede a determinar el nivel de riesgo combinando la calificación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Tabla 5-2.18. Cálculo del riesgo (R) mínimo y máximos posibles y del riesgo normalizado (Rn), entre 0 y 1

Vulnerabilidad (V)	Factor de peligrosidad (Fp)	Factor de contacto (Fc)	Riesgo (R)	Riesgo Normalizado (R)
1	1	1	1 (mínimo)	0,00
5	9	2	90 (máximo)	1,00
1	1	2	2	0,01
3	1	1	3	0,02
2	1	2	4	0,03
4	2	1	8	0,08
2	4	2	16	0,17
3	4	2	24	0,26
4	4	2	32	0,35
3	8	2	48	0,53
4	4	2	64	0,71

Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.8.5 Resultados

El resultado de los pasos anteriores se usa para priorizar los riesgos. La clasificación total de los riesgos para cada tramo, las diferentes amenazas estudiadas, sus respectivas calificaciones y descripciones se encuentran detalladas a continuación:

Lo primero que se debe tener en cuenta es que la clasificación se dividió en 5 clases:

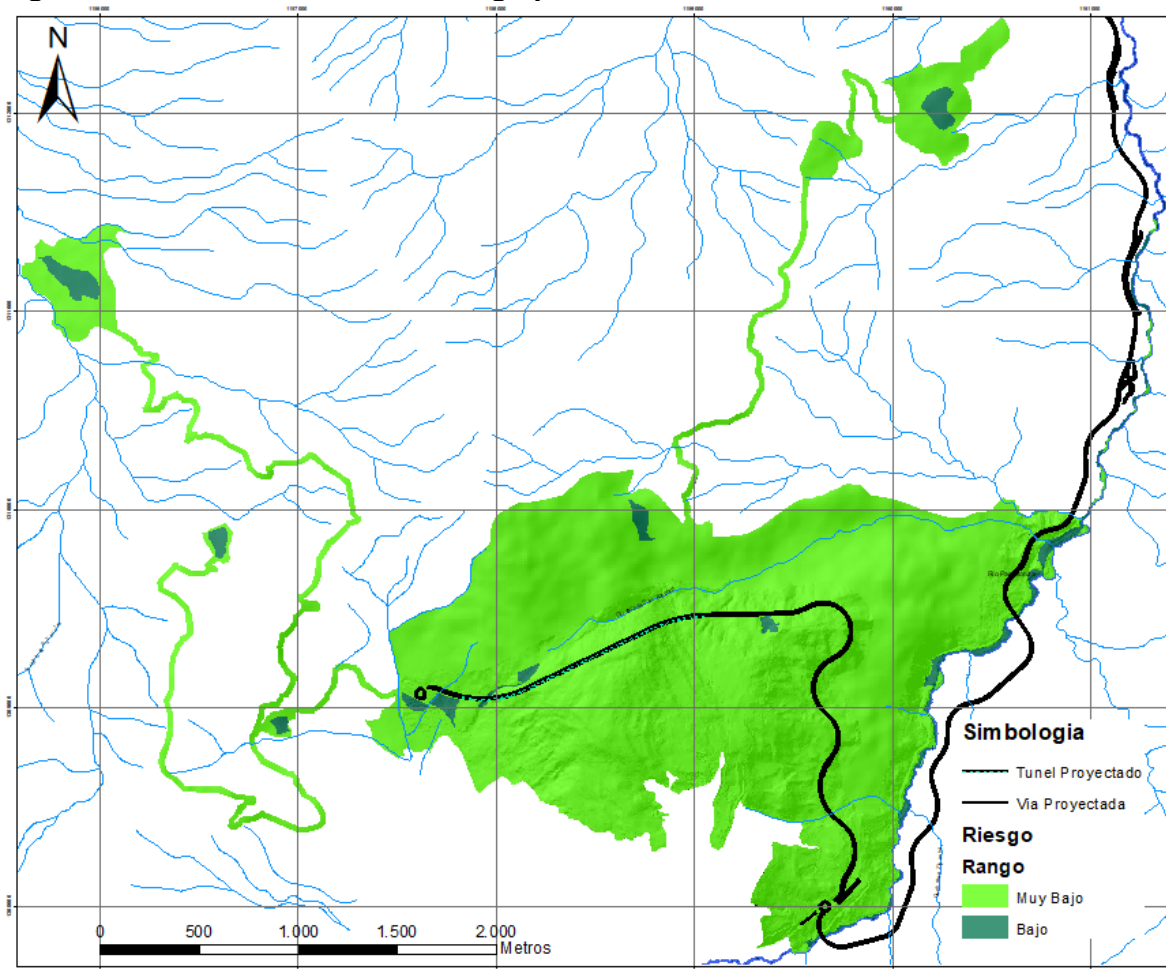
Figura 5-2.31. Clasificación del riesgo para la zona de estudio



Fuente: Geodata, 2018

Cada clase fue ponderada acorde al peso de la vulnerabilidad y al factor de peligrosidad y de contacto, luego de lo cual se normalizaron los resultados y se agruparon para su posterior análisis.

Figura 5-2.32. Clasificación del riesgo para la zona de estudio



Fuente: Geodata, 2018

Una vez analizado el riesgo se encontró que concordantemente con el análisis de vulnerabilidad, la mayor cantidad de la zona presenta una vulnerabilidad muy baja (96.70%) y baja (3.30%), esto se debe a la presencia de pendientes moderadas y fuertes en la zona, así como de la ausencia de grandes obras o intervenciones, salvo la vía misma y el túnel. Este último amerita un análisis diferente ya que su cota de excavación se encuentra a una profundidad razonable, generalmente bajo niveles freáticos colgados en la mayoría de los casos. Aquí el riesgo a la contaminación se da especialmente por vertimiento, lo cual está sujeto a otro tipo de análisis tratado en capítulos aparte.

5.1.8.9 Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua censado en la vía a cielo abierto y ZODMEs.

5.1.8.9.1 Criterios utilizados

Los puntos de agua identificados durante el inventario y localizados en la zona de influencia de la UF1 han sido sometidos a un análisis de sensibilidad con el objeto de identificar su potencial afectación por las obras que integran el nuevo corredor vial. Los criterios de mayor relevancia utilizados para la valoración hecha toman en cuenta la distancia y posición del punto de agua respecto al trazado de la nueva vía y al tipo de obra civil que la integra (puentes/viaductos, terraplenes, vía normal, cortes/taludes, entre otros). Así como su posición en el área general del proyecto definida por las obras conexas al mismo.

De lo indicado en el párrafo anterior y para la definición de los puntos a ser impactados se distinguen dos áreas con respecto al trazado de la vía. La primera corresponde a aquellas áreas sobre las cuales van a existir obras, es decir las zonas en las cuales la vía tendrá cortes, rellenos y por supuesto la zona de construcción de la estructura lineal de pavimento, bermas y obras de arte conexas (polígono de intervención de la obra). La segunda área corresponde a aquella de diseño definida por el constructor que contiene las obras anexas al proyecto vial (ZODMES, campamentos, senderos, plantas industriales, etc).

En relación con la valoración de la posición del punto respecto al trazado de la vía proyectada, se tiene en cuenta si este se ubica altimétricamente arriba o debajo de su eje, tomando en consideración la dirección preferencial del flujo subterráneo o subsuperficial.

En relación con las estructuras u obras que integran el corredor vial se ha dado un mayor peso de afectación a aquellos puntos de agua localizados en una cota superior y/o inferior respecto a cortes y taludes, así como en cotas inferiores respecto a rellenos aledaños al trazado donde puede verse afectada el área de captura o recarga del punto. Así como un peso menor a aquellos puntos ubicados frente a la estructura de vía a nivel. En el caso de los taludes y cortes, aparte de la excavación que se realiza en el terreno, se suma el hecho que generalmente se deben realizar perforaciones para instalación de drenajes que de acuerdo con su cantidad y dimensiones tienen el potencial de abatir el nivel freático hasta varios metros atrás de la cabeza del talud, convirtiéndose de este modo en la obra que en mayor grado puede llegar a afectar los puntos de agua ubicados en cotas superiores y/o inferiores respecto al trazado.

En relación con la distancia respecto al eje de la nueva vía, los puntos de agua identificados

durante el inventario se han dividido en dos grandes grupos; aquellos localizados a distancias mayores o iguales a 100 m y aquellos ubicados a distancias menores o iguales a este valor. Estos últimos a su vez se han dividido en tres subgrupos; aquellos puntos de agua localizados a distancias mayores a 60 m, aquellos localizados a distancias entre 60 y 30 m, y finalmente aquellos ubicados a distancias menores 30 m respecto al eje de la vía o al interior del polígono de intervención o en sus inmediaciones.

Para todos los puntos de agua en general se ha estimado un potencial de afectación dividido en tres (3) niveles (desde 1 hasta 3). La división en tres niveles se ha considerado adecuada porque permite de manera clara y eficaz obtener una valoración en tiempo breve del riesgo al que está sometido el punto de agua por la presencia de la vía, de manera coherente con la información base necesaria para su determinación. Siendo el nivel 1 el de menor potencial de afectación y el nivel 3 el de mayor potencial de afectación esperada. En el presente trabajo se incluye la valoración de afectación de los puntos de agua por la presencia de ZODMEs. La valoración y criterios específicos aplicables al presente caso de estudio son los descritos a continuación:

- **Nivel 1:**

Corresponde a puntos de agua en los cuales no se prevé afectación o su potencial es muy bajo a imperceptible. Se le asigna este valor a todos los puntos que cumplen con los siguientes criterios:

- Puntos de agua localizados a distancias mayores a 100 m a cada lado del trazado vial, independientemente de su posición respecto al eje de la vía, estructura u obra.
- Puntos de agua localizados a una distancia mayor a 60 m del eje del trazado vial; ubicados en cotas superiores o inferiores respecto a cortes/taludes, puentes, terraplenes, rellenos laterales o vía a nivel.
- Puntos de agua localizados a una distancia menor a 60 m del eje del trazado vial, ubicados en cotas superiores respecto a puentes, taludes menores a 10 m de altura (sin drenes), terraplenes de baja altura, y vía a nivel (sin rellenos laterales); con excepción de los puntos de agua descritos en los niveles 2 y 3.
- Puntos de agua localizados a distancias mayores a 100 m alrededor del polígono que delimita el área del ZODME, independientemente de su posición altimétrica.
- Puntos de agua localizados en cotas superiores dentro de un buffer de 100 m alrededor del polígono que delimita el área del ZODME, con excepción de los puntos de agua planteados en los niveles 2 y 3.

- **Nivel 2:**

Corresponde a puntos de agua con potencial de afectación bajo a medio. Se le asigna este valor a todos los puntos que cumplen con los siguientes criterios:

- Puntos de agua localizados a una distancia comprendida entre 60 y 30 m del eje del trazado vial, ubicados en cotas superiores respecto a cortes y taludes en los que se construyen drenes subhorizontales (por lo general taludes mayores a 10 m de altura) y/o en cotas inferiores respecto a rellenos laterales adyacentes a la vía. Con excepción

- de los puntos de agua ubicados al interior del polígono de intervención de la obra o en sus inmediaciones.
- Puntos de agua localizados a una distancia menor o igual a 30 m del eje del trazado vial; ubicados en cotas inferiores respecto a puentes o viaductos, terraplenes de baja altura y vía a nivel (sin rellenos laterales). Con excepción de los puntos de agua ubicados al interior del polígono de intervención de la obra o en sus inmediaciones.
- Puntos de agua localizados en cotas inferiores dentro de un buffer de 100 m alrededor del polígono que delimita el área del ZODME.

- **Nivel 3:**

Corresponde a puntos de agua con potencial de afectación de alto a muy alto. Se le asigno este valor a todos los puntos que cumplen con los siguientes criterios:

- Puntos de agua localizados en el interior o en las inmediaciones del polígono de intervención de la obra, es decir, en correspondencia con la(s) calzada(s) de la vía, incluidas sus obras de arte, chaflanes de los cortes o taludes y cotas de rellenos; independientemente de su posición respecto al eje de la vía, estructura u obra.
- Puntos de agua localizados al interior o en las inmediaciones del polígono que delimita el área del ZODME.

En la Tabla 5-2.19 se muestra el resultado del potencial de afectación definido para los puntos de agua censados para la vía a cielo abierto y ZODMEs de la UF1, a los que se les han aplicados los criterios antes mencionados. Los puntos de agua censados en la zona de influencia del túnel Pamplona fueron analizados con otra metodología y son presentados en párrafos sucesivos.

5.1.8.9.2 Resumen evaluación de impactos puntos vía a cielo abierto y ZODMEs

Los impactos sobre los 35 puntos de agua evaluados son asignados de acuerdo con la clasificación de tres niveles definida anteriormente. Los impactos probables se describen en los siguientes numerales.

- **Puntos Nivel 1**

Por las razones expuestas en el numeral anterior no se prevén cambios en el caudal de afloramiento o en la calidad del agua de estos puntos por la construcción de las obras que integran el corredor vial, especialmente por su distancia respecto a las mismas y el carácter local de los flujos que los alimentan. Los puntos con esta categoría 27 de 35 y se muestran en la Tabla 5-2.19.

Tabla 5-2.19. Potencial de afectación de los puntos de agua encontrados en la UF1 en vía a cielo abierto y ZODMEs

Punto de Agua	Tipo de Punto	Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá)			Abscisa Perímetro (Referencia)	Obra más cercana al PA		Altimetría		Potencial de afectación		
		E	N	ELV		Obra más cercana	Distancia al eje/perímetro	Cota superior	Cota inferior	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
UF1-PA01	Interflujo	1157726	1308915	2381	Perímetro	ZODME 136	48		SI		2	
UF1-PA11	Interflujo	1159212	1309611	2287	K58+526	Vía a cielo abierto	140		SI	1		
UF1-PA12	Resurgencia	1159652	1308983	2257	K57+422	Vía a cielo abierto	3		SI			3
UF1-PA13	Resurgencia	1159760	1308981	2238	K57+354	Vía a cielo abierto	73		SI	1		
UF1-PA14	Interflujo	1159716	1308814	2258	K57+216	Vía a cielo abierto	27	SI		1		
UF1-PA15	Resurgencia	1159493	1308677	2300	K57+037	Vía a cielo abierto	154	SI		1		
UF1-PA16	Resurgencia	1159469	1308439	2301	K56+908	Vía a cielo abierto	205	SI		1		
UF1-PA17	Resurgencia	1159404	1308450	2317	K56+924	Vía a cielo abierto	262	SI		1		
UF1-PA18	Interflujo	1159478	1308071	2270	K56+172	Vía a cielo abierto	171	SI		1		
UF1-PA21	Resurgencia	1159616	1308603	2250	K56+982	Vía a cielo abierto	24	SI		1		
UF1-PA22	Interflujo	1159379	1309509	2306	K58+416	Vía a cielo abierto	43		SI		2	
UF1-PA23	Resurgencia	1159561	1309195	2312	K57+620	Vía a cielo abierto	65	SI		1		
UF1-PA24	Resurgencia	1159722	1309169	2225	K57+711	Vía a cielo abierto	79		SI	1		
UF1-PA25	Interflujo	1156797	1308859	2463	Perímetro	ZODME 144	≈100	SI		1		
UF1-PA26	Resurgencia	1156807	1309800	2472	Perímetro	ZODME 148	≈100	SI		1		
UF1-PA27	Resurgencia	1159737	1309074	2226	K57+433	Vía a cielo abierto	121		SI	1		
UF1-PA28	Interflujo	1159270	1309630	2269	K58+583	Vía a cielo abierto	157		SI	1		
UF1-PA29	Interflujo	1159417	1309678	2252	K58+377	Vía a cielo abierto	202		SI	1		
UF1-PA30	Resurgencia	1156958	1308931	2421	Perímetro	ZODME 144	2	SI			2	
UF1-PA31	Interflujo	1156575	1309824	2432	Perímetro	ZODME 148	1	SI			2	
UF1-PA34	Interflujo	1160146	1312162	2094	Perímetro	ZODME 118	77	SI		1		

Punto de Agua	Tipo de Punto	Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá)			Abscisa Perímetro (Referencia)	Obra más cercana al PA		Altimetría		Potencial de afectación		
		E	N	ELV		Obra más cercana	Distancia al eje/perímetro	Cota superior	Cota inferior	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
UF1-PA35	Resurgencia	1160040	1309265	2199	K57+870	Vía a cielo abierto	263		SI	1		
UF1-PA36	Interflujo	1159934	1308255	2137	K56+595	Vía a cielo abierto	120		SI	1		
UF1-PA37	Interflujo	1159579	1308160	2246	K56+270	Vía a cielo abierto	157		SI	1		
UF1-PA38	Interflujo	1160451	1309671	2053	K57+962	Vía a cielo abierto	706		SI	1		
UF1-PA39	Interflujo	1160391	1309668	2031	K57+965	Vía a cielo abierto	648		SI	1		
UF1-PA40	Interflujo	1159640	1309748	2212	K58+141	Vía a cielo abierto	219		SI	1		
UF1-PA41	Manantial	1159315	1308919	2415	K57+490	Vía a cielo abierto	326	SI		1		
UF1-PA42	Interflujo	1159250	1309106	2433	K57+554	Vía a cielo abierto	356	SI		1		
UF1-PA43	Interflujo	1159471	1309255	2345	Perímetro	ZODME VER 124	172	SI		1		
UF1-PA44	Interflujo	1159482	1309216	2340	K57+614	Vía a cielo abierto	146	SI		1		
UF1-PA101	Resurgencia	1159601	1308997	2285	K57+450	Vía a cielo abierto	37	SI			2	
UF1-PA104	Interflujo	1157676	1309031	2399	K60+300	Vía a cielo abierto	7	SI				3
UF1-PA105	Resurgencia	1156837	1309714	2488	Perímetro	ZODME 148	186	SI		1		
UF1-PA106	Interflujo	1157643	1309053	2403	K60+270	Vía a cielo abierto	2	SI				3
										27	5	3

Fuente: Geodata, 2018.

- **Puntos Nivel 2**

Los puntos nivel 2 pueden ser afectados en su caudal, dado que el área de captura o flujo subsuperficial puede afectarse por el proyecto (cortes, rellenos y ZODMEs). De forma adicional, para los puntos ubicados en cotas inferiores al trazado vial o área de ZODMEs, la calidad del agua puede afectarse por contaminación cruzada a causa de la escorrentía superficial que arrastrará materiales de obra y desechos en la carretera o ZODME hasta el afloramiento. Los puntos con esta categoría son 5 de 35 y se muestran en la Tabla 5-2.19.

- **Puntos Nivel 3**

El punto se verá completamente impactado por la obra, desapareciendo de su ubicación inicial. Los puntos con esta categoría son 3 de 35 y se muestran en la Tabla 5-2.19.

5.1.8.9.3 Medidas de manejo de impactos

A partir del análisis de sensibilidad del punto de agua por cercanía, cota y tipo de obra del proyecto, se han definido medidas para diferentes escenarios o niveles de afectación identificados (niveles 1, 2 y 3). Se realizó un análisis para cada punto obteniendo de forma general las medidas mostradas en los siguientes ítems.

Según se desprende del Estudio de Impacto Ambiental, la clasificación corresponde

- Nivel 1: Corresponde a puntos de agua en los cuales no se prevé afectación o su potencial es muy bajo a imperceptible.
- Nivel 2: Corresponde a puntos de agua con potencial de afectación bajo a medio.
- Nivel 3: Corresponde a puntos de agua con potencial de afectación de alto a muy alto.

En la Tabla 5-2.19, se presenta la clasificación de puntos de agua según el nivel de afectación definido en el Estudio de Impacto Ambiental. De igual manera, en la Tabla 5-2.20 se especifica la medida o grupo de medidas aplicables a cada punto de agua.

Para el caso de los probables efectos en puntos de agua debidos a la construcción del túnel, se presenta aparte una ficha de manejo exclusiva.

- **Medidas de prevención y control**

Como una medida de seguimiento y control de los puntos de agua censados se realizará un atento monitoreo del caudal del agua que aflora en los puntos identificados. En este sentido se incluirán en la red de monitoreo todos los puntos identificados en el inventario independientemente de su nivel de afectación. Para el desarrollo de esta actividad se remite a las **fichas de monitoreo** establecidas específicamente para este fin.

- **Medidas de protección**

Las medidas de protección se basan en los principios de protección, algunos de los cuales se mencionan a continuación (tomados de una publicación de Oxfam_2006).

- Se debe proteger de personas y animales el área sobre los puntos de agua para prevenir contaminación.
- Construir un dren de corte sobre los puntos de agua previene la mezcla de agua contaminada de escorrentía.
- No se deben construir letrinas a menos de 30 metros agua arriba de los puntos de agua.
- Después de limpiar el área donde se encuentra el punto de agua, esta se debe proteger con rajón y/o bolos de río y grava. El tanque del punto de agua puede tener tubería para abastecer fácilmente de agua a los usuarios.
- El área alrededor del punto de agua debe ser cercada para evitar el acceso de animales. Los caudales de rebose deben ser redirigidos a cuerpos superficiales y/o abrevaderos.
- Los tanques para los puntos de agua deben ser limpiados de forma periódica.

Las medidas de protección para la mayoría de los puntos incluidos en el análisis incluyen cerramiento y zanja perimetral, con base en las condiciones particulares de cada sitio. En algunos casos se proponen tanques o albercas para la protección de los afloramientos y sus captaciones. Para la identificación de las medidas de protección para los puntos de agua censados se remite a la Tabla 5-2.20.

A continuación, se describen las medidas de protección propuestas.

- **Cerramiento del punto**

Esta medida apunta a la protección de punto evitando el acceso de animales y personas que pudiesen alterar el estado del afloramiento, así como la calidad y/o cantidad del agua que aflora y las captaciones existentes. Esta medida también mejora las condiciones actuales del afloramiento, generando protección incluso ante factores diferentes a los generados por la construcción y operación de la vía. En la Fotografía 5-2.1 se muestra la forma del cerramiento propuesto.

- **Zanja Perimetral**

Por la cara interior del cerramiento y de acuerdo a las condiciones fisiográficas del sitio, se realizará la construcción de una zanja perimetral, la cual corresponde a una excavación continua del terreno de 40 - 50 cm de profundidad y 40 a 50 cm de ancho, rellena con rajón o bolos de río de gran diámetro para que estos brinden soporte a la zanja y eviten su derrumbe. Ésta se excavará en forma de “U” con descarga hacia las cotas inferiores al punto de agua. Con la zanja se evita que lleguen flujos superficiales directamente sobre el afloramiento a partir de la escorrentía superficial, contaminando o dañando el sitio de afloramiento o punto de agua así como las obras de captación que puedan existir. En la Fotografía 5-2.2 se muestra un modelo para la excavación de las zanjas.

Fotografía 5-2. 1 Modelo de cerramiento



Fuente: Segmento de imagen en (canacopegdl.com).

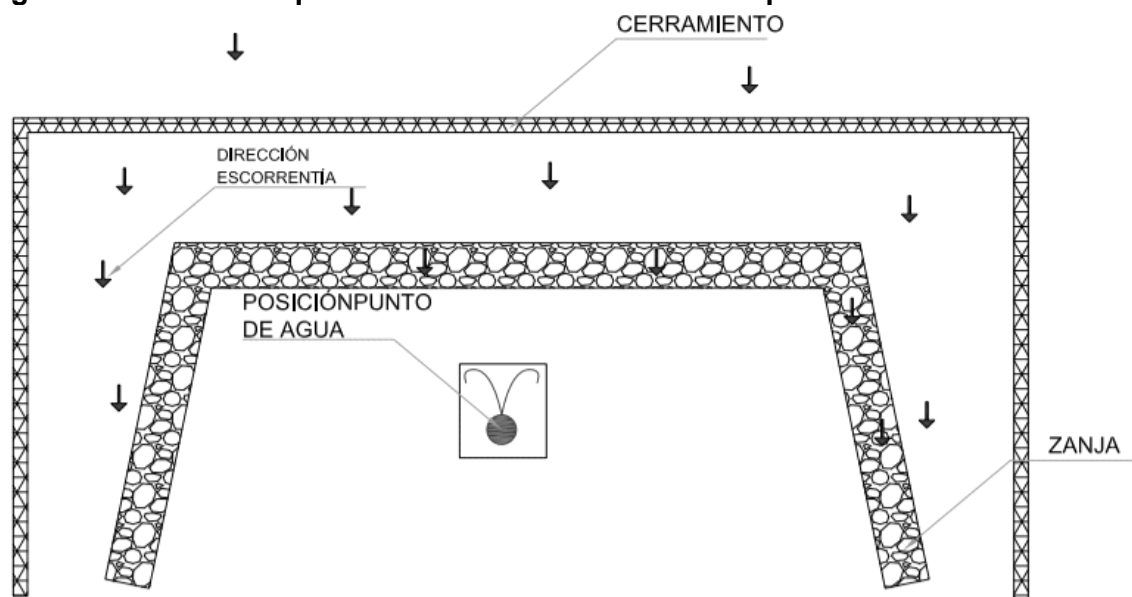
Fotografía 5-2. 2 Modelo de zanja perimetral.



Fuente: (<http://maddyyoung.com/50054>)

A continuación, en la Figura 5-2.33 se muestra el esquema de acople para la aplicación conjunta de las dos medidas de manejo presentadas anteriormente, correspondientes a cerramiento y zanja perimetral).

Figura 5-2.33 Vista esquemática de medidas básicas de protección.



Fuente: Hidrogeocol, 2018

Con base en lo mencionado anteriormente, para los puntos en los cuales se pudiese presentar afectación o en aquellos cuya ubicación sea menor a 100 metros respecto al área de diseño, se implementarán tanques de protección, con el objetivo de prevenir impactos en la calidad de los puntos y mantener la calidad del agua durante la etapa constructiva.

- Tanque de protección de puntos de agua

De forma posterior al cerramiento, sobre el punto de agua se recomienda construir (o rehabilitar) un tanque para protección, recolección y almacenamiento, cuyo esquema se muestra en la Figura 5-2.34. En la Figura 5-2.35 se muestra la localización de ese tanque a escala regional. Esta estructura permite almacenar temporalmente el agua del punto, optimizando el área de contacto exfiltración - captación, disminuyendo la evaporación del líquido y brindando protección por contaminación superficial, así como facilitando su captación para los usuarios ya existentes del recurso.

Teniendo en cuenta que los caudales de los afloramientos de puntos de agua son relativamente bajos (menores a 0.6 L/s en la mayoría de los puntos) y dado que la mayoría de los flujos de agua en la zona son someros o subsuperficiales, se plantea mejorar los puntos que se encuentren fuera del polígono de intervención de la obra y sus inmediaciones mediante la construcción o mejora de la estructura de protección del punto de agua, para incluso llegar a aumentar su caudal al mejorar las condiciones de permeabilidad del sustrato en el afloramiento.

La estructura de protección consiste en un tanque en bloque o concreto en el cual se almacenará el agua proveniente del punto de agua, tal como se muestra en la Figura 5-2.35. El diseño conceptual del tanque de protección se realizó con base en múltiples

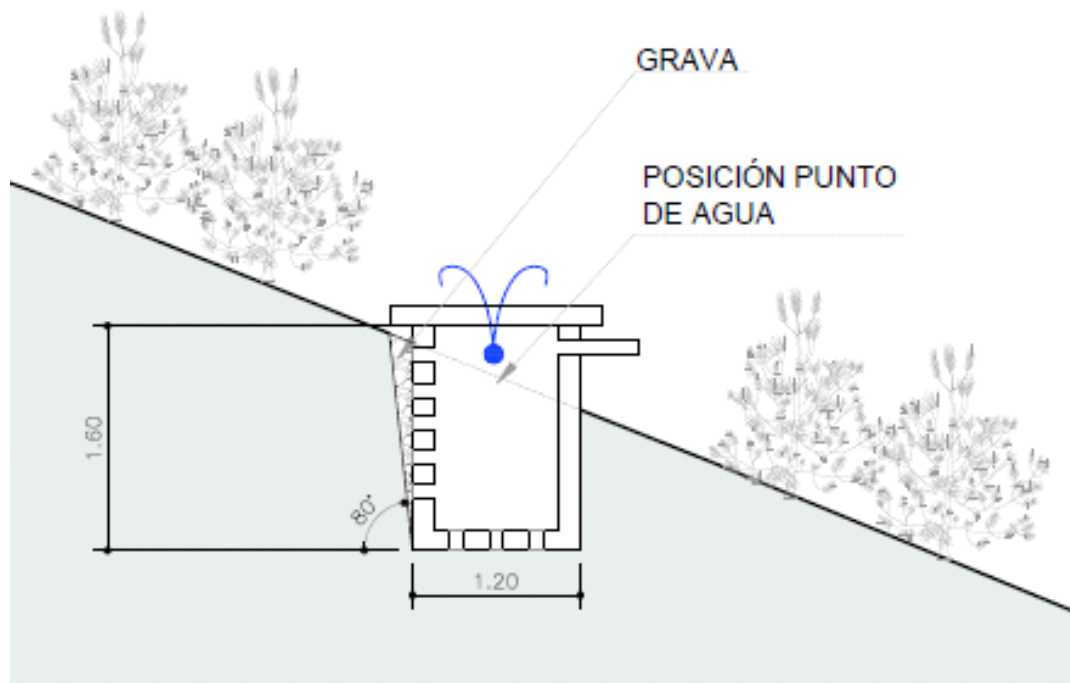
diseños encontrados en la literatura (Universidad de Pensilvania, 2007) y experiencias maduras en la implementación de sistemas de protección a afloramientos de puntos de agua.

Figura 5-2.34 Tanque para la protección de afloramientos de agua



Fuente: Adaptado de (<http://www.downtoearth.org.in/coverage/spring-in-a-box-49240>)

Figura 5-2.35. Tanque de concreto para almacenamiento del punto hidrogeológico.



Fuente: Hidrogeocol, 2018

- **Medidas de mitigación de impactos**

Para los puntos en los cuales se prevén impactos en el caudal, se hace necesario implementar medidas de mitigación del impacto. Conforme se realiza en la prevención, la principal medida de mitigación corresponde a mantener en la mejor condición posible el punto de agua, en términos de disminuir al máximo los cambios en caudal y calidad.

- **Repoblamiento vegetal**

La medida corresponde a la repoblación vegetal en el punto de agua, mediante la siembra o plantación de plantas nativas de la zona. En esta actividad se realizará un repoblamiento con especies nativas que mejoren la regulación hídrica superficial en las cercanías del punto de agua, dentro del área del cerramiento.

Las plantas incorporadas en esta zona permitirán una mayor protección del punto ante fenómenos de aumento de picos de la escorrentía superficial, compactación del sustrato, erosión del suelo y de forma adicional brindarán una segunda defensa ante la entrada de especies animales que puedan contaminar el punto.

Conforme se emplea repoblamiento vegetal en la mayoría de los puntos, se puede considerar esta medida como protección en algunos casos, especialmente cuando se aplica en puntos nivel 1, sobre los cuales no se esperan impactos a causa de las obras a realizar. Se prevé su aplicación en puntos nivel 1, 2 y/o 3.

Se recomienda utilizar para la siembra especies nativas, entre otras, sauce, aliso, romero, helecho, cordoncillo y las especies conocidas como “cola de caballo” y “rascadera”.

- **Captación, conducción y almacenamiento**

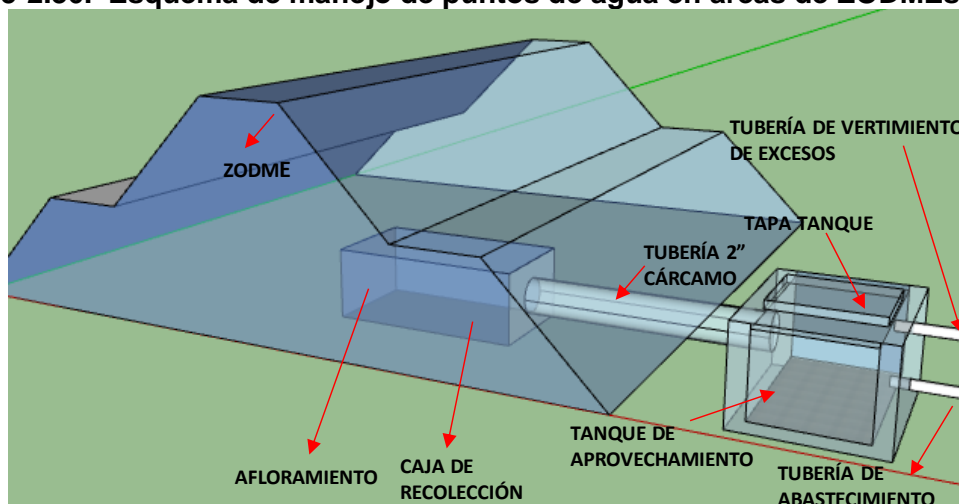
Debido a la existencia de puntos de agua en algunas de las áreas que se pretenden utilizar como ZODMEs, se ha requerido establecer una medida mediante la cual se trasladen dichos puntos a localizaciones viables en la periferia del ZODME, en donde pueda ser aprovechado al recurso.

En general, los puntos de agua existentes en las áreas de ZODMEs que se definieron, corresponden a flujos subsuperficiales y su uso está limitado a actividades agropecuarias. Por otra parte, los usos que se dan tienden a desaparecer ya que por iniciativa de los mismos propietarios al ofrecer los terrenos para su uso como ZODMEs las actividades agropecuarias ya no se realizarán en esa área.

Pese a lo anterior, los afloramientos de agua existentes al interior del perímetro del área establecida para ZODMEs, serán recuperados y trasladados para poder conservar los flujos naturales y para que sea viable su aprovechamiento en el caso de que el mismo propietario del predio o la comunidad aledaña conserven una franja de terreno explotable con respaldo en el aprovechamiento de este recurso.

En la Figura 5-2.36 se presenta un esquema conceptual de la implementación de la estructura de recuperación y traslado de un punto de agua localizado en un terreno donde se establecerá un área de ZODME.

Figura 5-2.36. Esquema de manejo de puntos de agua en áreas de ZODMEs.



Fuente: Geodata, 2018

- Construcción de talud de recolección y cruce de vía

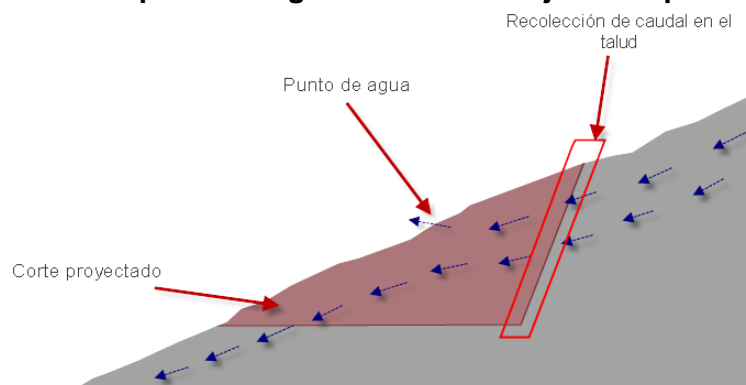
Esta medida corresponde a la construcción de una estructura de recolección de afloramientos de agua por goteo difuso. Mediante la estructura el caudal que fluye en un punto de agua es transportado a una nueva ubicación, manteniendo su caudal disponible a los usuarios registrados en los formatos FUNIAS en estos puntos.

Se prevé su aplicación para puntos nivel 3, es decir, aquellos ubicados en el polígono de intervención de la obra.

En la Figura 5-2.37 se muestran de forma esquemática los flujos en el suelo (antrópico, manantial, interflujo o resurgencia). Al realizar el corte de terreno, el agua que fluía en el medio seguramente aflorará en el talud, este flujo será transportado a un tanque en el pie del talud, para posteriormente ser dirigido a un tanque cruzando la vía, en donde se dispondrá el caudal a los usuarios.

Con base en el concepto de la reubicación del punto de agua, se muestra un perfil en la Figura 5-2.38 con la medida típica de captación de agua en talud, para reubicación de punto de agua. Se busca que, en contacto con el concreto lanzado contra el talud para estabilización geotécnica, el agua producto del drenaje subsuperficial caiga a un dren francés, desde el cual se proyecta una conducción hacia el sector de la vía aguas abajo; el cruce de la vía se realizará a través de una tubería dentro de las alcantarillas de la vía o a través de una tubería bajo la estructura de pavimento. En la figura se hace referencia al dren como un tanque colector, teniendo en cuenta que su función no es drenar agua sino almacenarla.

Figura 5-2.37 Corte en un punto de agua asociado a flujo subsuperficial

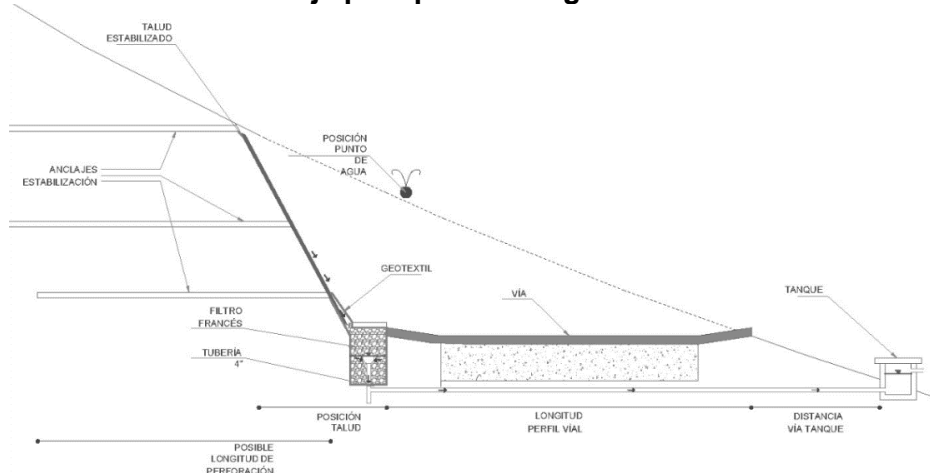


Fuente: Hidrogeocol, 2018

A partir del filtro francés el agua será conducida mediante tubería a una "T", en este accesorio el agua tendrá una conexión con el tanque de aguas abajo y de forma adicional con una tubería de descole que tendrá válvula en caso de requerirse. A través de la tubería de descole se realizará la limpieza de los sólidos sedimentables que pudieran pasar el filtro francés y colmatar la tubería.

De forma esquemática, en la Figura 5-2.38 se muestra el sistema de captación en el talud y paso al otro lado de la vía.

Figura 5-2.38. Medida de manejo para punto de agua con cruce de vía en tubería.



Fuente: Hidrogeocol, 2018

- **Medidas de Compensación**

En caso de que las medidas de protección y mitigación propuestas no sean suficientes a pesar de las acciones realizadas para proteger las fuentes aprovechables, se puede requerir implementar medidas de compensación que corresponden fundamentalmente a dos tipos de intervenciones. Las medidas únicamente se viabilizarán durante la

construcción de las obras y según se negocie y se determine un acuerdo con la comunidad. Con las medidas de protección y mitigación propuestas no se espera requerir medidas de compensación. Sin embargo, éstas se dejan propuestas en términos de contingencias durante el proceso constructivo de la vía, o por eventuales cambios en las condiciones de Línea Base evaluadas durante el Estudio.

- Conexión a acueductos veredales

La primera medida corresponde a implementar o mejorar la conexión al acueducto veredal o distrito de riego más cercano. Esto implica verificar con el proveedor las condiciones y nivel de servicio disponibles. El costo será el equivalente a una conexión domiciliaria que actualmente está alrededor de \$300.000 por punto de consumo. Para la conexión se tendrá en cuenta el levantamiento de redes existentes realizado como parte de este EIA.

- Conexión a otras fuentes puntuales

La segunda medida corresponde a implementar o mejorar la conexión a otra fuente de suministro de agua aledaña. Esto implica trasladar la conexión afectada hacia otro punto de agua disponible, lo cual se realizaría sobre puntos de agua cercanos ya identificados o incluso más aguas arriba de los límites del área de influencia. El costo de la intervención se determina en \$410.000 por conexión, suponiendo que se realice una adecuación en la obra de captación y una larga extensión en manguera.

- Otras medidas de compensación

Según sea necesario implementar medidas de compensación y de acuerdo con las condiciones de negociación con la comunidad, se propone considerar otras posibles medidas que pueden aplicarse en caso de no ser viables las dos medidas indicadas anteriormente.

- Sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.
- Traslado de bocatomas (proveedores locales).
- Mejora en sistemas de suministro y almacenamiento.
- Control de pérdidas en redes de distribución existentes.

Las medidas citadas requerirán para su implementación viabilidad técnica y económica avalada por parte del Concesionario.

- **Medidas asignadas a cada punto**

Con base en las características de cada punto, se asignaron las medidas correspondientes, como se muestra en la Tabla 5-2.22. En general a todos los puntos se les coloca medida de compensación, teniendo en cuenta que como se mencionó anteriormente, se espera que estas no sean requeridas en condiciones normales, si un punto no tiene usuarios, no se propone medida de compensación.

Tabla 5-2.20. Medidas de manejo discriminadas por punto

Punto Agua	Tipo de Punto	Obra más Próxima al Punto de Agua	Distancia H a la obra más próxima	Nivel de Afectación	Usuarios	Control	Protección			Mitigación			Compensación
(ID PA)	ID					Monitoreo	Demarcación Aislamiento	Zanja Perimetral	Tanque de protección	Repoblamiento Vegetal	Conducción y almacenamiento	Talud de recolección	como contingencia
UF1-PA01	Interflujo	ZODME 136	48	2	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No
UF1-PA11	Interflujo	Vía a cielo abierto	140	1	No	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA12	Resurgencia	Vía a cielo abierto	3	3	Si	Si	Si	No	No	Si	No	Si	Si
UF1-PA13	Resurgencia	Vía a cielo abierto	73	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Si
UF1-PA14	Interflujo	Vía a cielo abierto	27	1	Si	Si	Si	No	No	Si	No	Si	Si
UF1-PA15	Resurgencia	Vía a cielo abierto	154	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si
UF1-PA16	Resurgencia	Vía a cielo abierto	205	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si
UF1-PA17	Resurgencia	Vía a cielo abierto	262	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si
UF1-PA18	Interflujo	Vía a cielo abierto	171	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si
UF1-PA21	Resurgencia	Vía a cielo abierto	24	1	No	Si	Si	No	Si	Si	No	No	No
UF1-PA22	Interflujo	Vía a cielo abierto	43	2	S/I	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Si
UF1-PA23	Interflujo	Vía a cielo abierto	65	1	S/I	Si	Si	No	Si	Si	No	No	No
UF1-PA24	Resurgencia	Vía a cielo abierto	79	1	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Si
UF1-PA25	Interflujo	ZODME 144	≈100	1	Si	Si	Si	No	No	Si	No	No	Si
UF1-PA26	Resurgencia	ZODME 148	≈100	1	Si	No	Si	No	No	Si	No	No	Si
UF1-PA27	Resurgencia	Vía a cielo abierto	121	1	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No
UF1-PA28	Interflujo	Vía a cielo abierto	157	1	No	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA29	Interflujo	Vía a cielo abierto	202	1	No	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA30	Resurgencia	ZODME 144	2	2	No	Si	Si	No	Si	Si	Si	No	Si
UF1-PA31	Interflujo	ZODME 148	1	2	No	Si	Si	No	Si	Si	Si	No	Si
UF1-PA34	Interflujo	ZODME 118	77	1	No	Si	Si	No	No	Si	No	No	No
UF1-PA35	Resurgencia	Vía a cielo abierto	263	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	No

Punto Agua	Tipo de Punto	Obra más Próxima al Punto de Agua	Distancia H a la obra más próxima	Nivel de Afectación	Usuarios	Control	Protección			Mitigación			Compensación
(ID PA)	ID					Monitoreo	Demarcación Aislamiento	Zanja Perimetral	Tanque de protección	Repoblamiento Vegetal	Conducción y almacenamiento	Talud de recolección	como contingencia
UF1-PA36	Interflujo	Vía a cielo abierto	120	1	Si	No	Si	No	No	Si	No	No	No
UF1-PA37	Interflujo	Vía a cielo abierto	157	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si
UF1-PA38	Interflujo	Vía a cielo abierto	706	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA39	Interflujo	Vía a cielo abierto	648	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA40	Interflujo	Vía a cielo abierto	219	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA41	Manantial	Vía a cielo abierto	326	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA42	Interflujo	Vía a cielo abierto	356	1	No	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA43	Interflujo	ZODME 124	172	1	No	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA44	Interflujo	Vía a cielo abierto	146	1	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA101	Resurgencia	Vía a cielo abierto	37	2	No	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA104	Interflujo	Vía a cielo abierto	7	3	No	No	No	No	No	No	No	No	No
UF1-PA105	Resurgencia	ZODME 148	186	1	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No
UF1-PA106	Interflujo	Vía a cielo abierto	2	3	No	No	No	No	No	No	No	No	No

Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.10 Caracterización hidrogeológica específica Túnel Pamplona

5.1.8.10.1 Datos generales del túnel

Se trata de un túnel bidireccional de dos carriles con galería de emergencia, que se desarrolla entre las progresivas PK58+745 a PK60+075, en una longitud total de 1330.6 m, con una pendiente constante del 4,4%. La velocidad de diseño del túnel Pamplona es de 60 km/h, con dos sobreeanchos de vía de 0.5 m y bermas externas de 1.0 m (Figura 5-2.39). Se ubica al norte de la ciudad homónima, al final del trazado de la unidad funcional 1 (Figura 5-2.40). En la Tabla 5-2.21 se reportan los datos generales del túnel Pamplona.

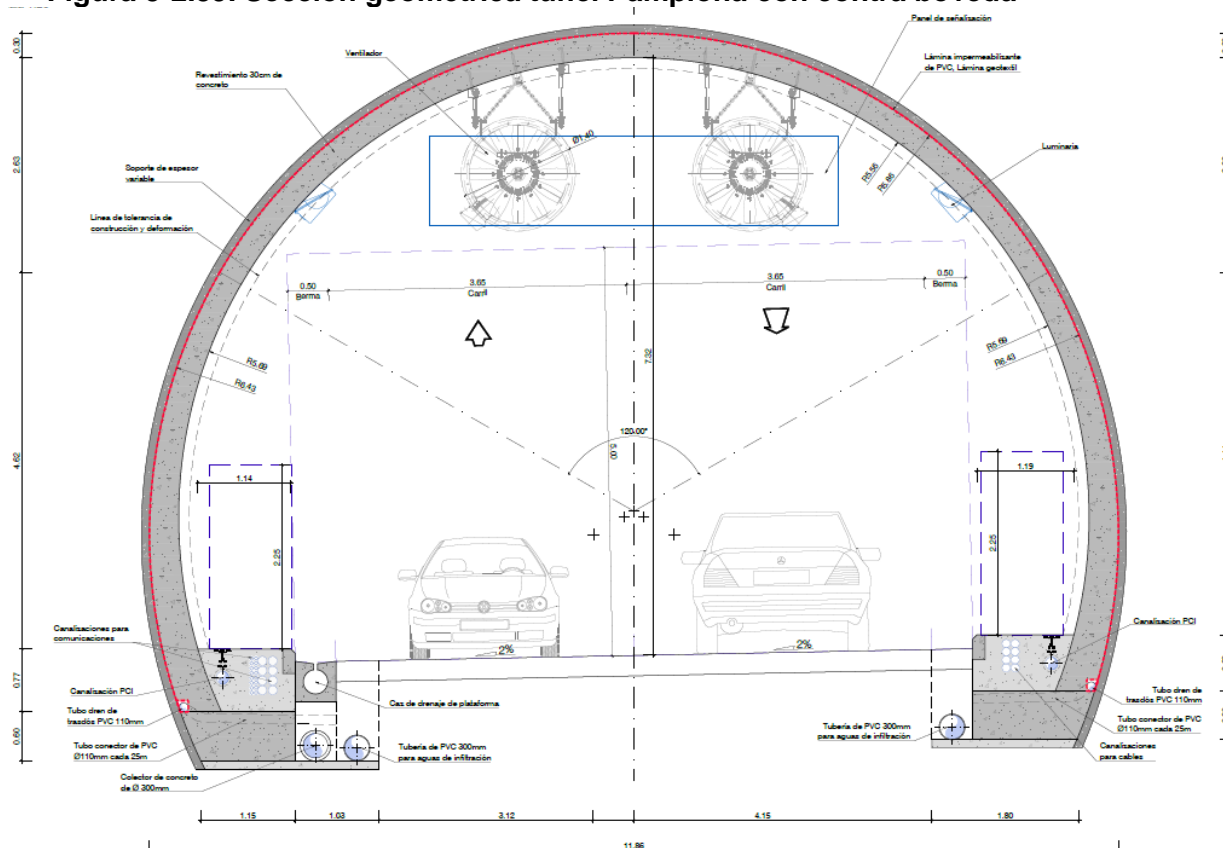
Tabla 5-2.21. Datos generales del Túnel Pamplona

Túnel	Abscisa (m)		Longitud (m)
	Inicio	Fin	
Pamplona	PK58+745.00	PK60+075.36	1330.36

Fuente: Elaboración propia, 2018

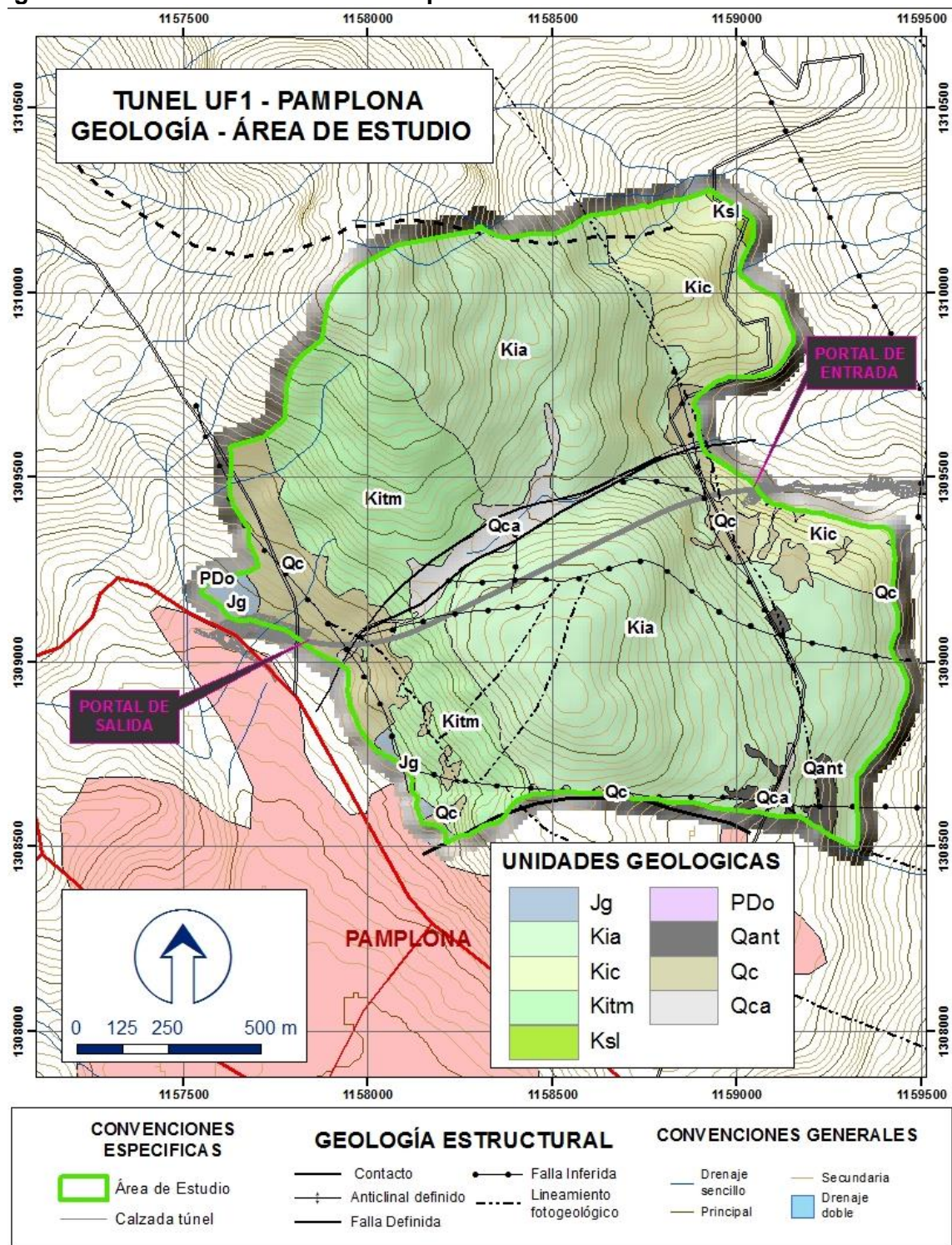
En la **Figura 5-2.39** se indica la sección geométrica del túnel Pamplona con contra bóveda e impermeabilización del revestimiento definitivo.

Figura 5-2.39. Sección geométrica túnel Pamplona con contra bóveda



Fuente: Sacyr construcción, 2018

Figura 5-2.40. Localización túnel Pamplona

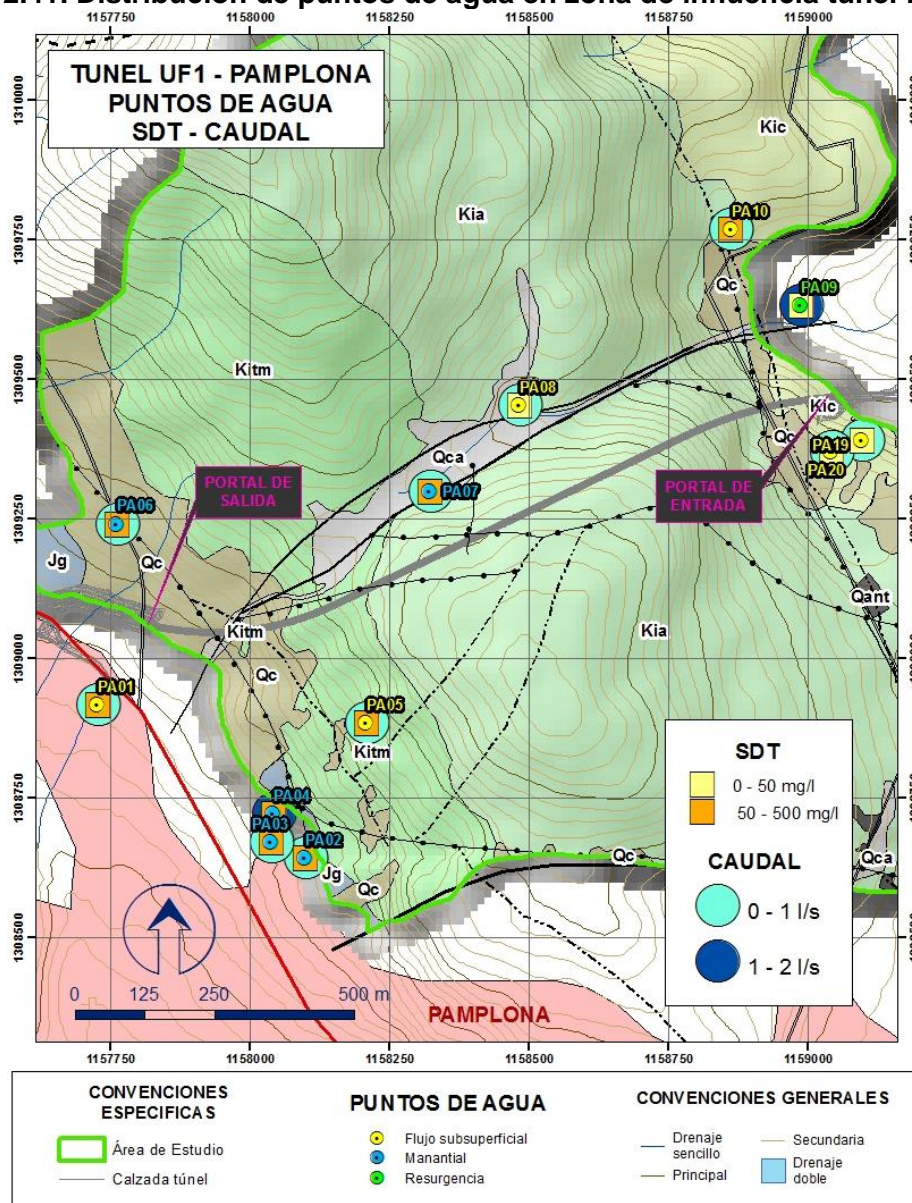


Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.10.2 Análisis hidrogeológico de los puntos de agua inventariados

Durante el desarrollo de los estudios de la UF1 se han inventariado y monitoreado los puntos de agua presentes al interior de las cuencas interceptadas por el túnel Pamplona. Han sido inventariados 13 puntos de agua que se distribuyen en las laderas de las colinas que bordean el trazado del túnel. En particular los puntos de agua se ubican a lo largo de las vertientes oriental y occidental que a su vez coinciden con los portales homónimos, así como a lo largo del único valle que cruza la montaña de oeste a este (Figura 5-2.41).

Figura 5-2.41. Distribución de puntos de agua en zona de influencia túnel Pamplona.



Geodata, 2018.

Aparentemente, la red hidrográfica de menor orden se encuentra poco desarrollado y se activa especialmente durante los eventos de mayores precipitaciones. Mientras que los puntos de agua, de acuerdo con la información suministrada por los habitantes del sector, se caracterizan por ser en su mayoría perennes, aunque el caudal sea generalmente bajo ($Q < 1 \text{ l/s}$), salvo un par de excepciones en donde se tienen caudales mayores a 1 l/s (Tabla 5-2.22 y Figura 5-2.41).

Tabla 5-2.22. Datos de información de base relacionada con los puntos de agua inventariados y monitoreados en el sector del túnel Pamplona.

ID	Tipo de Punto	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Físicoquímicos				Redox-Eh/	T°C Redox
				PH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	SDT (mg/l)		
UF1-PA02	Manantial	nov-17	0,221	8	390	19,3	190	124	17,9
		abr-18	0,352	7,4	390	16,7	200	129	16,6
		may-jun/18	-	7,2	358	17,4	190	-	-
UF1-PA03	Manantial	nov-17	0,214	7,9	400	17,6	200	165	17,5
		abr-18	0,212	7,5	430	16,8	210	72	16,6
		may-jun/18	-	8	385	16,6	204	-	-
UF1-PA04	Manantial	nov-17	1,029	7,6	350	16,9	170	192	16,8
		abr-18	1,1	7,4	390	16,7	190	136	16,4
		may-jun/18	-	7,3	343	16,4	182	-	-
UF1-PA05	Interflujo	nov-17	0,157	7,8	150	15,7	70	318	15,5
		abr-18	0,177	7,8	170	15,5	80	127	15,2
		may-jun/18	-	7,2	152	14,7	81	-	-
UF1-PA06	Manantial	nov-17	0,011	7,5	80	18,4	40	86	18,5
		abr-18	0,04	7,6	560	17,5	280	58	16,9
		may-jun/18	-	7,3	712	19,5	378	-	-
UF1-PA07	Manantial	nov-17	0,313	7,5	163	16,9	82	189	15,9
		abr-18	0,449	6,9	190	16,1	100	227	15,1
		may-jun/18	-	6,9	188	15,8	100	-	-
UF1-PA08	Interflujo	nov-17	0,172	5,5	20	15,8	10	401	16,2
		abr-18	0,544	5,4	30	14,5	10	261	14,2
		may-jun/18	-	5,9	21	14,2	11	-	-
UF1-PA09	Resurgencia	nov-17	2,211	6	45	18,7	22	289	18,7
		abr-18	2,116	6,5	40	16,9	20	149	16,7
		may-jun/18	-	6,8	39	15,9	21	-	-
UF1-PA10	Interflujo	nov-17	0,148	7,2	136	16,2	72	64	16,2
		abr-18	0,36	6,7	120	16,8	60	30	16,4
		may-jun/18	-	7	108	15,5	57	-	-
UF1-PA19	Interflujo	nov-17	0,085	4,6	33	15,7	10	330	15
		abr-18	0,268	4,3	30	15,2	20	341	15,1

ID	Tipo de Punto	Fecha	Caudal (l/s)	Parámetros Físicoquímicos				Redox-Eh/	T°C Redox
				PH	CE (µs/cm)	T (°C)	SDT (mg/l)		
		may-jun/18	-	4,6	26	16,6	14	-	-
UF1-PA20	Interflujo	nov-17	0,065	5,1	20	14,4	10	151	14,2
		abr-18	0,088	4,3	30	14,2	10	266	14,1
		may-jun/18	-	5,3	18	14,8	10	-	-
UF1-PA102	Interflujo	43435	0,16	7,57	224	14,7	112	-	-
UF1-PA103	Resurgencia	43435	-	7,5	340	17,3	167	-	-

Fuente: Geodata, 2018

Los datos de los parámetros físicoquímicos obtenidos en el terreno y reportados en la Tabla 5-2.22, indican valores de conductividad eléctrica relativamente bajos y en su gran mayoría comprendidos entre 18 y 712 microS/cm, evidenciando en general la presencia de flujos cortos con poca interacción con la matriz sólida del acuífero. También los datos de temperatura no indican anomalías térmicas particulares.

La correlación entre CE y mineralización del agua en términos de STD (Sólidos Totales Disueltos) indican que el agua muestreada se clasifica en su totalidad como agua poco mineralizada ($STD \leq 50$ mg/l) y agua mineral ($50 < TDS \leq 500$ mg/l); el valor máximo medido es de 378 mg/l. Las mediciones de actividad redox indican un ambiente oxidante ($Eh > 0$ mV).

En la Figura 5-2.41 se muestra la distribución de los puntos de agua en relación con su mineralización (STD) y caudal (l/s). Se nota como no se evidencia una relación aparente entre la mineralización del agua y los caudales medidos en cada punto. Sin embargo, hay sectores caracterizados por aguas cuya interacción con la roca/terreno en los cuales fluyen resulta más evidente, por lo que se han sobrepuesto los datos de mineralización con el marco geológico/geoestructural con el fin de verificar posibles interacciones con el substrato rocoso y zona de fallas/fracturas observadas en el terreno. Los resultados se pueden ver en la misma Figura 5-2.41 y son analizados en los párrafos siguientes.

Cinco puntos ubicados en la zona de influencia del túnel Pamplona han sido muestreados y analizados por laboratorios certificados por el IDEAM. Estos corresponden con los puntos de agua denominados UF1-PA02, UF1-PA05, UF1-PA07, UF1-PA09 y UF1-PA10 reportados y analizados en el capítulo de clasificación hidrogeoquímica (5.1.8.7.4). Se trata en todos los casos de agua con tiempos de circulación relativamente bajos, tal como lo sugiere el bajo contenido de Cl (< 5 mg/l).

En el diagrama de Piper que se ilustra en la Figura 5-2.21 (capítulo 5.1.8.7.4), se reportan los resultados de los análisis realizados, incluidos aquellos puntos de agua muestreados en el sector de la vía a cielo abierto de la UF1. En el correspondiente capítulo de clasificación hidrogeoquímica se indica que los puntos de agua observados en la zona del túnel presentan una gran variedad de concentraciones en casi todos los elementos descritos, indicando una circulación muy variable influenciada por un flujo que podría representar recorridos a lo largo de las distintas formaciones geológicas presentes (Ortoneis, Formación

Girón, Fm Aguardiente, Fm Tibú-Mercedes, Formación Capacho, depósitos cuaternarios), así como a través de las fracturas, fallas y posibles elementos estructurales que permiten una rápida mezcla entre diferentes acuíferos.

Tal condición se encuentra bien evidenciada en la Figura 5-2.41 donde se presenta el marco geológico-estructural. Se observa como los puntos de agua se encuentran generalmente alineados a lo largo de las zonas de fallas principales, aunque siempre se debe tener en cuenta el efecto morfológico que las propias estructuras otorgan a la topografía, como valles, zonas de depresión, pendientes, donde en la mayoría de los casos se depositan sedimentos cuaternarios que dado su tamaño y espesor pueden albergar flujos someros (subsuperficiales) en grado de alimentar por si solos un punto de agua. Dependiendo del régimen de precipitaciones y permeabilidades locales, estos flujos se pueden mezclar con flujos en roca un poco más profundos dando lugar en algunos casos a flujos mixtos (flujos subsuperficiales + flujos en roca).

Por otro lado, tal como se indica en el capítulo de clasificación hidrogeoquímica, los índices de saturación respecto a la anhidrita, yeso, dolomita y calcita indican una condición general de bajo saturación (<0). Este elemento indica que las aguas no han tenido suficiente tiempo dentro del acuífero para reaccionar con este, y se pueden definir como inmaduras desde el punto de vista hidrogeoquímico. Esta característica se ha confirmado considerando otros parámetros de los puntos de agua como la concentración de CL y el potencial redox, el cual indica condiciones oxidantes en todos puntos de agua ($Eh > 0$).

A continuación, los puntos de agua para los cuales se dispone de los resultados de análisis químico se describen en detalle distinguiendo los sectores donde emergen con características específicas.

- **Puntos de agua UF1-PA02, UF1-PA03 y UF1-PA04**

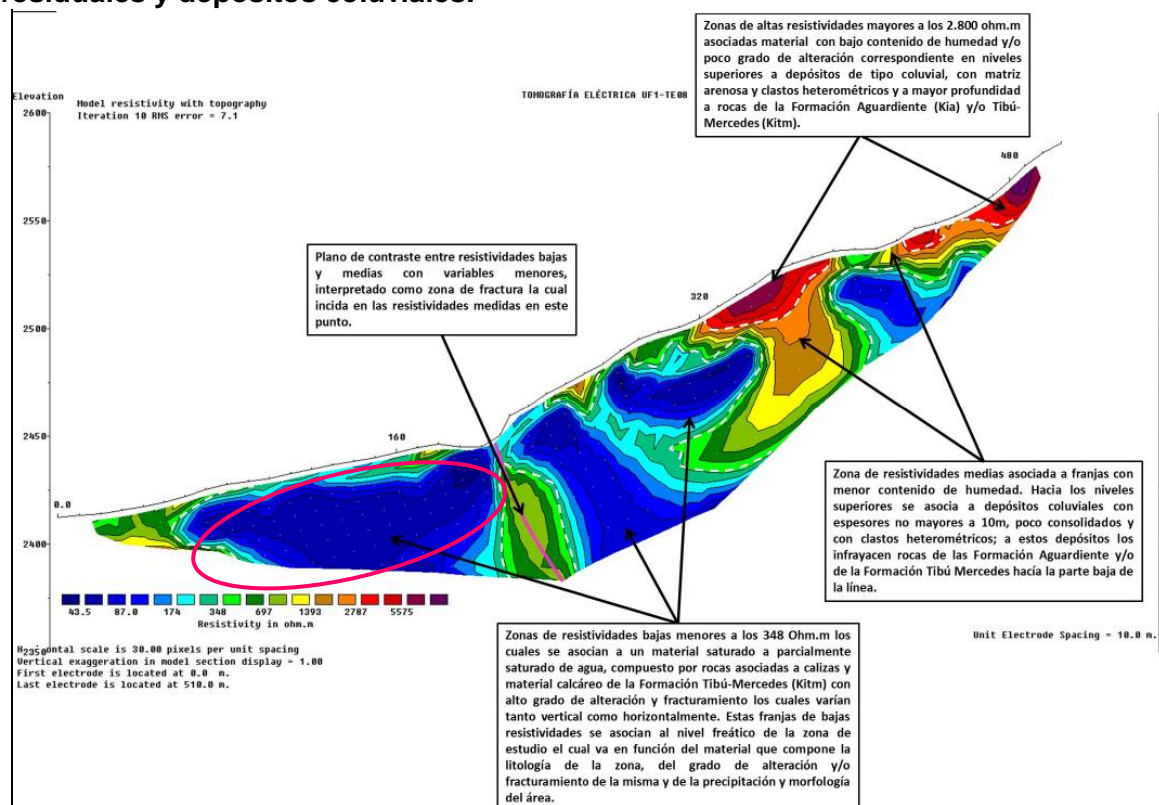
Este grupo de puntos de agua nacen en el sector SW del área de estudio, en las laderas de la montaña al interior de la cual será excavado el túnel de Pamplona. En este sector se tiene un afloramiento espeso de depósitos coluviales tal como lo evidencian los sondeos UF1-S21 y UF1-S21A. Se trata de terrenos con matriz areno-arcillosa a veces constituidos por gravas inmersas en matrices arenosas o arcillosas. Que reposan sobre un potente estrato de suelos residuales de composición dominante limo-arcillosa que pasan localmente a arenosa. Este conjunto constituye un acuífero somero permeable de porosidad primaria de grado medio a medio – alta.

Desde un punto de vista estructural los puntos de agua se alinean a lo largo de la zona de falla que discurre en sentido NW-SE, transversales al túnel, que pone en contacto los terrenos cretácicos y el basamento jurásico. Los datos estructurales indican que, en este sector, existe la intersección con una falla regional con una tendencia E-W. Por lo tanto, es posible que el agua procedente de los puntos inventariados sean el resultado de un fenómeno de mezcla de aguas someras o subsuperficiales que circulan al interior de los depósitos no consolidados con flujos en roca que se desarrollan a lo largo de las zonas de falla y/o de fracturación principal (flujos mixtos).

Los análisis químicos realizados del punto UF1-PA02 muestra una facies hidroquímica Ca-(HCO₃) y valores de STD (Sólidos Totales Disueltos) de los tres puntos son relativamente importantes teniendo en cuenta los valores reportados para la zona de estudio.

La presencia de un acuífero somero o subsuperficial es además puesta en evidencia a través de la prospección geoelectrica UF1-TE8 (Figura 5-2.42), en la cual resulta evidente la presencia de una amplia zona de baja resistividad (probablemente saturada o parcialmente saturada) a lo largo del sector de la ladera que discurre hacia el fondo del valle. La zona de saturación continúa en profundidad alcanzando el substrato que infrayace los depósitos cuaternarios.

Figura 5-2.42 Investigación geoelectrica UF1-TE08. Se destacan con óvalos en color rojo los sectores en los cuales se desarrollan circuitos someros al interior de suelos residuales y depósitos coluviales.



Fuente: Geodata, 2018

El conjunto de datos a disposición indica que este grupo de puntos de agua son alimentados principalmente por el acuífero que se desarrolla al interior de los espesos depósitos de ladera, los cuales al parecer reciben una contribución de los flujos en roca a través de la zona de falla o zona más fracturada.

- **Punto de agua UF1-PA05**

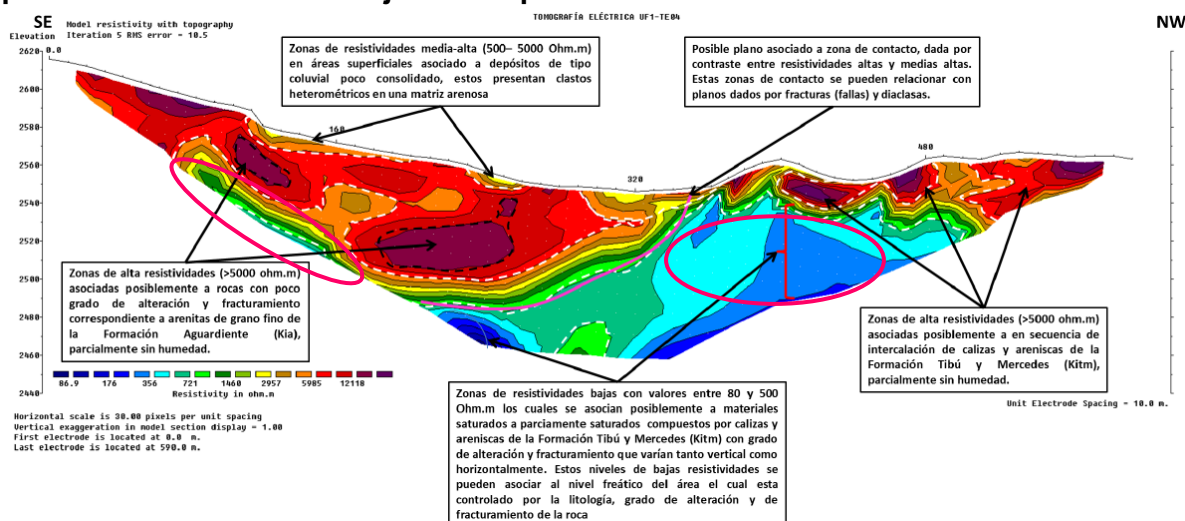
El punto de agua UF1-PA05 se ubica a lo largo de la misma ladera, pero a una cota superior. Nace en un sector en el que afloran los litotipos pertenecientes a la Formación Tibú-Mercedes compuesta en este sector principalmente por areniscas de grano grueso, areniscas cuarzosas, calizas densas, conglomerados, así como shales y areniscas de grano fino, arcillolitas carbonosas y lodolitas.

En particular, como lo evidencia el sondeo UF1-S19, en este sector la secuencia litoestratigráfica está específicamente representada por calizas, areniscas y conglomerados intercalados con niveles de arcillolitas.

Los datos de los análisis químicos evidencian para este punto de agua una facies hidroquímica Ca-Mg-(HCO₃) y una marcada degradación de los carbonatos como se observa en el gráfico de correlación entre los iones Ca²⁺⁺Mg versus SO₄²⁻+HCO₃ en meq/l (ver diagrama en la Figura 5-2.23 del capítulo 5.1.8.7.4).

Por lo tanto, es posible que el agua del punto UF1-PA05 sea, aunque en mínima parte, alimentado por circuitos que se enriquecen al interior del substrato rocoso y en particular a lo largo de los niveles de calizas que pueden estar sujetos a disolución (pseudocarsismo y/o microcarsismo); sin embargo, la línea UF1-TE04 (Figura 5-2.43) ha individualizado sectores de resistividad media a alta separados de zonas más resistivas (probablemente saturados o parcialmente saturados) que pudieran estar indicando una separación de flujos subsuperficiales de aquellos en roca.

Figura 5-2.43 – Investigación geoelectrica UF1-T04, se destacan con óvalos en color rojo los sectores en los cuales se desarrollan circuitos en el substrato rocoso al parecer no conexos con flujos subsuperficiales.



Fuente: Geodata, 2018

Por lo que el caso del UF1-PA05, la contribución principal de alimentación del punto de agua es atribuibles a los flujos subsuperficiales aún si al parecer no se observe un acuífero superficial particularmente significativo como también lo indica el poco caudal medido ($Q < 0,2$ l/s). La degradación de los carbonatos puestos en evidencia por el análisis químico podría estar relacionados con la presencia de depósitos coluviales presentes en superficie de litotipos y terrenos derivados de la alteración de la roca calcárea que forma parte de la Formación Tibú-Mercedes.

- **Punto de agua UF1-PA07**

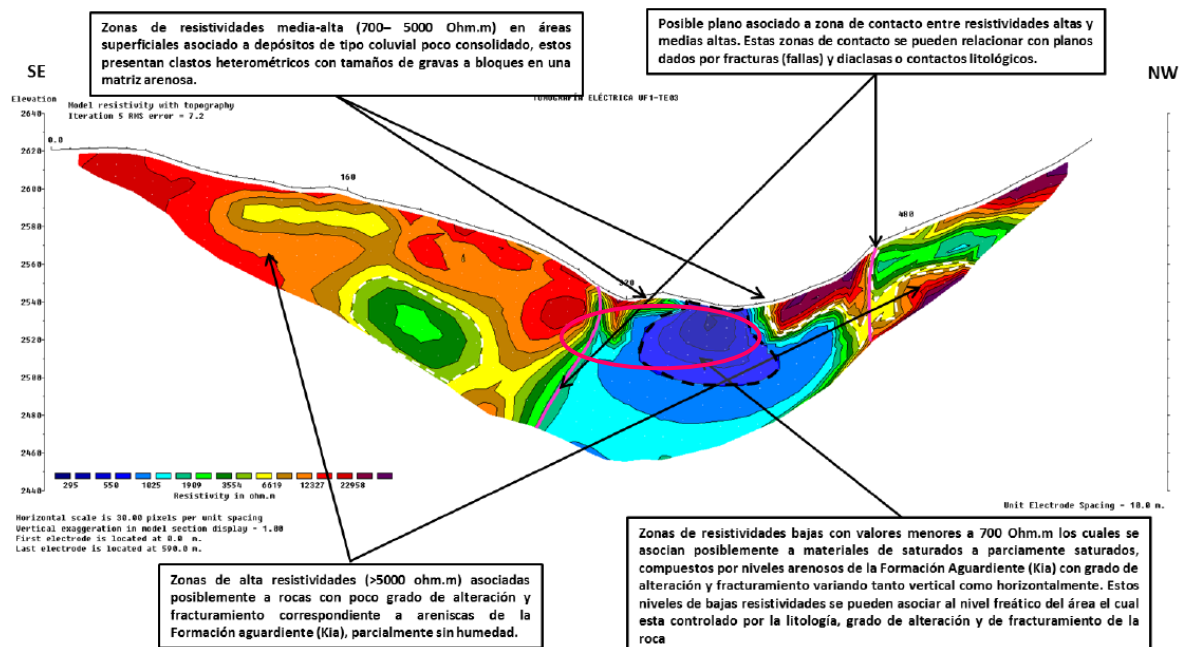
El punto de agua UF1-PA07 nace en el sector del valle que forma una silla estructural paralela al túnel. Tal morfología se encuentra conexas con el complejo marco estructural del macizo rocoso. En particular, la presencia de una franja de deformación frágil con tendencia E-W que se ubica al interior de los litotipos principalmente arenosos-carbonáticos que constituyen la Formación Aguardiente y Tibú-Mercedes.

Este sector también se caracteriza por la presencia de un colchón de depósitos coluvio-aluviales producto de la degradación de los litotipos del substrato cretácico y de la presencia de un retículo hidrográfico secundario de tipo al parecer efímero.

Los análisis realizados sobre el agua muestreada en el punto de agua UF1-PA07 evidencia una facies hidroquímica en la que se destaca la presencia de Cl y SO₄ entre los aniones y de Ca entre los iones (ver capítulo 5.1.8.7.4). Esto podría estar relacionado con la disolución de materiales de yeso que pueden estar presentes en el substrato rocoso y/o en los depósitos que derivan de su alteración.

La presencia de una zona potencialmente acuífera en el sector del fondo del valle se evidencia también por las investigaciones geoeléctricas realizadas. En particular la línea UF1-TE03 (Figura 5-2.44) muestra un sector de baja resistividad que podría corresponder al acuífero alojado en los depósitos cuaternarios y en el terreno de alteración y fallamiento del substrato arenoso que conforma la zona de falla. Los flujos que se desarrollan en su interior parecen estar confinados por las superficies de falla que pueden jugar un rol de barreras para los flujos transversales, pero como límite alimentador para los circuitos longitudinales a lo largo del rumbo de la zona de falla.

Figura 5-2.44 – Investigación geoelectrica UF1-TE03. Se destacan con un óvalo de color rojo los sectores en los cuales se desarrollan los circuitos hídricos en el sector del fondo del valle.

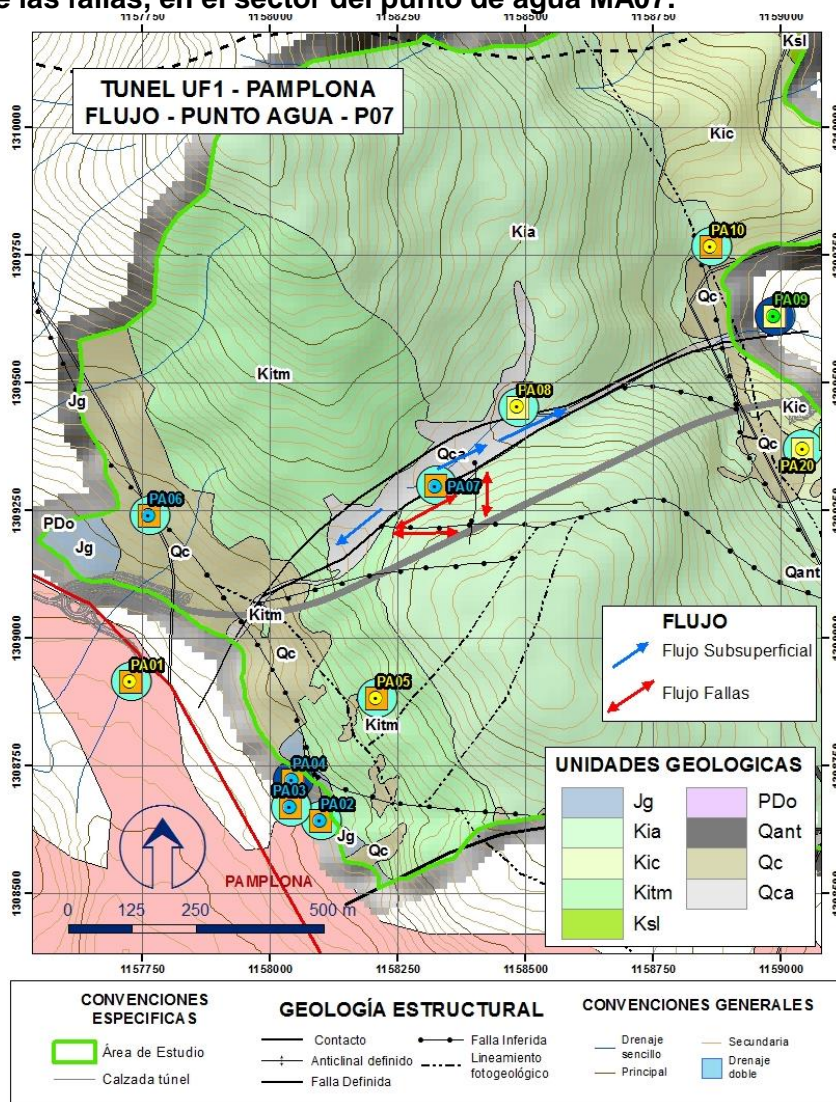


Fuente: Geodata, 2018

Por lo antes indicado se concluye que el punto de agua UF1-MA07 se alimenta de circuitos que se desarrollan en los depósitos cuaternarios y en la cuenca de alimentación ubicada a ambos lados de la silla estructural en la cual nace el punto de agua, con una contribución de circuitos en roca (flujos mixtos).

El complejo retículo geoestructural de este sector podría conectar el túnel en profundidad con la zona potencialmente acuífera lateralmente y ubicada a lo largo del fondo del valle que da lugar al nacimiento del punto de agua UF1-PA07 y UF1-PA08. En la Figura 5-2.45 se muestra el complejo sistema de flujos a lo largo de las fallas que podrían conectar el túnel con los circuitos de flujo que alimentan particularmente el punto UF1-PA-07.

Figura 5-2.45 – Hipótesis de esquema de flujo de circuitos subsuperficiales y en roca a lo largo de las fallas, en el sector del punto de agua MA07.



Fuente: Geodata, 2018

- **Punto de agua UF1-PA09**

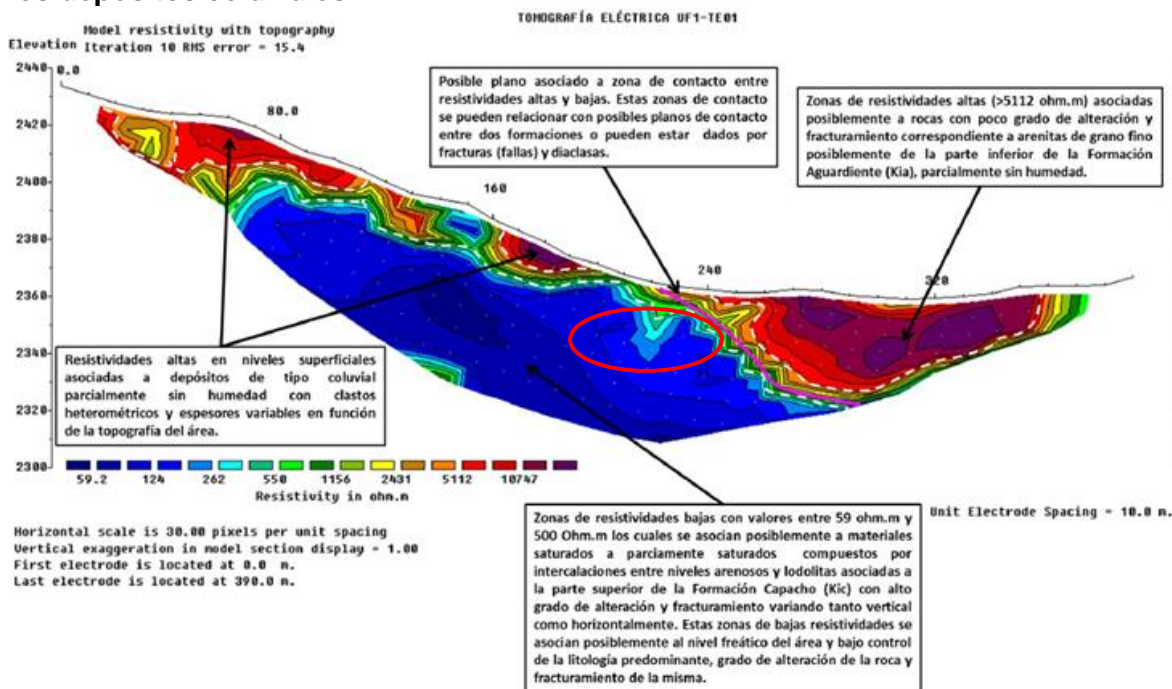
El punto de agua UF1-PA09 se forma dentro de un sector relativamente plano caracterizado por depósitos cuaternarios aluviales y coluviales. El agua muestreada indica una baja mineralización (STD=22 mg/l) y un caudal importante ($Q > 2 \text{ l/s}$).

La facies Ca-(Cl-HCO₃) evidencia una alimentación de parte de circuitos subsuperficiales que se desarrollan al interior de depósitos coluvio-aluviales. Estos constituyen cuerpos de espesores del orden de 15 m o más, tal como evidenciado por el sondeo UF1-S15.

No se evidencian elementos que indiquen una alimentación importante de parte de circuitos en roca que en este sector están conformados por la Formación Capachos (Kic).

La presencia de un delgado acuífero presente en los depósitos coluviales se puede deducir también analizando los resultados de las investigaciones geoelectricas realizadas en este sector. En particular la línea UF1-TE01 indica una franja superficial de resistividad decreciente en correspondencia con el sector deprimido cerca donde emergen los puntos de agua UF1-PA09 y UF1-PA10 (Figura 5-2.46).

Figura 5-2.46 – Investigaciones geoelectricas UF1-TE01. Se evidencia con un óvalo en color rojo los sectores en los que una disminución de la resistividad podría estar representando la presencia de circuitos subsuperficiales desarrollados al interior de los depósitos coluviales.



Fuente: Geodata, 2018

Del examen de la tomografía eléctrica, es evidente el rol hidrodinámico de la zona de falla geológica que tiende a aislar tramos del substrato saturado (baja resistividad) de otros que al parecer se encuentran poco o nada saturados (alta resistividad). Como en el caso de la sección analizada precedentemente (UF1-TE3), la falla podría ser considerada como estructura impermeable a los flujos transversales a ella, pero que podría favorecer los flujos que se desarrollan a lo largo de su rumbo.

- **Punto de agua UF1-PA11**

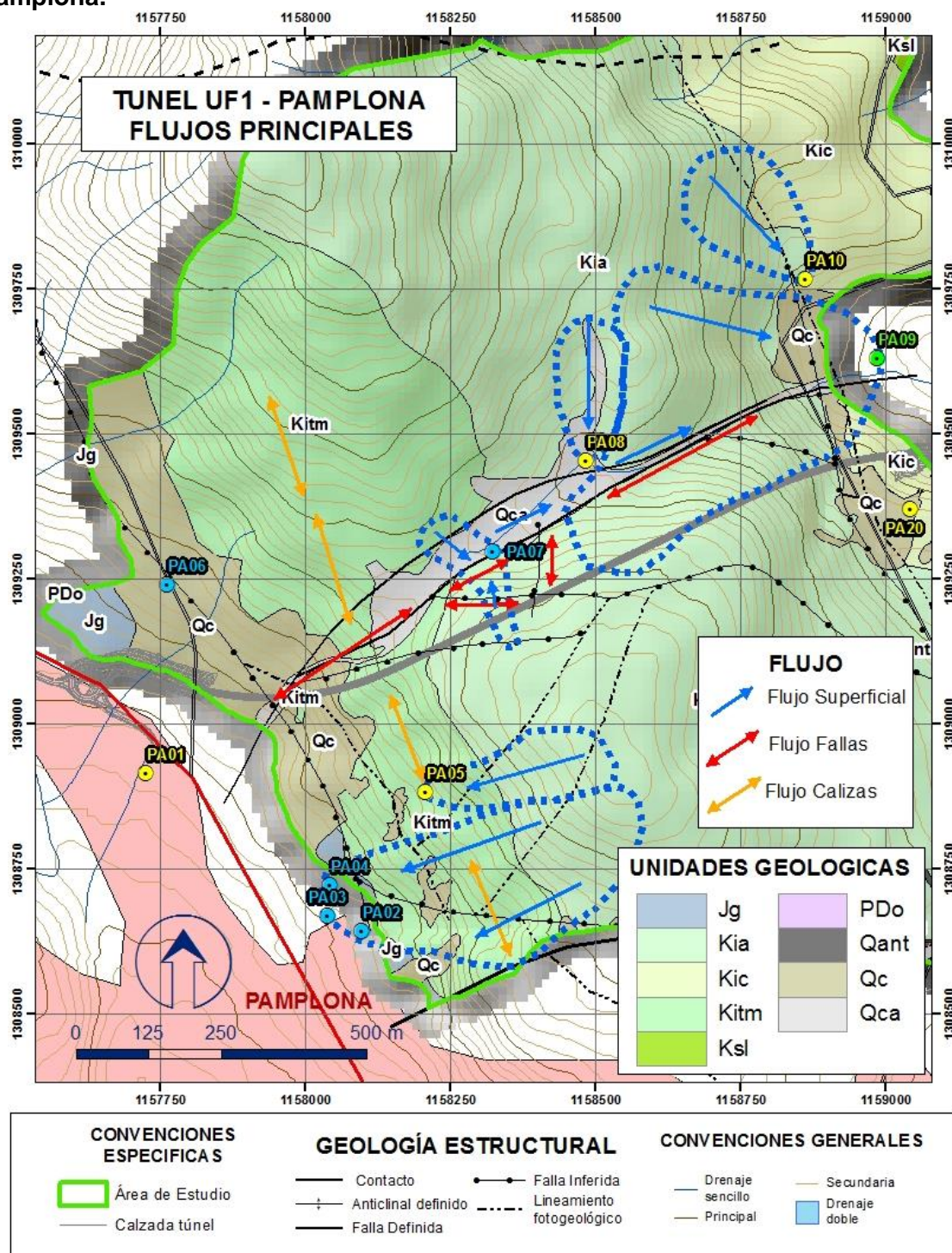
El punto de agua UF1-PA11 emerge a lo largo de la misma ladera donde nace el punto de agua UF1-PA10 pero un poco más arriba, con un caudal más bajo ($Q < 0,5$ l/s) y una mineralización ligeramente mayor (STD_72 mg/l).

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, el agua muestreada presenta una facies carbonato-cálcica ((Ca-(HCO₃))) típica de circuitos someros o subsuperficiales. También en este caso no se evidencia una alimentación significativa de parte de los circuitos en roca. La cuenca de alimentación resultaría, por lo tanto, constituida por lentes de materiales coluviales que recubren el substrato rocoso y que en este sector resultan de espesor reducido. Este elemento justifica el poco caudal medido durante el monitoreo de campo.

Finalmente en la Figura 5-2.47 se muestra el esquema de los flujos que pueden estar presentes o interactuado en inmediaciones del túnel Pamplona.

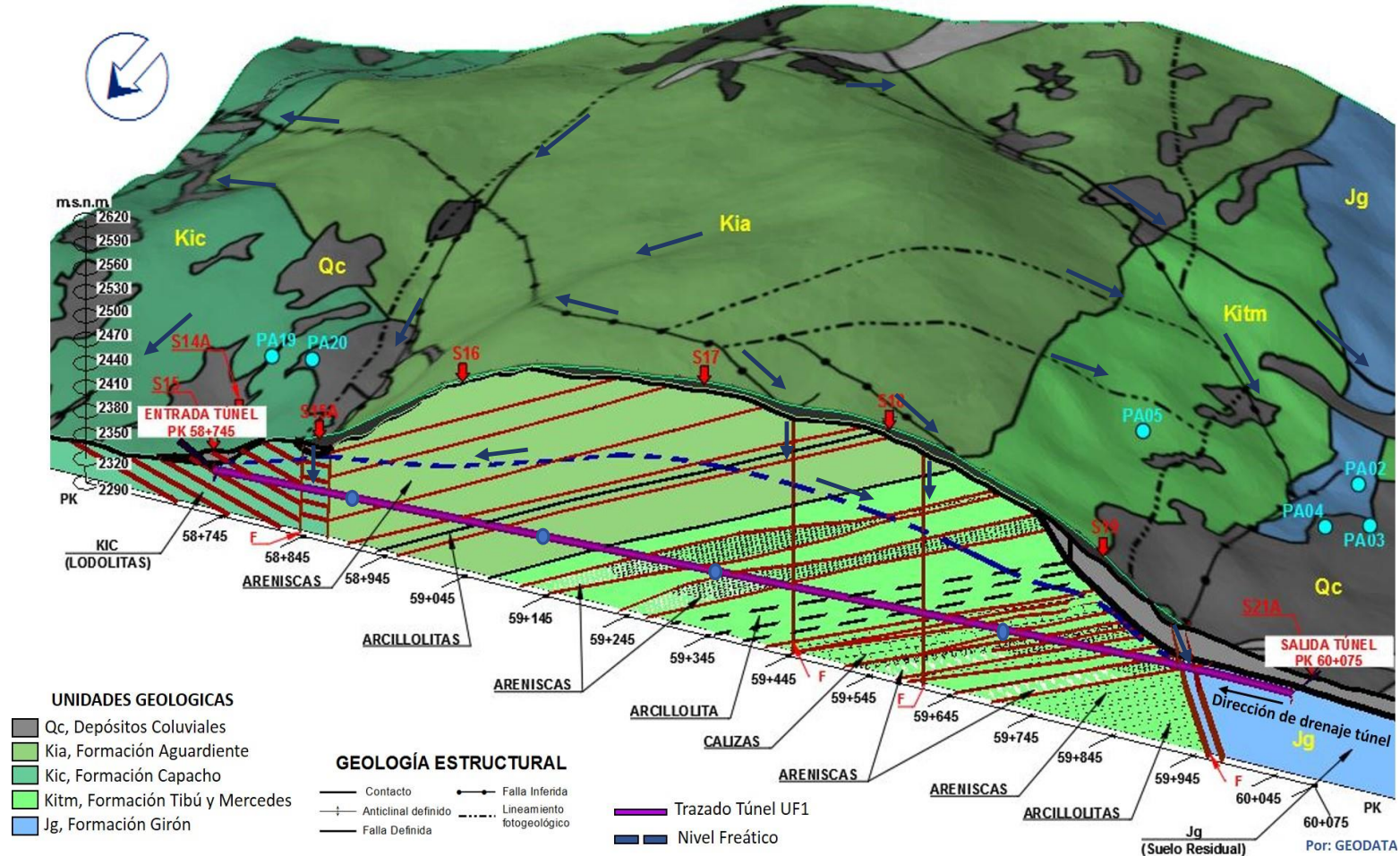
En la Figura 5-2.48 se muestra el bloque-diagrama que ilustra las principales características geológicas e hidrogeológicas del túnel Pamplona.

Figura 5-2.47 – Sistemas de flujo principales identificados en el sector del Túnel Pamplona.



Fuente: Geodata, 201

Figura 5-2.48 Perspectiva tridimensional del Túnel Pamplona. Entorno geológico e hidrogeológico.



Fuente: Geodata, 2018.

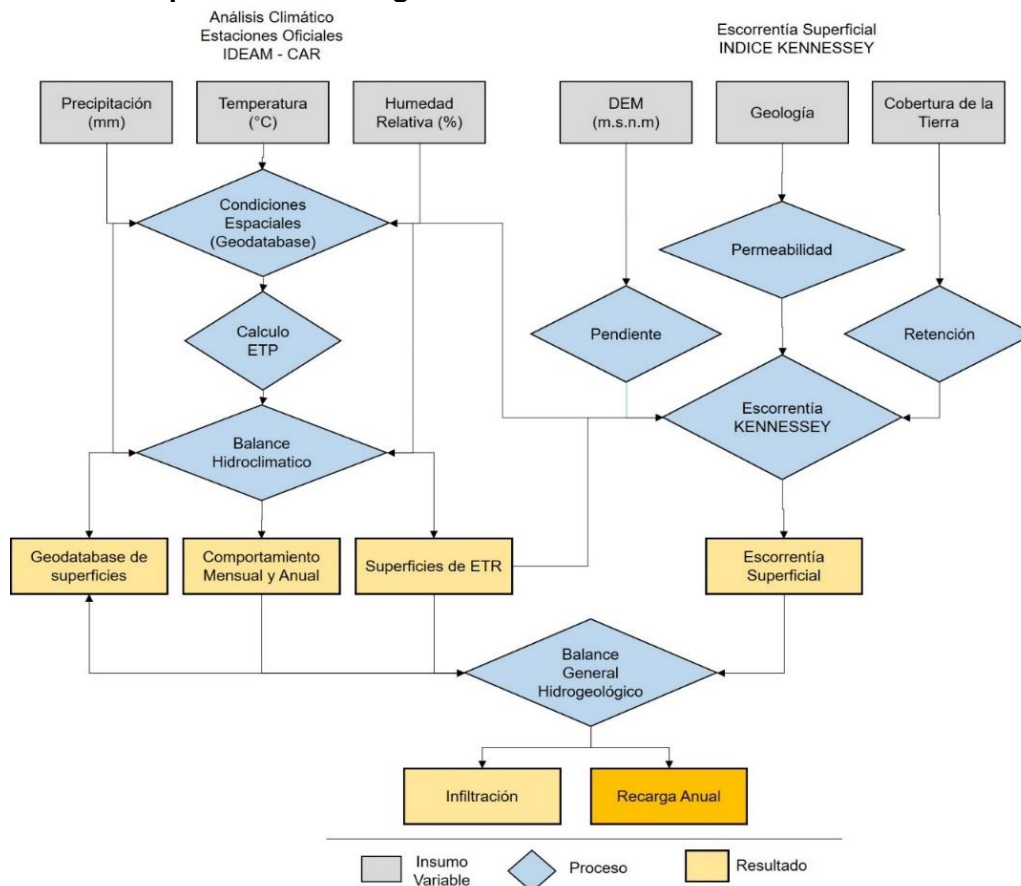
5.1.8.10.3 Valoración de la recarga túnel Pamplona

En este capítulo se desarrolla la metodología para el cálculo de la recarga esperada sobre el área de estudio que envuelve el trazado del Túnel Pamplona (UF1). Incorporando el análisis climático medio anual de manera particular para la zona del túnel a partir de estaciones climáticas oficiales y su comportamiento espacial y Multitemporal. Las condiciones de escorrentía superficial son abordadas a partir de la metodología Kennessey, caracterizando la Permeabilidad, la cobertura vegetal y la pendiente.

- **Metodología Empleada**

Se describe a continuación la metodología implementada para el análisis de recarga, incluyendo los análisis climáticos necesarios sobre las áreas de estudio (Figura 5-2.49). Siguiendo un procedimiento de análisis espacial, fundamentado en superficies continuas de las variables utilizadas. Las variables espaciales contempladas se han administrado a partir de Geodatabase organizadas y procesadas bajo un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Figura 5-2.49 Esquema Metodológico



Fuente: Geodata, 2018.

La metodología se desarrolla en dos partes: primero, las principales condiciones climáticas de las áreas de estudio y segundo, el cálculo de escorrentía, basado en el balance hidrogeológico del área de interés. A continuación, se describen los componentes metodológicos.

▪ **Análisis Climático:**

Se evaluaron las condiciones atmosféricas principales, medidas a partir de estaciones oficiales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

- **Precipitación (mm):** La precipitación media mensual multianual y anual relacionan la cantidad de agua natural atmosférica de entrada al sistema natural evaluado.
- **Temperatura (°C):** La sensación de temperatura media mensual multianual y anual, establecen las condiciones de cambio de estado y catalizador en los sistemas de energía sobre la superficie y los balances evaluados.

Las condiciones de temperatura mínima, media y máxima se especializaron a partir de su correlación inversa de altura sobre las estaciones seleccionadas.

- **Humedad Relativa (%):** Las proporciones de agua en diferentes condiciones atmosféricas permiten evaluar las posibilidades de cambio real y potencial, relacionando de manera sinérgica los elementos de precipitación y temperatura sobre los balances utilizados.
- **Evapotranspiración Potencial (ETP):** Relaciona las condiciones de precipitación, temperatura y humedad relativa sobre las cuales el agua es transformada en vapor.

Evaluando de manera simultánea la posibilidad biológica de transpirar y las condiciones naturales en que el agua se evapora. Se plantea el uso de la ecuación de ETP mensual propuesta por García y López (1970), ya que se encuentra ajustada para condiciones tropicales (Valencia 2010). Los valores anuales de evapotranspiración son determinados a partir de la formulación de Turc (1954).

$$ETP = 1.21 * 10^{Ft} (1 - 0.01 * HR_D) + 0.21 * t - 2.3$$

Ecuación 1

$$Ft = \frac{7.45t}{234.7+t}$$

Ecuación 2

$HR_D = \text{Humedad media del mes}$

$t = \text{Temperatura media del mes}$

- Condiciones Espaciales Geodatabase:

Las variables climáticas utilizadas al igual que los demás elementos expuestos en este documento se han construido a partir de superficies continuas, almacenadas en Geodatabases que permiten su manipulación espacial.

- Balance Hidroclimático:

Se ha desarrollado el balance Hidroclimático medio mensual multianual a partir de las superficies de variables climáticas (Olaya, 2004), (Singh, 2012), (Rocha, 2010), obteniendo el comportamiento distribuido del balance a través de las áreas de estudio, con ello se relaciona una mejor precisión en el comportamiento y los cambios que se producen en un medio continuo. Se obtuvieron los siguientes derivados al realizar el balance hidroclimático:

- Almacenamiento: Cantidad de agua media mensual que puede ser almacenada por las condiciones de suelo.
- Déficit: Cantidad de agua faltante en el sistema por un incremento en la evapotranspiración y la precipitación de entrada.
- Evapotranspiración Real (ETR): Con el balance se obtiene el producto principal de este mecanismo de relaciones donde se calcula este fenómeno con base en el potencial real de entrada y salida para cada mes, llevando a un ajuste adecuado las condiciones de ETP iniciales.
- Exceso: Cantidad de agua de salida del sistema por saturación.

- Escorrentía Superficial:

La escorrentía superficial se determina a partir de la formulación establecida por KENNESSEY (1930) destacando la capacidad de incluir variables medibles y determinantes sobre las áreas de estudio. Se presentan ajustes adecuados para condiciones de relieve colinado y superiores, ya que este método fue ajustado bajo elementos similares (Tardi & Vittorini, 1977, Barazzuoli et al., 1987, Colombetti & Mattioli, 1991, Bauducco et al., 1992). También se relaciona en un buen ajuste para las condiciones de recarga en diferentes periodos de tiempo y evaluaciones de cambio tendencial del clima (Spadoni, Brilli, Giustini, & Petitta, 2010).

La versatilidad del método se basa en la cuantificación de condiciones que ejercen un peso uniforme en el fenómeno de escorrentía:

- Pendiente del terreno: Derivada de un modelo digital de terreno, con resolución espacial de 12.5m del sensor activo ALOS para el año 2011. Con lo cual se obtiene una escala de mejor detalle a 1:25000.
- Permeabilidad: Se ha determinado por el estudio Geológico de detalle que acompaña este estudio.

- Cobertura vegetal y uso del suelo: Esta superficie fue actualizada a una escala 1:10000 a partir del mosaico que cubre las áreas de estudio, basados en el sensor óptico RapidEye.

El coeficiente de escorrentía (CK), se determina por la relación sinérgica de la pendiente del terreno (CA), el estado de la cobertura vegetal (CV) y la permeabilidad de la roca (CP). Que influyen de manera continua sobre el comportamiento de la escorrentía.

$$CK = CA + CV + CP$$

Ecuación 3

Cada uno de estos componentes se preparan a partir de una variable espacial continua, almacenada como una superficie que representa dichos cambios en el territorio, pudiendo evaluar su parámetro cuantitativo y espacial de manera simultánea en el cálculo aditivo de su índice.

Los niveles categóricos para cada una de las variables mencionadas en el cálculo de la escorrentía CK, varían según el comportamiento climático del área de estudio, de esta manera se propone usar el índice de aridez (*Ia*) propuesto por Marttne (1926) y ajustado para el cálculo del CK (Tardi & Vittorini, 1997), (Bauducco, Antonio de Luca, Dematteis, & Mascocco, 1992), como se presenta en la siguiente formulación:

$$Ia = \frac{\left(\frac{P}{T+10} + 12\frac{p}{t}\right)}{2}$$

Ecuación 4

P = Precipitación media anual

T = Temperatura media anual

p = Precipitación media mensual del mes mas seco

t = Temperatura media mensual del mes mas seco

La propuesta del índice de escorrentía CK, indica que la clasificación de las variables utilizadas en su cálculo está condicionada al resultado del Índice de Aridez mencionado, presentando tres categorías de valores, la primera para: *Ia* < 25, la segunda: 25 < *Ia* < 40 y por ultima: *Ia* > 40. En la Tabla 5-2.23 se presenta los valores de clasificación propuestos y variación su dependiendo el resultado del *Ia*.

Tabla 5-2.23 Clasificación de parámetros en función de variación del Índice de Aridez

Índice de aridez (<i>Ia</i>)	<i>Ia</i> < 25	25 < <i>Ia</i> < 40	<i>Ia</i> > 40
Pendiente (<i>C_a</i>)			
<i>C_{a1}</i> A>35%	0.22	0.26	0.30
<i>C_{a2}</i> 10%<A>35%	0.12	0.16	0.20
<i>C_{a3}</i> 3.5%<A>10%	0.01	0.03	0.05
<i>C_{a4}</i> A<3.5%	-	0.01	0.03
Cobertura vegetal (<i>C_v</i>)			

Índice de aridez (<i>Ia</i>)		<i>Ia</i> < 25	25 < <i>Ia</i> > 40	<i>Ia</i> > 40
C _{v1}	Roca desnuda	0.26	0.28	0.30
C _{v2}	Pastizales	0.17	0.21	0.25
C _{v3}	Tierra de cultivo, arbustos	0.07	0.11	0.15
C _{v4}	Bosque de árboles altos	0.03	0.04	0.05
Permeabilidad (C_p)				
C _{p1}	Impermeable	0.21	0.26	0.30
C _{p2}	Media	0.12	0.16	0.20
C _{p3}	Buena	0.06	0.08	0.10
C _p	Elevada	0.03	0.04	0.05

Fuente: Tardi & Vittorini (1997), Baducco et al (1992) y Sapdonni et al (2010)

El cálculo final de la escorrentía (*R*) a partir del coeficiente CK, se obtiene con la precipitación media anual mínima, media y máxima para el área de estudio a partir de la siguiente consideración:

$$R = CK * P \quad \text{Ecuación 5}$$

Las relaciones numéricas y espaciales presentadas en la metodología son desarrolladas a través del procesamiento algebraico de mapas, obteniendo para cada variable una superficie independiente y de igual forma entre sus interacciones. Las unidades espaciales del modelo raster utilizado presenta una resolución de 12.5m para cada uno de sus lados, como unidad mínima de representación del área de estudio.

El sistema de referencia espacial utilizado para el desarrollo metodológico expuesto, obedece al sistema Magna – Sirgas Colombia Bogotá, de origen central. Con el cual se han elaborado las salidas gráficas y los cálculos numéricos de superficies.

▪ Balance Hidrogeológico:

Este responde a las condiciones generales del sistema hídrico y es calculado bajo los parámetros explicados anteriormente. La relación inversa media anual presentada para este balance se considera a partir de las superficies finales de precipitación media anual, evapotranspiración real media anual y escorrentía media anual, como se presenta a continuación:

$$I = P - Etr - R \quad \text{Ecuación 6}$$

I = Infiltración media anual

P = Precipitación media anual

Etr = Evapotranspiración real media anual

R = Escorrentia media anual

- **Recarga:**

El potencial de recarga del acuífero se encuentra en función de la capacidad de infiltración obtenida en el balance anterior y la superficie que este representa. De esta manera se obtuvieron superficies de recarga para el área de estudio donde se observa la variabilidad de recarga y su comportamiento espacial, en función del tamaño de resolución mencionado de 12.5m de lado por pixel y el total como la suma de toda la superficie continua. La expresión de recarga se presenta a continuación:

$$Recarga = I * S \quad \text{Ecuación 7}$$

I = Infiltración media anual

S = Superficie de infiltración

- **Área hidrogeológica de estudio para el túnel**

El área de estudio de interés para el balance hidrogeológico se encuentra asociada al área circundante al túnel de Pamplona ubicado en la unidad funcional 1 (UF1) del proyecto. Al norte de la ciudad de Pamplona, la cual presenta una superficie de 259.16 ha.

Al norte, se definió el área de estudio por la divisoria de aguas que se encuentra en dirección oeste a este y al sur por la falla definida en el proyecto de igual dirección a la anterior. La definición del trazado se apoyó con la interpretación fotogeológica de las imágenes disponibles en el área de estudio.

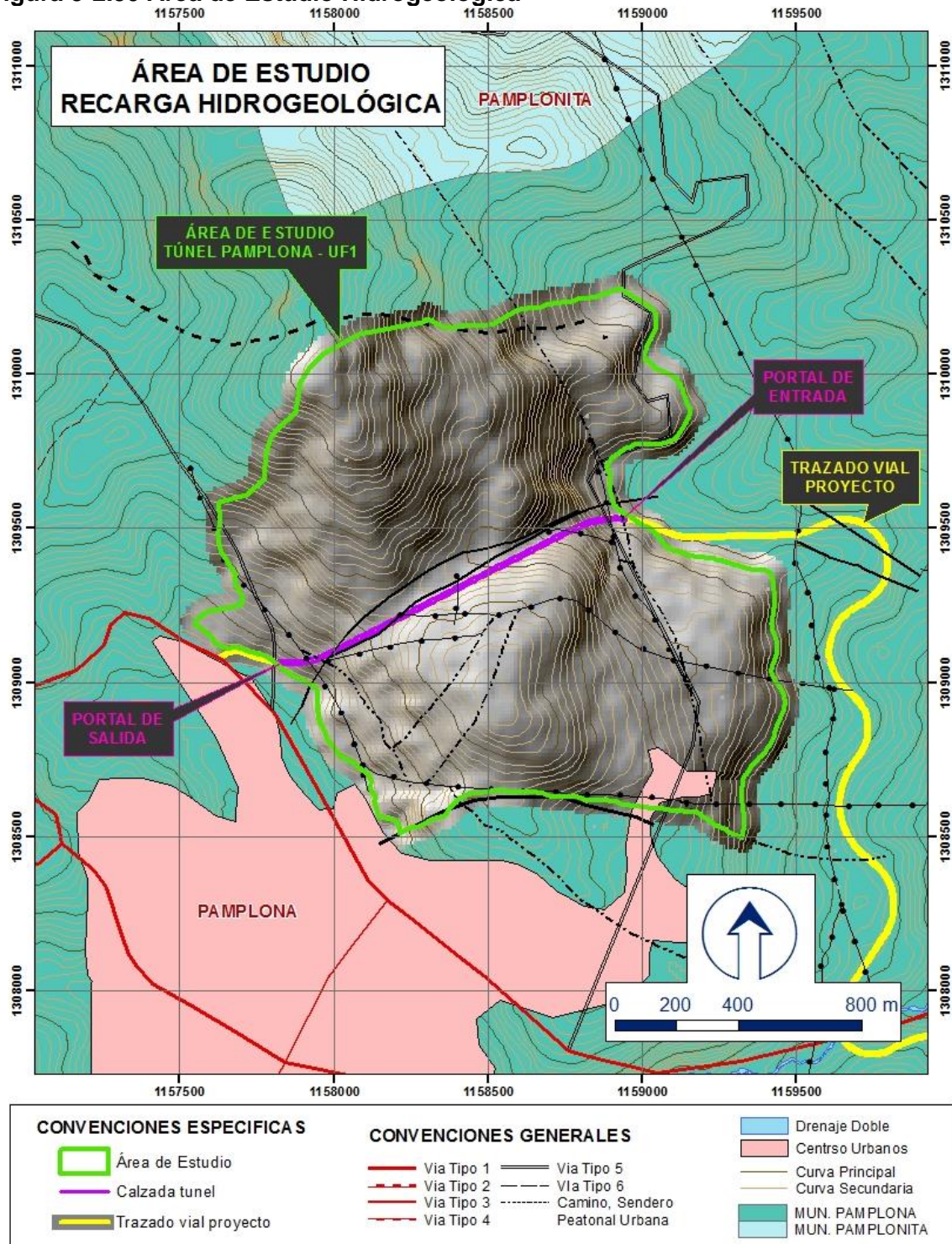
Por el costado occidental se tuvo en cuenta la cota altitudinal del portal de salida en dirección sur y hacia el norte se siguió el contacto entre el Ortoneis (PDo) y el depósito Coluvial (Qc). Para las consideraciones en el costado oriental, se limitó el área de estudio por la cota altitudinal de la rasante en el portal de entrada, atravesando de norte a sur y cerrando de este modo el área de influencia (Figura 5-2.50).

- **Condiciones Climáticas**

Las condiciones climáticas fueron analizadas de manera semiregional con la distribución de los datos oficiales. Los análisis se basan en la información media mensual multianual de las estaciones oficiales climatológicas del IDEAM. En la Tabla 5-2.24 se referencia el tipo de estación y las condiciones de su posicionamiento.

La reconstrucción de los campos de lluvia y de temperatura permitió evaluar las condiciones locales del área de estudio y de manera simultánea su visión regional y formación en el territorio.

Figura 5-2.50 Área de Estudio Hidrogeológica



Fuente: Geodata, 2018.

Tabla 5-2.24 Estaciones meteorológicas utilizadas

CÓDIGO	NOMBRE	CAT	ENTIDAD	ESTE	NORTE	ALTITUD	P (mm)	T (°C)
16015030	LA ESPERANZA	CO	IDEAM	1170796.52	1329167.45	1814	X	X
16015020	ISER PAMPLONA	AM		1158725.57	1307000.39	2477	X	X
16015090	TAMA PARQUE NACIONAL	CP		1180559.35	1313056.11	2431	X	X
37015010	SILOS	CO		1146262.08	1288985.79	2765	X	X
16020080	CUCUTILLA	PM		1144316.41	1324655.62	1388	X	
16020110	LA CALDERA	PM		1149907.29	1301441.61	3103	X	
37010010	LABATECA	PM		1174214.84	1299308.26	1699	X	
37010030	CACOTA	PM		1158760.95	1295937.77	2467	X	
CP: Climatológica Principal, CO: Climatológica Ordinaria, AM: Agrometeorológica, PM: Pluviométrica								

Se registraron ocho estaciones de precipitación alrededor del territorio involucrado en el análisis, con principal ajuste por la estación: ISER PAMPLONA, que se encuentra cercana al trazado del túnel estudiado. Cuatro estaciones con posibilidad de registros de temperatura ajustaron la correlación inversa de la altitud con la temperatura en los valores medios, mínimos y máximos.

- Comportamiento de la Precipitación

La variabilidad de la precipitación en la región se encuentra en un régimen bimodal que presenta sus mayores valores de lluvia en los meses de abril a mayo y en octubre a noviembre. Enero indica el primer periodo seco registrado en este régimen y en el mes de julio se registra el segundo periodo seco de menor a igual magnitud.

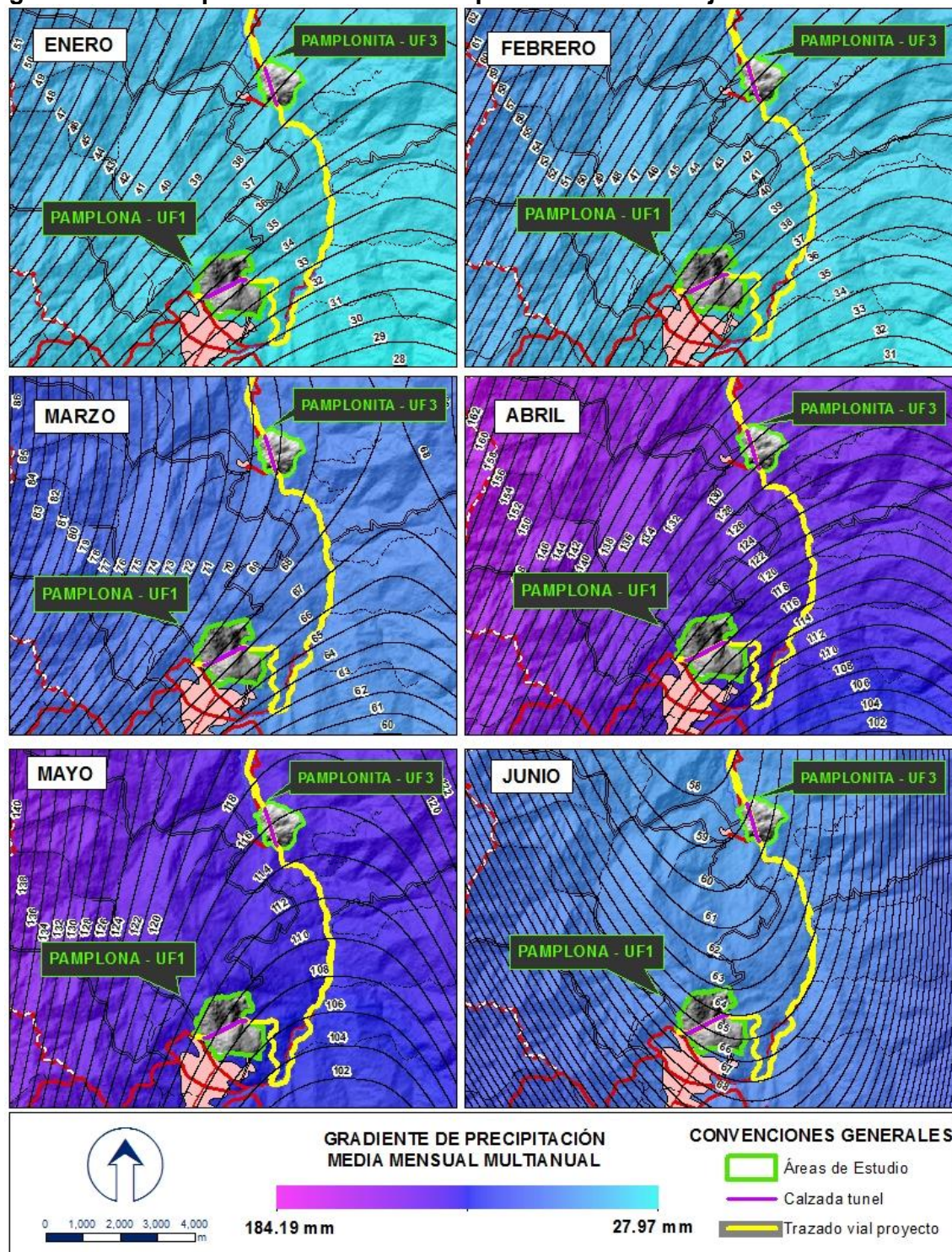
Los campos de lluvia sobre la región estudiada y su territorio circundante se encuentran en un rango anual de 27.97 mm y 184.19 mm, los cuales recogen la variabilidad media mensual multianual.

En la Figura 5-2.51 se establecen las condiciones bajo una misma escala representando los meses de enero a junio, en lo cual se observa el rápido cambio en la oscilación media de las lluvias pasando de valores de 34 – 39 mm (enero) a valores de 120 - 130 mm (abril).

Estas rápidas oscilaciones en las precipitaciones describen comportamientos variables significativos que pueden ser acompañados por fuertes efectos durante condiciones de fenómenos regionales como el niño y la niña.

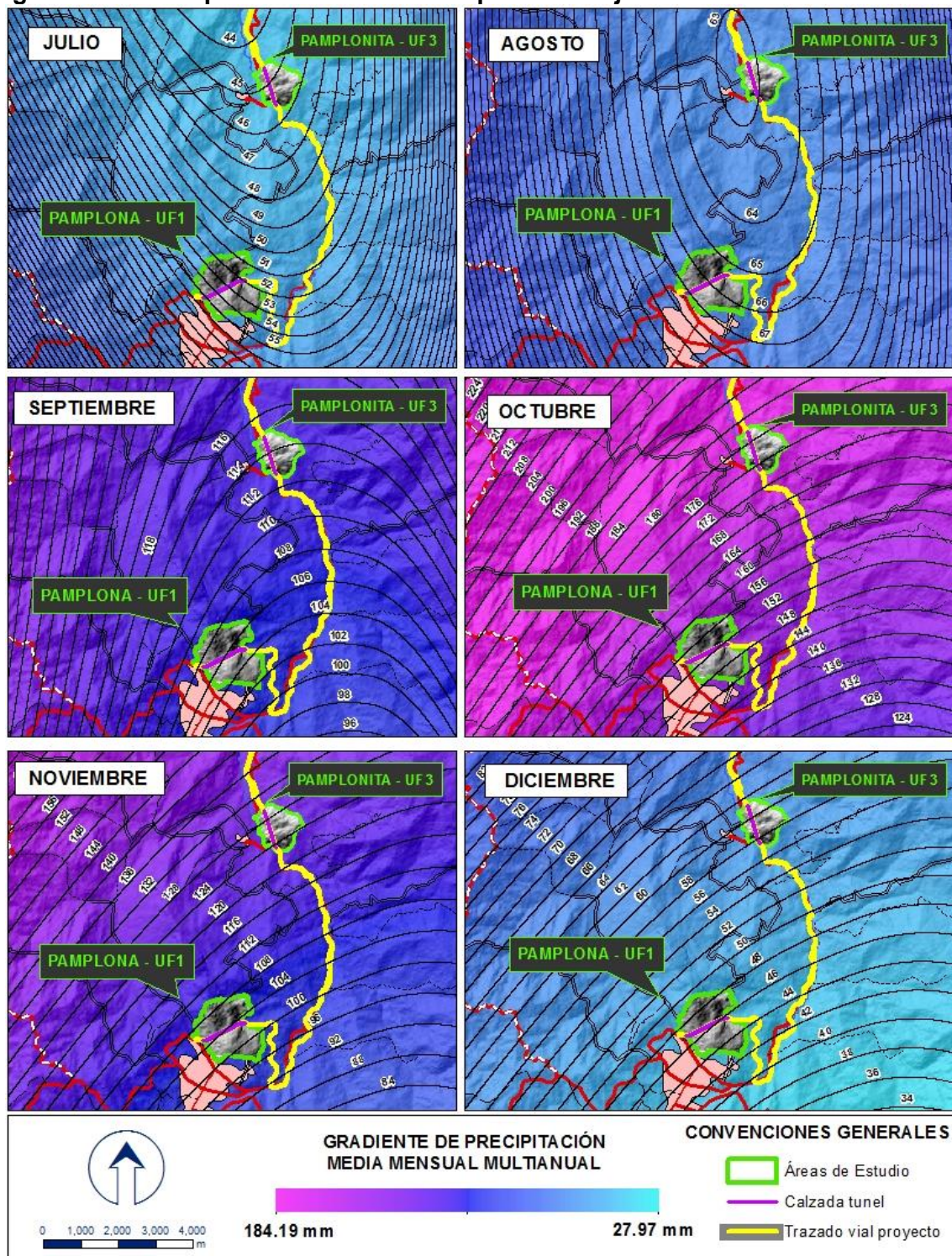
Los últimos seis meses del régimen de precipitación (Figura 5-2.52) establecen las condiciones más extremas del comportamiento de lluvias. Julio el segundo periodo seco y con menores precipitaciones promedio (45 – 53 mm) y octubre con picos que pueden llegar a los 164 – 180 mm. Con lo cual se permite inferir periodos de mayor atención sobre los últimos seis meses debido a los cambios en periodos secos que se pueden prolongar o viceversa con las condiciones fuertes de lluvia que alteran este ciclo promedio.

Figura 5-2.51 Comportamiento de la Precipitación de enero a junio



Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.52 Comportamiento de la Precipitación de julio a diciembre

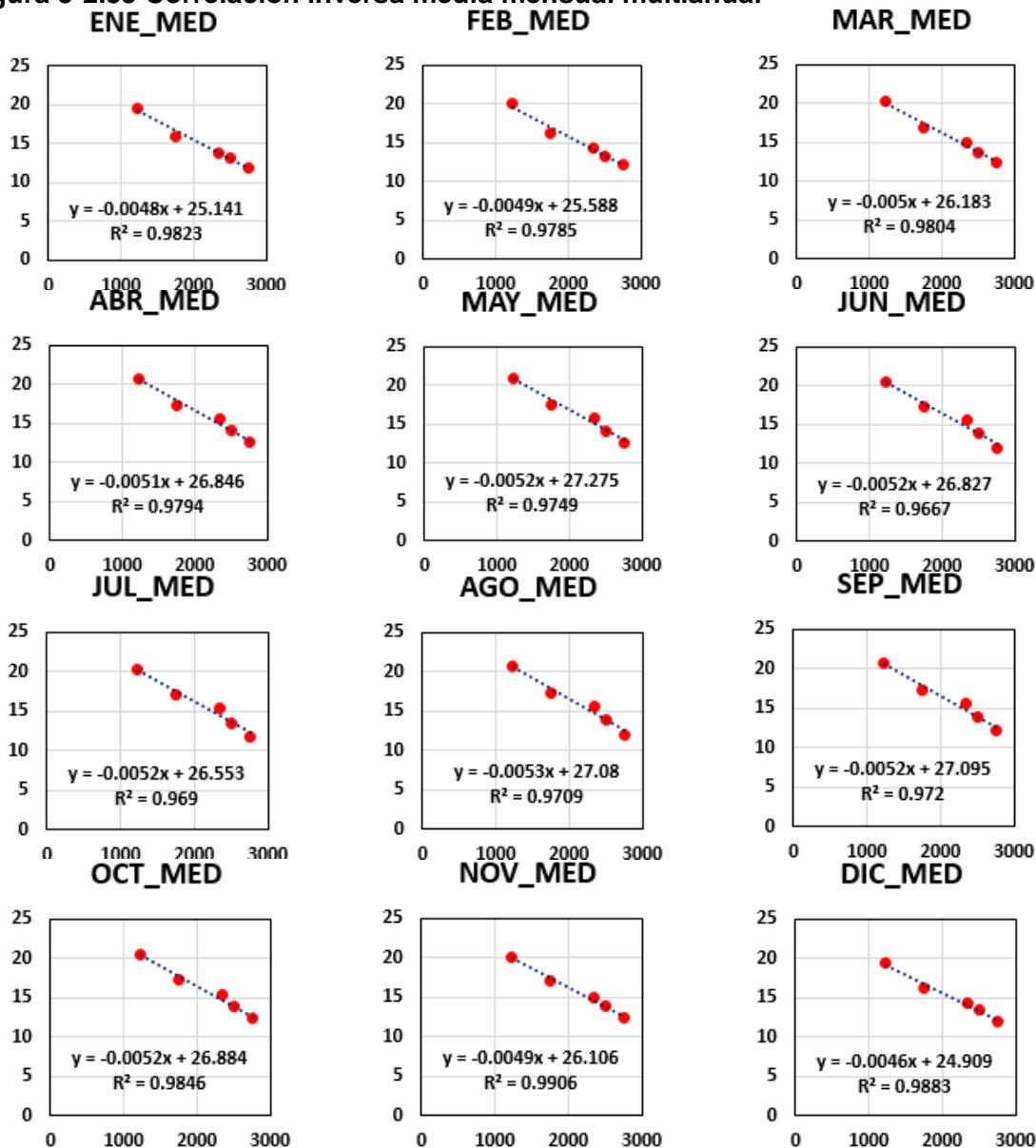


Fuente: Geodata, 2018

▪ Comportamiento de la Temperatura

La temperatura es la variable de menor cambio temporal al ser comparada con las demás variables del sistema climático, aunque se representa con claridad los cambios de oscilación por la relación inversa de altura y temperatura. Para las condiciones representadas en la región de estudio se reconstruyo el comportamiento inverso de la temperatura con respecto a los cambios de altura, para cada mes analizado en el régimen de temperatura (Figura 5-2.53).

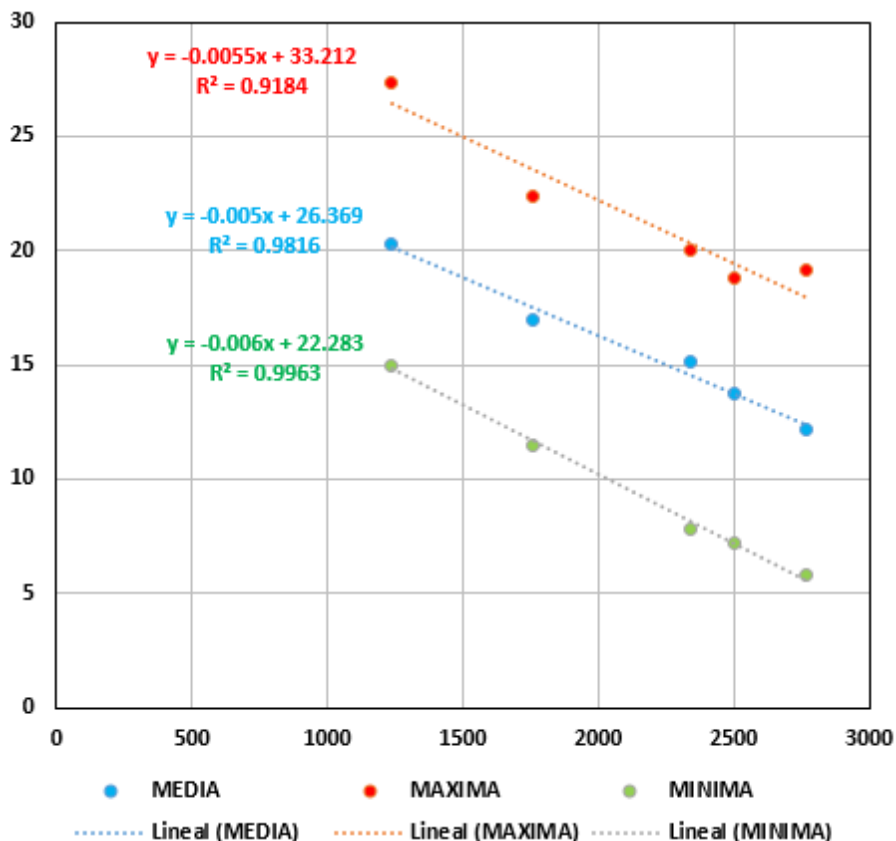
Figura 5-2.53 Correlación inversa media mensual multianual



Fuente: Geodata, 2018

Los comportamientos del régimen de temperatura muestran oscilaciones que responden de igual forma al patrón evaluado anteriormente con la precipitación, pero en condiciones de rangos menores (Figura 5-2.54). Tan solo el rango de oscilación para la temperatura es del 3%, elemento que distingue periodos de humedad mas no de estaciones en nuestro sistema climático regional (IDEAM, 2014).

Figura 5-2.54 Correlación inversa anual

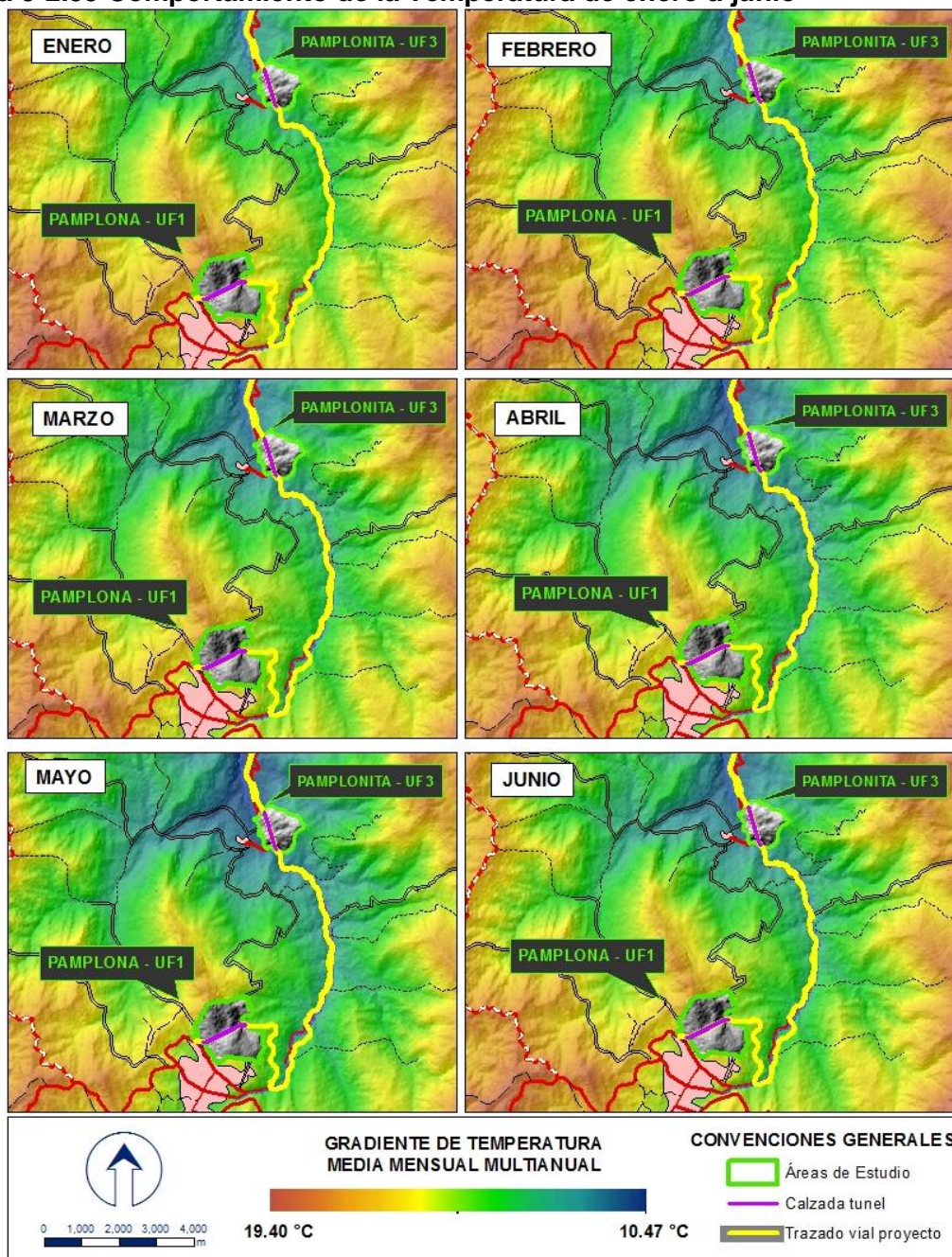


Fuente: Geodata, 2018

Se puede evidenciar la respuesta del cambio de temperatura en el desarrollo vertical de altitud sobre las áreas de estudio. Las condiciones del régimen oscilan entre 19.40 °C y 10.47 °C para todo el dominio espacial analizado, en esta relación altitudinal no se presentan cambios en la correlación calculada (Figura 5-2.53), con valores superiores al 95%.

En la Figura 5-2.55 se presenta el comportamiento de los primeros seis meses del régimen de temperatura, destacando una disminución difusa de esta variable en las condiciones de mayor precipitación entre los meses de abril y mayo debido a la relación de superiores contenidos de humedad en el ambiente, cuando se acerca Junio se empieza un incremento relacionado con el segundo periodo seco del régimen.

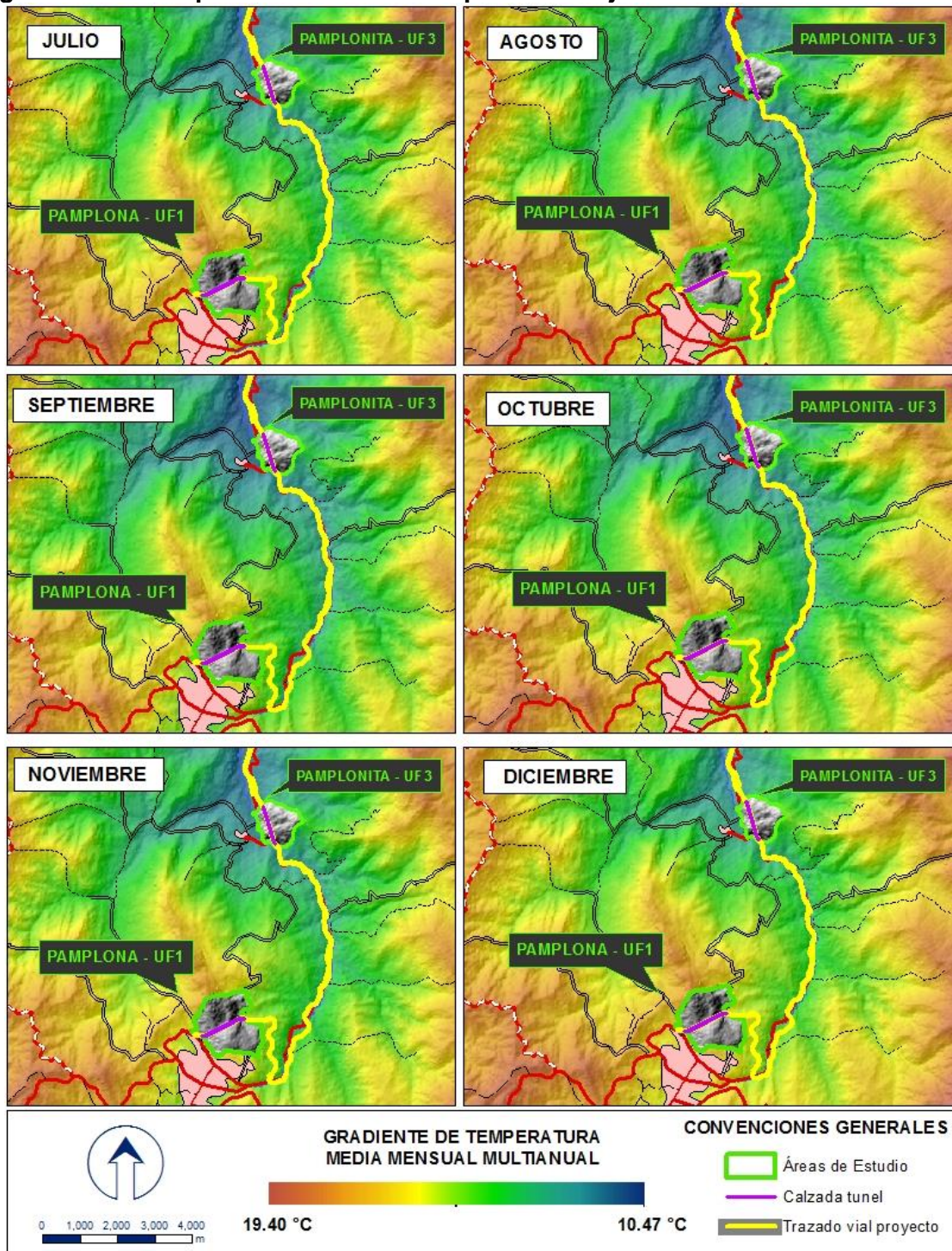
Figura 5-2.55 Comportamiento de la Temperatura de enero a junio



Fuente: Geodata, 2018

Los últimos seis meses del régimen medio mensual, evidenciado en la Figura 5-2.56, permiten observar cambios más conspicuos en la temperatura, donde julio se caracteriza por ser la mayor temperatura al igual que enero. Comparado con octubre en donde se registran los valores menor temperatura.

Figura 5-2.56 Comportamiento de la Temperatura de julio a diciembre

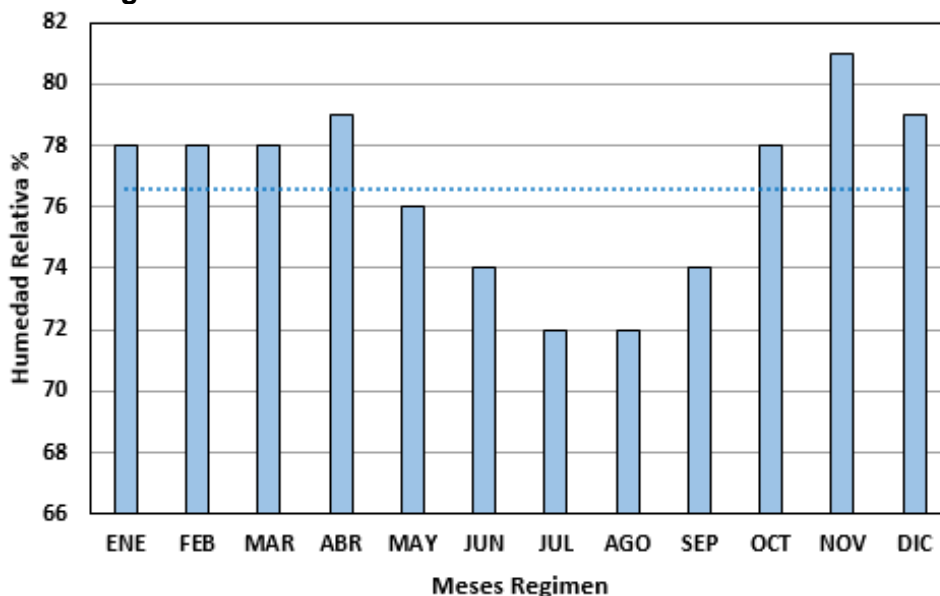


Fuente: Geodata, 2018

- Comportamiento de la Humedad Relativa

Las condiciones de humedad establecen relación directa con el comportamiento climático en el dominio espacial de estudio, el rango oscila entre el 72% y el 81% en valores medios de humedad. La relación de almacenaje de humedad a partir del mes de octubre permite garantizar estas condiciones durante enero y febrero (Figura 5-2.57).

Figura 5-2.57 Régimen Humedad Relativa



Fuente: Geodata, 2018

Las condiciones de humedad relativa se incrementan durante el mes de marzo y el almacenaje de este primer periodo húmedo, no es suficiente para garantizar el mismo potencial en los meses de junio a septiembre, afectados por el periodo seco intermedio.

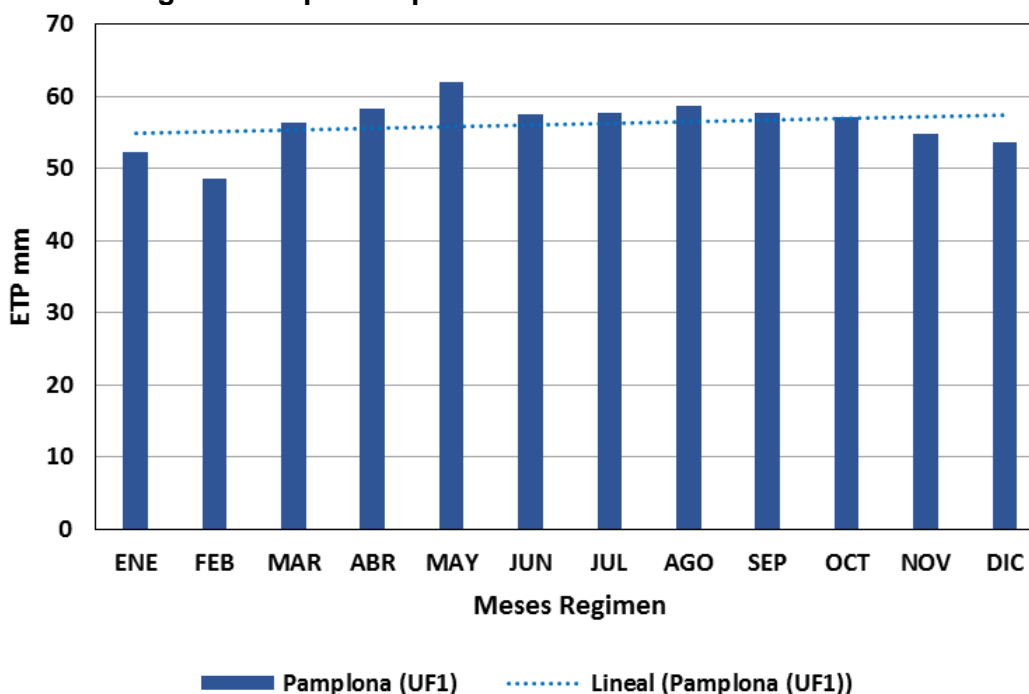
La caracterización espacial de esta variable también se encuentra desarrollada en superficies sobre las áreas de estudio, pero la similitud en el comportamiento con la temperatura permite dejar la tendencia en los regímenes presentados anteriormente, sin embargo, en la Figura 5-2.57 se observa el estado promedio del comportamiento del régimen medio mensual multianual.

- Comportamiento de la Evapotranspiración Potencial - ETP

La evapotranspiración permite identificar la relación climática con los medios biológicos presentes en el área de estudio. En la Figura 5-2.58 se presenta el comportamiento del régimen de evapotranspiración potencial en el túnel Pamplona de la UF1.

El túnel Pamplona (UF1), presenta un rango de evapotranspiración entre: 52 a 61 mm, relacionando la mayor altitud (2583.03 m.s.n.m promedio).

Figura 5-2.58 Régimen Evapotranspiración Potencial



Fuente: Geodata, 2018

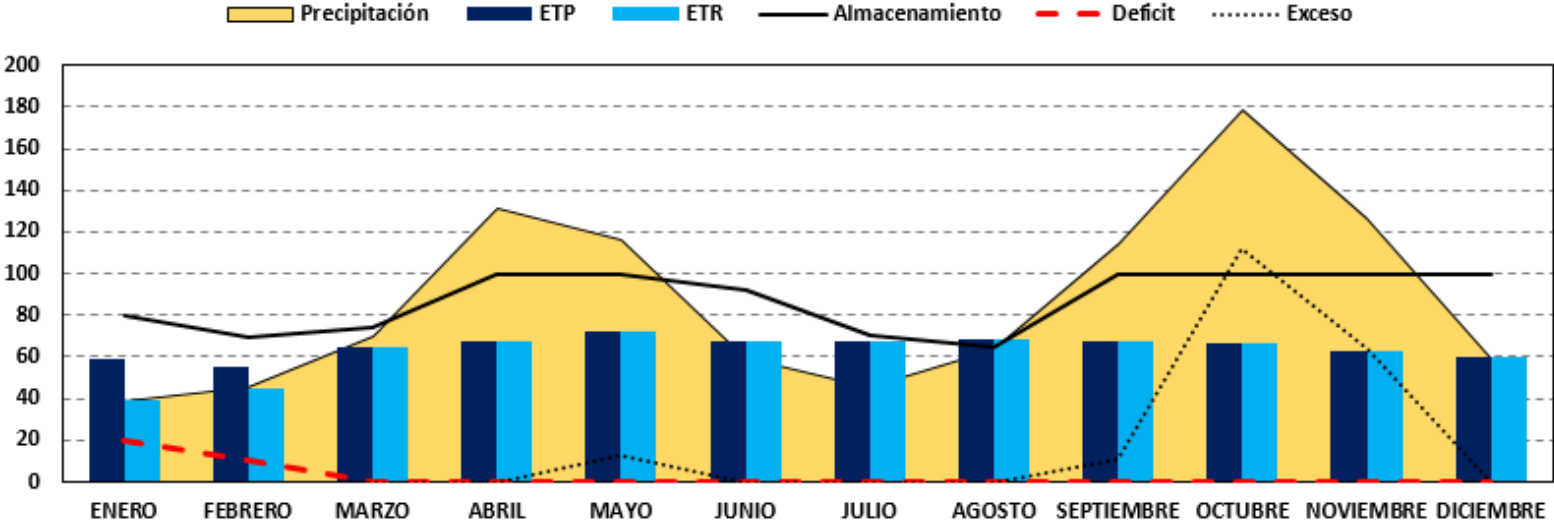
La combinación de las variables climáticas, presentan un régimen orientado por el patrón bimodal de lluvias, debido a su mayor cambio entre periodos de menor a mayor humedad en las áreas de estudio.

- **Balance Hidroclimático**

En esta sección se presenta la síntesis climática de las variables presentadas anteriormente y su funcionamiento en conjunto sobre la región de las áreas de estudio, llevando a una caracterización más sucinta y explicativa de las principales condiciones atmosféricas y del ciclo hidrológico involucrado más adelante en el proceso de recarga (Figura 5-2.59). Las condiciones bimodales del régimen de precipitación son claramente observadas y su vínculo con el exceso calculado. El almacenamiento o condición de retención es homogénea a través del sistema. El déficit que se vincula en condiciones de falta de humedad (cuando la ETR supera la ETP) no se presenta sobre las áreas de estudio indicando que la humedad siempre se encuentra en los niveles óptimos posibles según la variación de temperatura y humedad relativa.

Las condiciones de exceso se presentan sobre los periodos húmedos o de mayor precipitación, con una superior intensidad sobre los meses de septiembre a noviembre debido a la presencia de campos de lluvia de mayor intensidad, que terminan en escorrentía sobre el balance general.

Figura 5-2.59 Comportamiento Balance Hidroclimático



Fuente: Geodata, 2018

El balance hidroclimático permite verificar los estados y ajustes de la ETP calculada y llevarla a sus condiciones reales de ETR a través del régimen mensual multianual. Si las condiciones de precipitación superan la ETP calculada y el almacenamiento previo, ésta representará adecuadamente la ETR. Llevando los valores mensuales promedio multianuales a los reales anuales calculados para los balances de Infiltración inversa adelante presentados.

- **Escorrentía Superficial (Método Kennesey)**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de aplicar el método KENNESEY (1930), para la obtención de la escorrentía superficial en el área de estudio de la unidad funcional uno (**Ecuación 3**). Destacando los comportamientos espaciales derivados de las variables utilizadas y sus clasificaciones finales.

- Índice de Aridez de Marttne Ajustado (I_a)

La relación de temperatura y precipitación anual para los meses más secos (Ecuación 4) generan el Índice de Aridez promedio para el área de estudio (Tabla 5-2.25). Dando como resultado, para el área de recarga identificada en el trazado del túnel, el uso de la segunda columna en la clasificación propuesta por la metodología Kennesey (Tabla 5-2.23).

Tabla 5-2.25 Índice de Aridez de Marttne ajustado para las áreas de estudio según método Kennesey

TÚNEL UF1 - PAMPLONA			
P (mm)	T (°C)	p (mm)	t (°C)
972.15	13.74	34.74	13.02
		Enero (*)	Enero (**)
I_a	36.48		

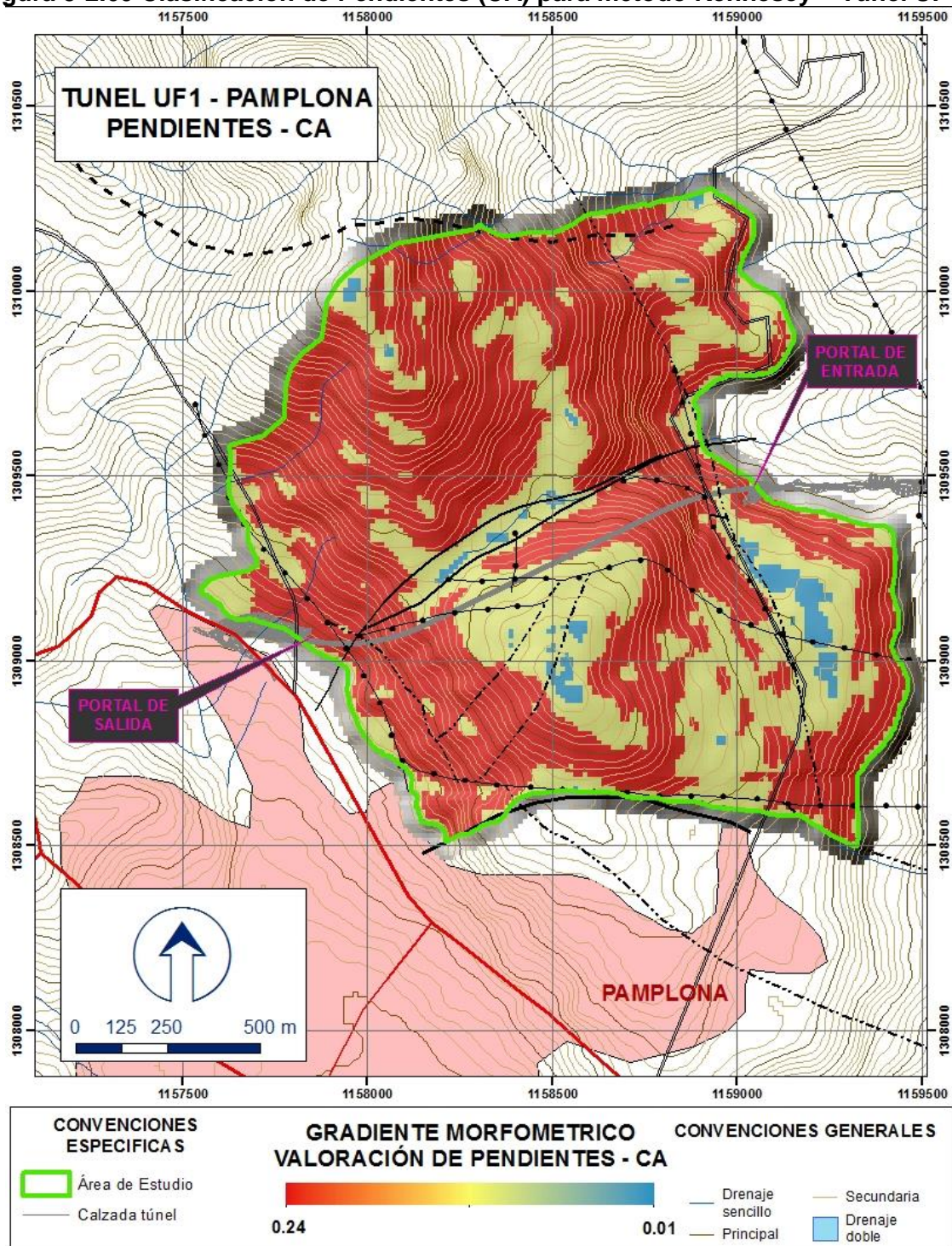
Fuente: Geodata, 2018

- Valoración de las Pendientes (CA)

Las pendientes representan la medida morfométrica del modelo digital de terreno (DTM), la cual representa la altitud en función de la distancia. El comportamiento de la pendiente es clasificado en los criterios expuestos por la metodología Kennesey (Tabla 5-2.23).

El área de estudio de la UF1 – Pamplona, distribuye sus categorías de pendiente de la siguiente manera: Un 67% para pendientes mayores al 35% y del 31 % para la categoría entre 10 y 35 %. Como se presenta en la Figura 5-2.60, el trazado del túnel se encuentra en medio de un valle o incisión sobre el paisaje, confluyendo en la concentración de escorrentía e infiltración.

Figura 5-2.60 Clasificación de Pendientes (CA) para método Kennesey – Túnel UF1



Fuente: Geodata, 2018

▪ Valoración de la Permeabilidad (CP)

Las condiciones de permeabilidad superficial son ajustadas a partir de las propiedades hidrogeológicas de las unidades litológicas como se relaciona en la Tabla 5-2.26. La permeabilidad superficial se distribuye entre valores de 0.08 a 0.24 según los coeficientes para el método de Kennesey.

Tabla 5-2.26 Clasificación de Permeabilidad en la Zona de Estudio según método Kennesey

AREA DE ESTUDIO	FORMACIÓN GEOLÓGICA	GRADO DE PERMEABILIDAD	CP
TÚNEL UF1 - PAMPLONA	Falla Definida	Elevada	0.03
	Depósitos Antrópicos	Bueno	0.08
	Depósitos Coluviales	Bueno	0.08
	Depósitos Coluvioaluviales	Bueno	0.08
	Formación Capachos	Bajo	0.24
	Formación Tibú y Mercedes	Bueno	0.08
	Formación Aguardiente	Bueno	0.08
	Formación La Luna	Bueno	0.08
	Ortoneis	Bajo	0.24

Fuente: Geodata, 2018

La UF1 – Túnel Pamplona, tiene una mayor representatividad de la formación Aguardiente, sobre las principales colinas del área de estudio (Figura 5-2.61), seguido por la formación Tibú y Mercedes y en menor grado la Formación Girón y el Ortoneis, con la conformación de depósitos coluviales llegando al casco urbano de Pamplona.

▪ Valoración de la Cobertura Vegetal y Uso del Suelo

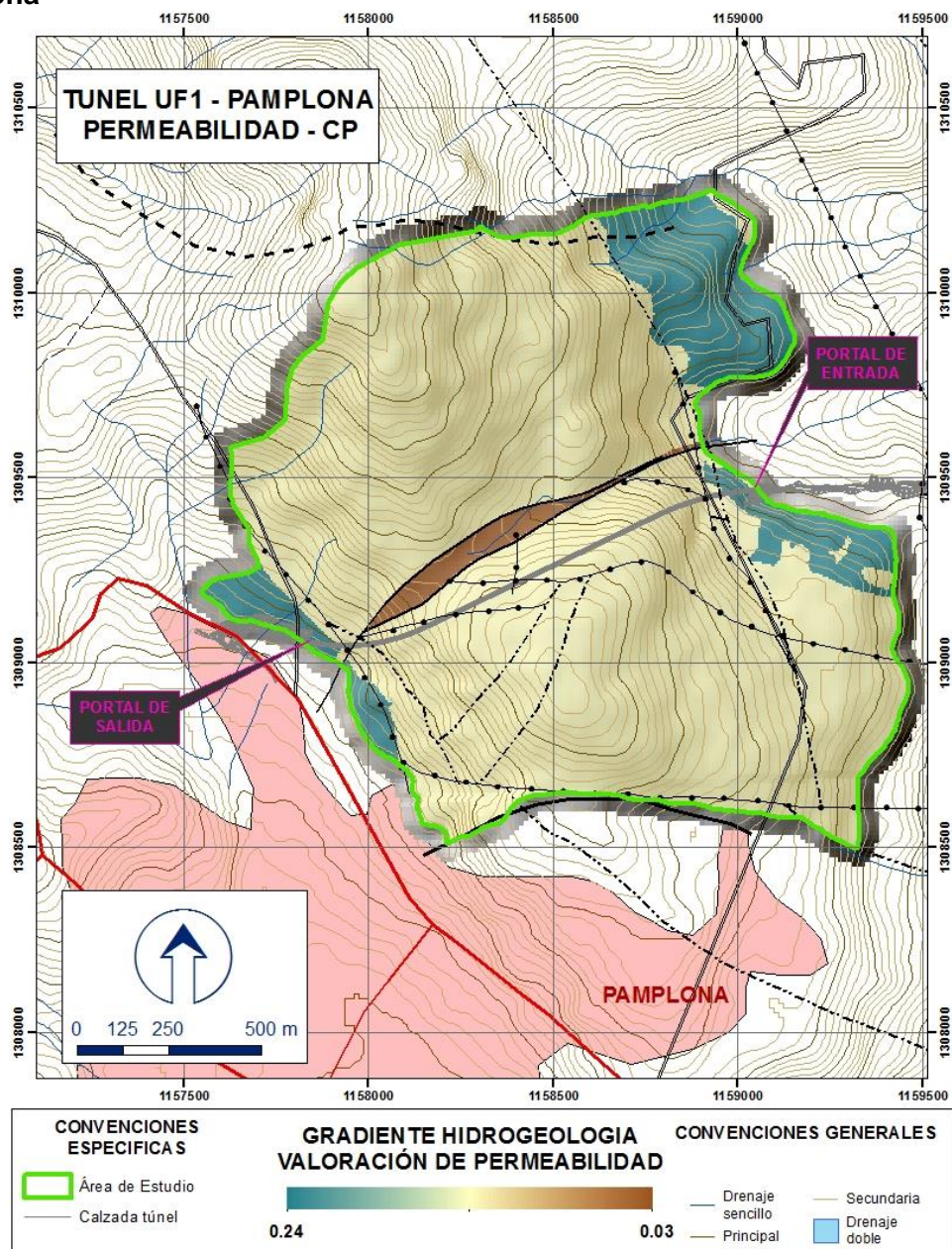
Los elementos de cobertura vegetal y uso del suelo se actualizaron para el área de estudio basado en sus condiciones fisionómicas y desarrollo estructural a escala 1:5000. De esta manera se ha elaborado una relación directa con la clasificación propuesta en la metodología Kennesey como se muestra en la Tabla 5-2.27.

Tabla 5-2.27 Clasificación cobertura vegetal y uso del suelo en las zonas de estudio para método Kennesey

CLASE CV	COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO	CV	TÚNEL UF1 - PAMPLONA	
			ha	%
Pastizales – Tierras de cultivos y arbustos	Pastos Naturales	0.09	138.9	53.59
	Pastos Limpios	0.09	40.9	15.78
Bosque de árboles altos	Vegetación Secundaria	0.035	79.4	30.64

Fuente: Geodata, 2018

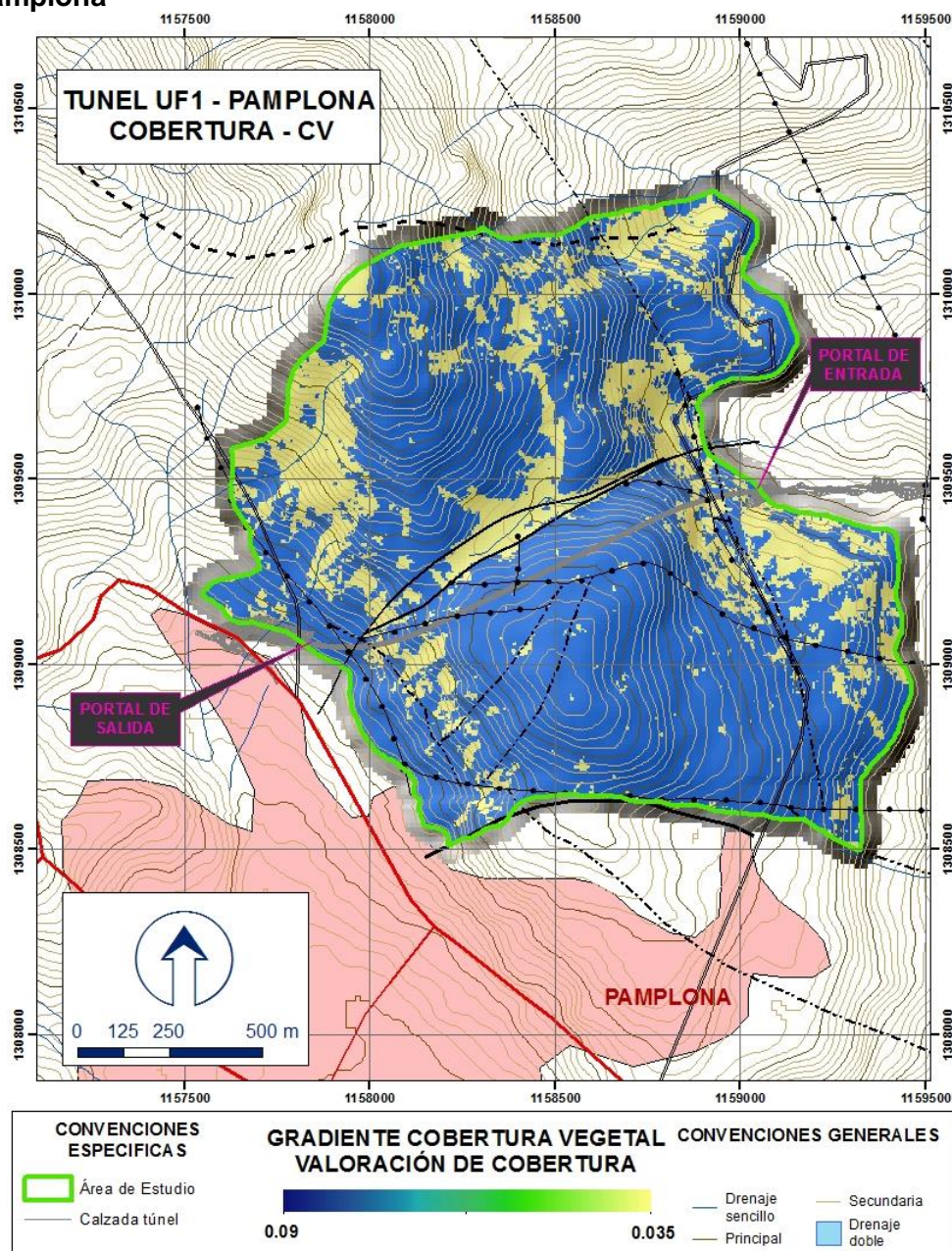
Figura 5-2.61 Clasificación de Permeabilidad (CP) para método Kenesey – Túnel UF1 Pamplona



Fuente: Geodata, 2018

Los pastos naturales y limpios representan la mayor participación en la UF1 – Túnel Pamplona, con 79% de participación (Figura 5-2.62). Entre ellos se distinguen los pastos naturales con aprox. un 50 % y se encuentran ubicados sobre las laderas principales en el área de estudio. Rodeados por las demás coberturas de pastos limpios y algunas formaciones de vegetación secundaria.

Figura 5-2.62 Clasificación de Cobertura Vegetal (CV) para método Kenessey – Túnel UF1 Pamplona



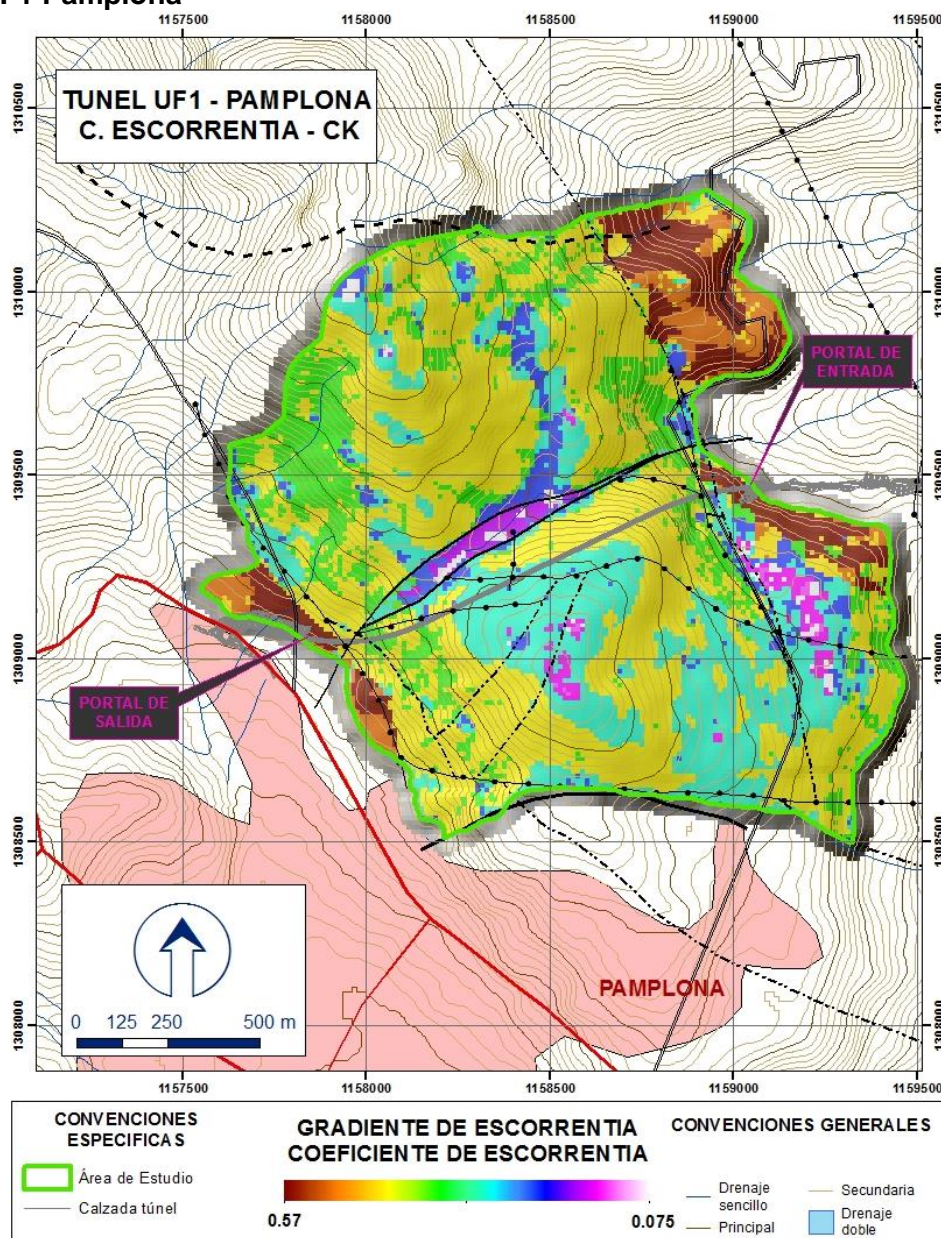
Fuente: Geodata, 2018

Las formaciones vegetales de baja estructura, como los pastos, permiten una mayor escorrentía en los eventos de precipitación debido a su baja capacidad de retención. Por su parte las coberturas con mayor desarrollo estructural como la vegetación secundaria permiten mejores elementos de intercepción sobre los campos de precipitación, reflejando una menor escorrentía superficial.

▪ Coeficiente de Escorrentía – CK

Se obtiene el resultado del coeficiente de escorrentía a partir de la integración lineal (Ecuación 3) de las pendientes (CA), permeabilidad (CP) y cobertura vegetal (CV) con lo cual se registra el coeficiente de escorrentía distribuido espacialmente a través del área de estudio como se muestra en la Figura 5-2.63.

Figura 5-2.63 Condición de Escorrentía Superficial (CK) según método Kennesey – Túnel UF1 Pamplona



Fuente: Geodata, 2018

El coeficiente de escorrentía promedio para el túnel pamplona – UF1, registra un valor de 0.37 a través del área de estudio, debido a las pendientes altas predominantes. Sin embargo, se encuentran valores de baja escorrentía concentradas en la parte central del área de estudio, cerca al trazado del túnel, en correspondencia con la zona de falla que corre en dirección E-W (Figura 5-2.63).

- Escorrentía Superficial – Régimen Anual

Las condiciones de escorrentía se obtienen a partir de la multiplicación de la precipitación anual sobre el coeficiente de escorrentía obtenido con la metodología Kennesey (Ecuación 3). En la Tabla 5-2.28 se presentan las condiciones mínimas, media y máxima de escorrentía superficial obtenida para el área de estudio.

Tabla 5-2.28 Escorrentía Superficial – Régimen Anual

VALOR	Túnel Pamplona UF1
	(mm/año)
Máximo	603.648
Medio	340.672
Mínimo	178.781

Fuente: Geodata, 2018

- Balance Hidrogeológico

El balance hidrogeológico planteado de manera inversa en el cálculo de la infiltración (Ecuación 6), permite obtener los valores de infiltración sobre el área de estudio. El régimen de este comportamiento de infiltración es presentado en la Tabla 5-2.29.

Tabla 5-2.29 Régimen de Infiltración Anual

VALOR	Túnel PamplonaUF1
	(mm/año)
Máximo	412.446
Medio	76.693
Mínimo	0

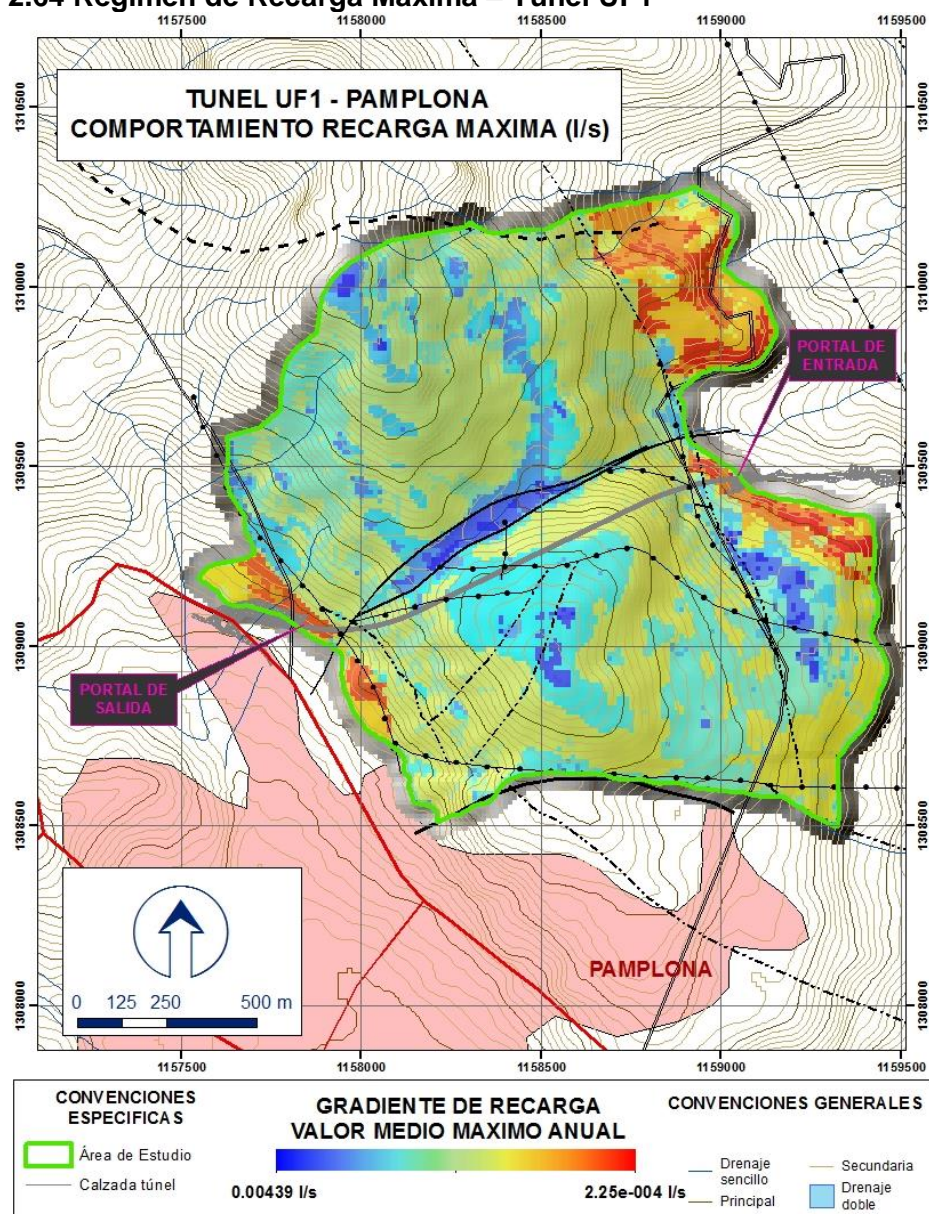
Fuente: Geodata, 2018

Las condiciones de infiltración mínima responden a periodos de sequía marcados sobre el área de estudio, lo cual influye de manera drástica sobre los valores de infiltración que se pueden obtener en el balance inverso, llegando a una infiltración nula en el balance.

- Valoración de la Recarga

En este capítulo se presenta el comportamiento final y síntesis del balance hidrogeológico inverso con el cual se comparan las condiciones de régimen anual máximas, medias y mínimas de la recarga sobre el área de estudio. En las Figura 5-2.64 a la Figura 5-2.66 y la Tabla 5-2.30 a la Tabla 5-2.32, se observa el comportamiento final de la recarga en l/s (Ecuación 7) y su balance hidrogeológico anual a partir de los análisis climáticos expuestos.

Figura 5-2.64 Régimen de Recarga Máxima – Túnel UF1



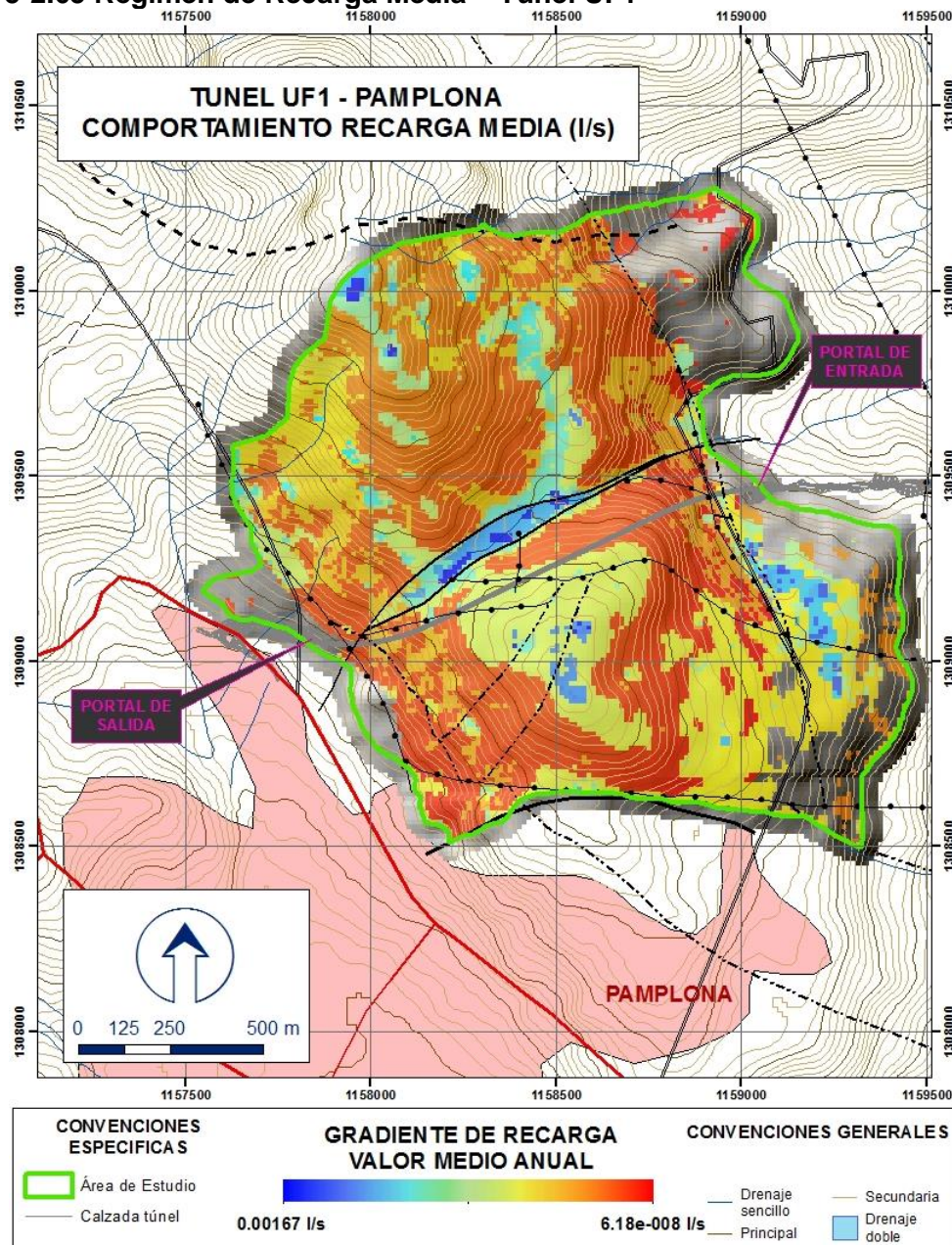
Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.30 Recarga Máxima Anual

P	ETR	R	I
mm/año	mm/año	mm/año	mm/año
1622.395	606.301	603.648	412.446

Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.65 Régimen de Recarga Media – Túnel UF1



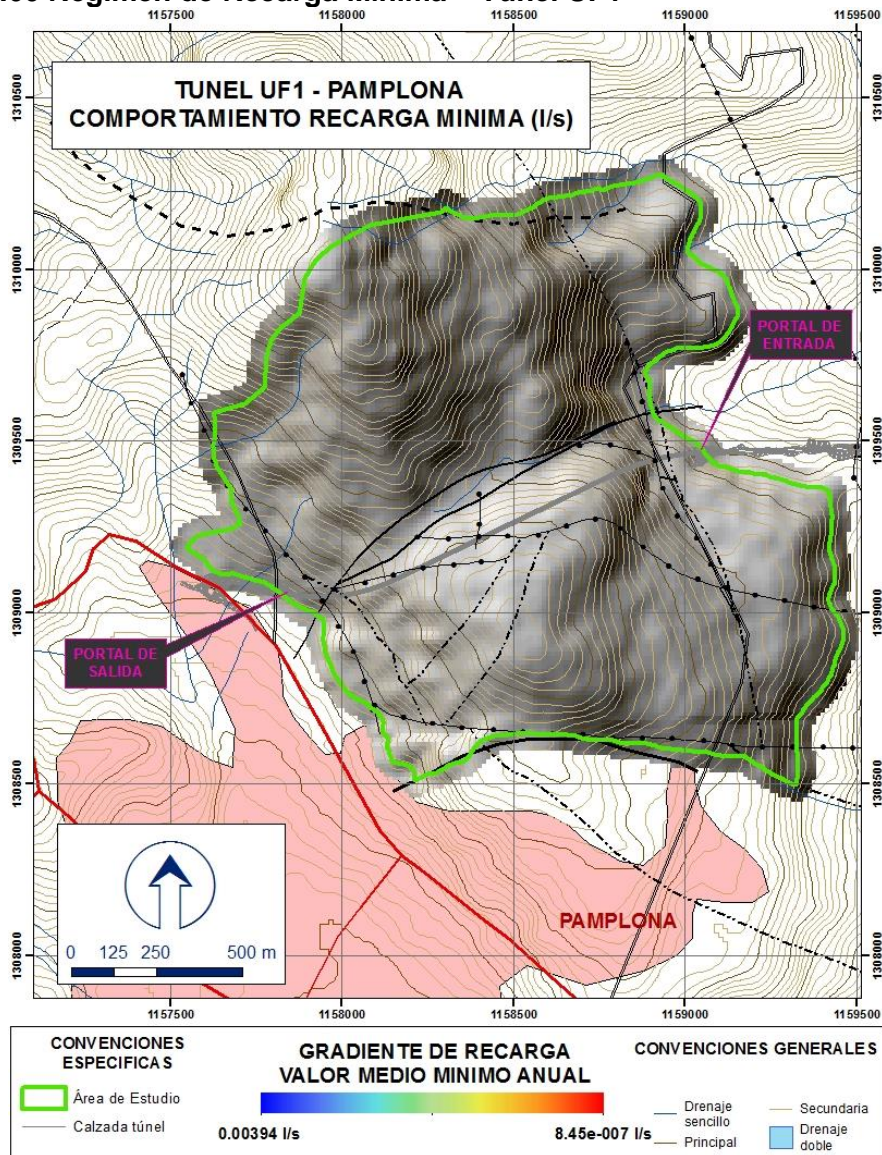
Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.31 Recarga Media Anual

P	ETR	R	I
mm/año	mm/año	mm/año	mm/año
961.759	544.394	340.672	76.693

Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.66 Régimen de Recarga Mínima – Túnel UF1



Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.32 Recarga Mínima Anual

P	ETR	R	I
mm/año	mm/año	mm/año	mm/año
480.372	301.591	178.781	0

Fuente: Geodata, 2018

Nótese que en la Figura 5-2.66 el área de interés presenta un color gris equivalente a un escenario para un valor nulo de recarga, por lo que se está incluso por debajo del gradiente mínimo presentado en la leyenda de la imagen.

5.1.8.10.4 Caracterización hidrodinámica de los terrenos y rocas interceptados por la excavación del túnel Pamplona.

La permeabilidad media de los complejos hidrogeológicos presentes en la zona de estudio de la UF1, así como aquellos interceptados por el túnel Pamplona, fue esquematizada utilizando la clasificación de la 'Association Française des Travaux En Souterrain' (AFTES), propuesta como una norma en 1992. Se ha seleccionado esta clasificación porque goza de amplia aceptación en la comunidad científica tanto en Europa como en América del Sur, además de representar coherentemente los rangos de permeabilidad esperados para las unidades geológicas presentes en la zona de estudio. Esta clasificación establece cuatro clases de permeabilidad crecientes, desde K1 hasta K4, como se ilustra en la Tabla 5-2.33.

Tabla 5-2.33. Descripción de la permeabilidad de acuerdo con la norma AFTES

Clase	Permeabilidad en m/s	Descripción
K1	$< 10^{-8}$	de muy baja a baja
K2	10^{-8} a 10^{-6}	de baja a media
K3	10^{-6} a 10^{-4}	de media a alta
K4	$> 10^{-4}$	da alta a muy alta
<i>Esta clasificación no es válida para roca cárstica, para las cuales es necesario utilizar una valoración específica. La permeabilidad de los macizos rocosos es anisotrópica y el flujo se da preferencialmente a lo largo de las discontinuidades</i>		

Fuente: AFTES 1992

En relación con la nota adjunta a la Tabla 5-2.33, se aclara que en la zona de estudio si bien es cierto se tiene presencia de rocas calizas, esto no constituye por sí mismo un ambiente cárstico propiamente dicho. Estos ambientes particulares tienen características muy claras que los identifican como: formación de dolinas, canales subterráneos, grutas, afloramientos de agua intermitentes de gran caudal generalmente ubicados en la parte baja del valle aluvial; condiciones que no fueron observadas en la zona de estudio. No obstante, si es posible encontrar un aumento de la permeabilidad debido a la disolución de las fracturas presentes en los materiales calcáreos, lo que podría denominarse como un pseudokarst. Por este hecho, la clasificación de la permeabilidad utilizando la propuesta de la AFTES es válida y se encuentra justificada su aplicación para los materiales presentes en la zona de estudio.

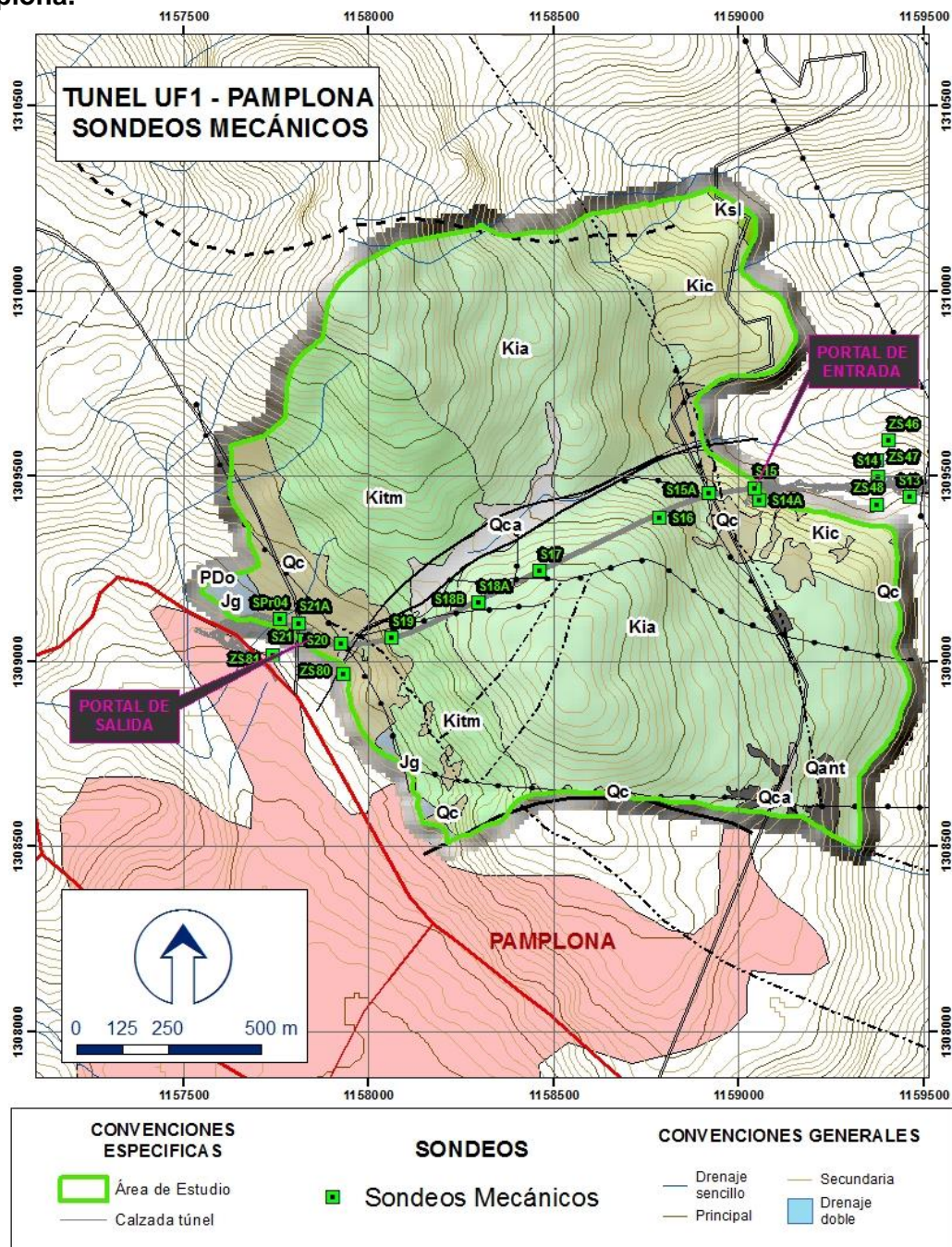
- **Definición del grado de permeabilidad del macizo rocoso**

A lo largo del trazado del túnel se han llevado a cabo varios sondeos con recuperación continua de núcleos que, además de ser utilizados como piezómetros, sirvieron para la ejecución de pruebas hidráulicas.

De esta manera ha sido posible valorar el grado de permeabilidad del macizo rocoso a diferentes niveles de profundidad incluyendo la cota del túnel. En la Figura 5-2.67 se representan en planta la ubicación de los sondeos respecto al eje del túnel. Se observa que, aunque a lo largo del trazado la densidad de las investigaciones es muy buena, no sucede lo mismo para el resto de la ladera, a cada lado de su eje. Sin embargo, tomando

como base los resultados obtenidos y el modelo geológico de referencia, se ha caracterizado en términos hidrogeológicos el área completa de estudio del túnel Pamplona.

Figura 5-2.67 Ubicación de los sondeos realizados sobre la traza del túnel de Pamplona.



Fuente: Geodata, 2018

La posición de los sondeos realizados en el eje del túnel se reporta en la sección longitudinal del trazado. Los sectores donde se ejecutaron las pruebas de permeabilidad también fueron localizados con el objeto de valorar su incidencia en función de la cota de la excavación (Figura 5-2.68). De este modo, es posible verificar que los datos medidos a la cota del túnel, aunque aumente la cobertura, permanecen con valores de permeabilidad similares a aquellos medidos en cotas superiores (Figura 5-2.69). En la misma sección es posible tener una primera interpolación de la carga piezométrica por encima del túnel. Se observa que esta es por lo general baja aún en aquellos sectores donde se tienen coberturas mayores (Figura 5-2.68).

En resumen, el trazado del túnel intercepta de occidente a oriente las formaciones geológicas indicadas en la Tabla 5-2.34.

En la Tabla 5-2.35 se reporta un análisis más detallado de todos los valores de permeabilidad medidos en el sector del túnel Pamplona, cuyo trazado intercepta una secuencia constituida por horizontes prevalentemente arenosos (areniscas cuarzosas, conglomerados) y calcáreos (calizas), alternados con niveles predominantemente arcillosos (lodolitas, shales, limolitas).

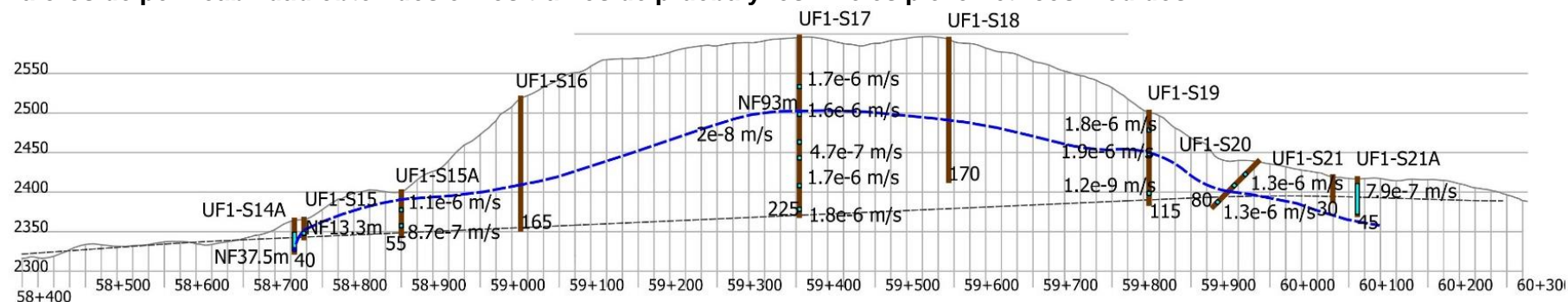
Tabla 5-2.34. Formaciones geológicas definidas como complejos hidrogeológicos interceptadas por el Túnel Pamplona (dirección W-E)

Formación Geológica	Litolotipo A (Areniscas)	Litotipo B (Arcillolitas)
Girón (Jg). Jurásico Superior	areniscas cuarzosas de grano fino a medio, micáceas con intercalaciones de limolitas rojas, bastante fracturadas y conglomerados polimícticos	capas medias de arcillolitas, limolitas
Tibú y Mercedes (Kitm). Cretácico Inferior	areniscas guijosas de grano grueso areniscas cuarzosas, calizas densas, conglomerados	shale y areniscas de grano fino, arcillolitas carbonosas, lodolitas
Aguardiente (Kia). Cretácico Inferior	arenisca glauconítica y calcárea, de grano grueso	shale negro carbonáceos y micáceos
Capacho (Kic). Cretácico Inferior	caliza arenosa, intercaladas con areniscas cuarzosas, de grano fino y calizas fosilíferas	shales oscuros, micáceos

Fuente: Geodata, 2018

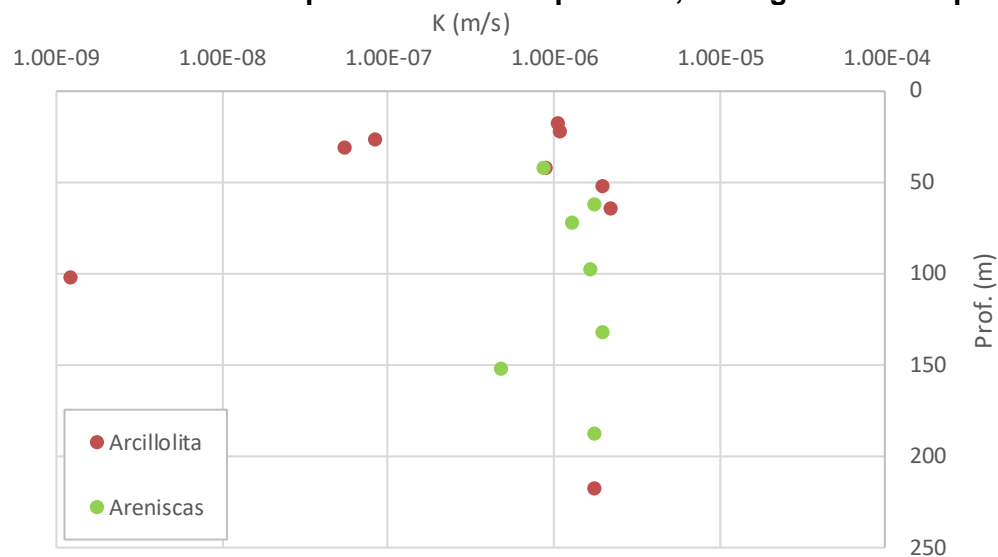
Los datos de permeabilidad disponibles se organizaron de acuerdo con la nomenclatura asignada a lo largo del trazado y descrita en el perfil geológico longitudinal. Dentro de los complejos hidrogeológicos identificados y descritos en la Tabla 5-2.34 se han diferenciados subunidades hidrogeológicas para poder distinguir entre litotipos prevalentemente arenosos y aquellos con predominio arcilloso.

Figura 5-2.68. Sección longitudinal del túnel Pamplona con indicación de los sondeos realizados, la profundidad alcanzada, los valores de permeabilidad obtenidos en los tramos de prueba y los niveles piezométricos medidos.



Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.69. Análisis estadístico de los datos de permeabilidad disponibles, distinguiendo litotipo y profundidad



Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.35. Datos de caracterización hidráulica de las unidades geológicas interceptadas por el túnel (información primaria).

Sondeo código	Coordenadas			Tramo Vertical			Tipo de Prueba	K m/s	Geología	Litología	Fracturación	RQD min	Meteorización
	E	N	COTA	desde	hasta	m							
UF1-S15	1309469	1159042	2365	15	20	5	Lugeon	1,04E-06	Formación Capacho	Arcillolita	M-H	0	W3
UF1S-S15A	1309449	1158920	2400	6	55	49	Slug desc	5,38E-08			M-H	0	W3
UF1-S15A	1309449	1158920	2400	20	25	5	Lugeon	1,08E-06			L-M	40	W4
UF1-S15A	1309449	1158920	2400	40	45	5	Lugeon	8,72E-07			M	0	W4
UF1-S16	1309388	1158785	2515	60	65	5	Lugeon	4,40E-07	Formación Aguardiente	Areniscas	M	10	W3
UF1-S16	1309388	1158785	2515	95	100	5	Lugeon	-			M	70	W2
UF1-S16	1309388	1158785	2515	130	135	5	Lugeon	3,30E-07			M	80	W2
UF1-S16	1309388	1158785	2515	150	155	5	Lugeon	3,53E-07			M	80	W2
UF1-S19	1309063	1158062	2502	44	84	40	Pr. Bombeo	2,16E-06		Arcillolitas	-	-	-
UF1-S17	1309239	1158460	2596	215	220	5	Lugeon	1,75E-06	Formación Tibú-Mercedes	Limolitas	M	0	W3-W4
UF1-S19	1309063	1158062	2502	50	55	5	Lugeon	1,91E-06		Arcillolitas	M-H	30	W3
UF1-S19	1309063	1158062	2502	100	105	5	Lugeon	1,19E-09		Arenisca muy fino	M-H	50	W2
UF1-14A	1309433	1159054	2382	15	39	24	Slug desc	8,18E-08	Formación Capacho	Shale	M-H	0	W4
UF1-S17	1309239	1158460	2596	95	100	5	Lugeon	1,65E-06	Formación Aguardiente	Areniscas	H	0	W3-W4
UF1-S17	1309239	1158460	2596	60	65	5	Lugeon	1,75E-06			M	0	W2
UF1-S17	1309239	1158460	2596	130	135	5	Lugeon	1,95E-06			M-H	30	W3-W4
UF1-S17	1309239	1158460	2596	150	155	5	Lugeon	4,69E-07			M	0	W3-W4
UF1-S17	1309239	1158460	2596	185	190	5	Lugeon	1,73E-06	Formación Tibú-Mercedes	Areniscas	L-M	0	W2
UF1-S20	1309049	1157923	2438	40	45	5	Lugeon	8,61E-07			H	40	-
UF1-S20	1309049	1157923	2438	70	75	5	Lugeon	1,28E-06			M	60	W2

Fuente: Geodata, 2018

Del análisis de los datos se evidencia que el campo de variación de la permeabilidad no aporta una sólida diferencia entre los diferentes litotipos. En este sentido se observa que los valores medios para los litotipos identificados se ubican en el mismo intervalo de variación ($1E-6$ m/s a $1E-7$ m/s). Se observa además que para los litotipos predominantemente arcillosos, en condiciones de poca fracturación, se obtienen valores de muy baja permeabilidad del orden de $1E-9$ m/s. Para condiciones de macizo rocoso muy fracturado, las condiciones de permeabilidad evidenciadas son similares para los dos litotipos más representativos con valores en torno a $2E-6$ m/s.

En correspondencia con los niveles arcillosos muy fracturados se observa una baja plasticidad y una tendencia de los núcleos de roca extraídos a fracturarse a lo largo de los planos de laminación. Es el caso de las limolitas interceptadas por el sondeo UF1-S17 en el tramo comprendido entre aprox. 215 – 220 m de profundidad, en correspondencia del cual se ha llevado a cabo una prueba de permeabilidad tipo Lugeon que ha arrojado valores el orden de $1E-6$ m/s (Fotografía 5-2.3).

Fotografía 5-2.3 Núcleo de roca tomado del sondeo UF1-S17 en el tramo comprendido entre aprox. 215 – 220 m de profundidad. Se observa altamente físil a lo largo de los planos de laminación y bajo grado de plasticidad.



Fuente: Geodata, 2018

La distinción entre sectores adyacentes en el túnel está más relacionada con las condiciones de fracturación del macizo rocoso que con el tipo de litología. Sin embargo, con el objeto de definir la variación de la permeabilidad a lo largo del eje del túnel, se decidió considerar dos subunidades hidrogeológicas, una referente a las areniscas y otra a las arcillolitas. Los datos relacionados con los sectores en los cuales no domina un litotipo sobre el otro, toman en cuenta valores de permeabilidad intermedios entre los dos litotipos. Para cada subunidad hidrogeológica se definió el grado de fracturación que juega un rol fundamental en el comportamiento hidrodinámico del macizo rocoso. El grado de fracturación del macizo rocoso se definió con base en la clasificación del índice RMR de Beniaowski corregido, descrito en el perfil geológico-geotécnico disponible.

A cada clase de RMR se le ha atribuido en función del litotipo un valor de permeabilidad derivado del análisis estadístico de los valores deducidos de las pruebas hidráulicas ejecutadas en las perforaciones mecánicas realizadas, tal como se muestra en la Tabla 5-2.36 y la Figura 5-2.70.

Tabla 5-2.36 Campo de variación de la permeabilidad asociada a las clases de roca de acuerdo con el índice RMR.

RMR	K	Arenisca	Arcillolita
90-80	Kmin	4.69E-07	1.19E-09
80-70	Kperc10	7.04E-07	4.33E-08
70-60	Kperc25	1.07E-06	8.18E-08
60-50	Kmedia geom	1.26E-06	3.22E-07
50-40	Kperc50	1.65E-06	1.04E-06
40-30	Kperc75	1.74E-06	1.75E-06
30-20	Kperc90	1.83E-06	1.96E-06
20-10	Kmax	1.95E-06	2.16E-06

Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.70 Ubicación de los sondeos realizados sobre la traza del túnel de



Fuente: Geodata, 2018

En la Tabla 5-2.37 se indican los valores de permeabilidad mínimos, medios y máximos considerados para cada subunidad hidrogeológica.

Tabla 5-2.37. – Campo de variación de la permeabilidad asociada al grado de fracturación del macizo rocoso.

Subunidad Hidrogeológica	Geología	Litotipo	Grado de Fracturación		
			Bajo	Medio (Standard)	Alto
UF1-CHa	Fm. Girón, Fm Tibú Mercedes, Fm	Arenisca	7E-07	1E-06	2E-06
UF1-CHb	Aguardiente, Fm capacho	Arcillolita	4E-08	3E-07	1E-06

Fuente: Geodata, 2018

En la Tabla 5-2.38 se reportan los valores de permeabilidad obtenidos a lo largo del eje del túnel en función del modelo geológico – geomecánica de referencia.

Tabla 5-2.38. – Permeabilidad atribuida a los tramos de túnel para condiciones geológico-geomecánicas homogéneas. Grado de fracturación H=Alto; M=Medio y L=Bajo

Geología			Progresiva		Grado de fracturación	Tramo atravesado	Conductibilidad hidráulica
Formación	Roca	Falla	desde m	hasta m	-	L m	K0 m/s
Capacho (Kic)	Lodolitas/Arcillolitas		K58+745.00	K58+755.00	H	10	1,0E-06
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+755.00	K58+780.00	H	25	1,0E-06
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+780.00	K58+810.00	H	30	1,0E-06
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+810.00	K58+850.00	H	40	1,0E-06
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+850.00	K58+880.00	L	30	4,3E-08
	Lodolitas/Arcillolitas	F	K58+880.00	K58+885.00	H	5	1,0E-06
Aguardiente (Kia)	Areniscas	F	K58+885.00	K58+890.00	H	5	1,6E-06
	Areniscas		K58+890.00	K58+905.00	L	15	7,0E-07
	Arcillolitas		K58+905.00	K58+970.00	M	65	3,2E-07
	Arcillolitas		K58+970.00	K59+100.00	M	130	3,2E-07
	Areniscas		K59+100.00	K59+160.00	L	60	7,0E-07
	Areniscas		K59+160.00	K59+220.00	L	60	7,0E-07
Tibú y Mercedes (Kitm)	Arcillolitas		K59+220.00	K59+270.00	M	50	3,2E-07
	Areniscas		K59+270.00	K59+340.00	L	70	7,0E-07
	Arcillolitas		K59+340.00	K59+370.00	M	30	3,2E-07
	Areniscas		K59+370.00	K59+450.00	L	80	7,0E-07
	Arcillolitas	F	K59+450.00	K59+480.00	M	30	3,2E-07
	Arcillolitas		K59+480.00	K59+540.00	L	60	4,3E-08
	Arcillolitas		K59+540.00	K59+610.00	M	70	3,2E-07
	Arcillolitas	F	K59+610.00	K59+620.00	M	10	1,0E-06
	Arcillolitas		K59+620.00	K59+640.00	L	20	4,3E-08
	Areniscas y Calizas		K59+640.00	K59+756.00	M	116	1,3E-06
	Arcillolitas		K59+756.00	K59+812.00	H	56	1,0E-06
	Arcillolitas		K59+812.00	K59+862.00	H	50	1,0E-06
	Arcillolitas		K59+862.00	K59+912.00	H	50	1,0E-06
	Areniscas	F	K59+912.00	K59+940.00	M	28	1,3E-06
Girón	Suelos residuales		K59+940.00	K60+075.36	H	135	2,0E-08

Fuente: Geodata, 2018

Los valores de permeabilidad indicados en la Tabla anterior fueron utilizados para el cálculo analítico del caudal esperado en el túnel Pamplona.

- **Análisis de la carga hidráulica en correspondencia con el eje del túnel**

A lo largo del eje del túnel los sondeos realizados fueron acondicionados con tubos piezométricos en modo tal de poder medir el nivel del agua subsuperficial y subterránea y por lo tanto la carga hidráulica a la cota de la excavación.

Se encuentran disponibles las mediciones realizadas entre el mes de enero y junio del 2018. Estas mediciones se reportan en la Tabla 5-2.40.

Los datos disponibles indican que el nivel freático que se desarrolla en el macizo rocoso determina una carga hidráulica reducida, que llega a ser nula cerca a los portales, mientras que en la zona central del túnel alcanza valores mayores a 100 m. Tabla 5-2.39.

Tabla 5-2.39 – Valoración de la carga hidráulica en correspondencia con el eje del túnel Pamplona.

Progresiva		Carga hidráulica
desde	hasta	H0 (m)
K58+745.00	K58+755,00	0-5
K58+755,00	K58+780,00	5-20
K58+780,00	K59+160,00	20-50
K59+160,00	K59+220,00	50-100
K59+220,00	K59+640,00	100-150
K59+640,00	K59+756,00	50-100
K59+756,00	K59+862,00	50-100
K59+862,00	K59+912,00	20-50
K59+912,00	K59+940,00	5-20
K59+940,00	K60+075.36	0-5

Fuente: Geodata, 2018

El desarrollo de la superficie piezométrica en correspondencia con el eje del túnel evidencia una carga hidráulica máxima del orden de 130 metros (Figura 5-2.68). En los sectores de los portales la superficie piezométrica se ubica en una cota inferior respecto a la clave del túnel. Es por lo tanto de esperar que la excavación de los tramos con baja cobertura se realice por encima del nivel freático; sin embargo, el grado de conocimiento respecto a la oscilación de la superficie piezométrica no permite descartar la posibilidad que bajo determinadas condiciones de mayores precipitaciones el nivel freático alcance una cota por encima del túnel. Asumiendo un enfoque del lado de la seguridad, los valores de carga hidráulica mostrados en la Tabla 5-2.40 han sido utilizados para valorar las condiciones hidráulicas durante la excavación o para el cálculo del caudal esperado en el túnel en el corto plazo.

Tabla 5-2.40. Datos piezométricos disponibles. Se muestran los valores de profundidad del nivel freático y de carga hidráulica sobre la clave del túnel (m).

Sondeo	UF1-S14A		UF1-S15		UF1-S15A		UF1-S16		UF1-S17		UF1-S19		UF1-S21		UF1-S21A	
Nivel Piezométrico	Prof. (m)	Carga Hidráulica (m)	Prof. (m)	Carga Hidráulica (m)	Prof. (m)	Carga Hidráulica (m)	Prof. (m)	Carga Hidráulica (m)	Prof. (m)	Carga Hidráulica (m)	Prof. (m)	Carga Hidráulica (m)	Prof. (m)	Carga Hidráulica (m)	Prof. (m)	Carga Hidráulica (m)
21/01/2018											51	64	30	0	65	0
28/01/2018																
30/01/2018											49	66				
3/02/2018			3	21	8	47					65	50				
5/02/2018			4	19												
11/02/2018			4	19	8	47					49	66	30	0	65	0
21/02/2018			14	9	15	40					50	65	30	0	65	0
28/02/2018	40	0	14	9	15	40					51	64	30	0	65	0
17/03/2018	40	0	14	9	15	40					50	65	30	0	65	0
11/04/2018	38	3			13	42	138	27					30	0	61	4
16/04/2018									77	147						
1/05/2018			13	10	13	42			93	131	54	61				
9/06/2018			14	9	15	40	88	77	96	128	86	29				
mínima	38	0	3	9	8	40	88	27	77	128	49	29	30	0	61	0
media	39	1	10	13	13	42	113	52	89	135	56	59	30	0	64	1
máxima	40	3	14	21	15	47	138	77	96	147	86	66	30	0	65	4

Fuente: Geodata, 2018

Valoración analítica del caudal esperado en el túnel Pamplona

En la bibliografía existen diferentes soluciones analíticas para valorar la presencia del agua de infiltración en los túneles. Estas ecuaciones analíticas se dividen en dos grupos principales: i) aquellas que consideran el caudal estabilizado o, dicho de otra manera, el caudal que se obtiene a largo plazo, cuando el sistema hidrogeológico ha alcanzado un estado de equilibrio, y ii) aquellas que consideran caudales transitorios o, dicho de otra manera, el caudal que se obtiene a corto plazo, cuando el sistema hidrogeológico no se ha estabilizado.

La solución analítica en la que se basa el método es la propuesta por Goodman et al. (1965):

$$Q_i = (2\pi K_i H_0) / \ln((2H_0)/r_0) \cdot L_i$$

Donde,

Qi = caudal drenado en el tramo de túnel (l/s)
Ki = conductividad hidráulica del tramo de túnel (m/s)
H0 = carga hidráulica a la cota del túnel (m)
Li = tramo acuífero interceptado (m)
r0 = radio del túnel (m)

El caudal global drenado en el túnel, a largo plazo, será igual a la suma del caudal drenado en cada tramo de túnel con características hidrogeológicas homogéneas.

La comparación de los caudales medidos en túneles ya excavados con aquellos obtenidos de las soluciones analíticas frecuentemente utilizadas, como aquella de Goodman, permite concluir que ésta última proporciona generalmente una sobrestimación del caudal esperado a largo plazo. Esto sobre todo se debe al hecho que la fórmula de Goodman toma en cuenta una carga hidráulica estática, que, en el presente caso, ha sido considerado el valor de la cota piezométrica medida en cada uno de los piezómetros instalados y funcionales, resumidos en la Tabla 5-2.40.

Las fórmulas analíticas permiten la obtención de un valor de referencia para el caudal esperado en el corto plazo, sin embargo, tienden a sobreestimar el caudal a largo plazo, especialmente para los túneles profundos. Esto se debe principalmente a que en estas soluciones se desprecia el efecto de la carga litostática sobre los parámetros hidrogeológicos, en particular, sobre la conductividad hidráulica. De hecho, la apertura de las fracturas y la permeabilidad del macizo disminuyen con el incremento de los esfuerzos efectivo. La ley de Terzaghi muestra que los esfuerzos efectivos σ' , pueden aumentar por dos razones: el aumento de los esfuerzos totales σ o la disminución de las presiones de poros p .

$$\sigma' = \sigma - p$$

En el ámbito de los túneles profundos, la reducción de la permeabilidad del macizo rocoso y en consecuencia del caudal drenado, es causada por:

- El aumento de los esfuerzos totales σ y de los esfuerzos efectivos σ' con el aumento de la profundidad de la obra subterránea (esto no siempre se cumple en zonas con fallas y estructuras verticales que presentan esfuerzos heterogéneo y anisotrópicos).
- La disminución de la presión de poros p debido al drenaje causado por el túnel

Estos efectos no se pueden incluir en la formula analítica para el cálculo del caudal debido a que la reducción de la permeabilidad es diferente para cada punto del macizo rocoso. Sin embargo, el caudal calculado con un método analítico Q_0 puede ser multiplicada por un factor de reducción α que tiene en cuenta el efecto de la disminución de la presión de poros sobre la permeabilidad para obtener el caudal reducido en función de esta:

$$Q_{rid} = Q_0 \alpha$$

A partir de la ley de Louis (1969):

$$K(h) = K_0 e^{-3b(h_0-h)}$$

Perrochet (2007) ha desarrollado el siguiente factor de reducción analítico:

$$\alpha = \frac{Q_{rid}}{Q_0} = \frac{1 - e^{-3b(h_0-h)}}{3b(h_0 - h)}$$

Donde $K(h)$ es la conductividad hidráulica en función del potencial de presión h , K_0 es la conductividad hidráulica cuando el potencial de presión h corresponde al potencial inicial h_0 y b es un parámetro que describe la resistencia elástica de las fracturas al aplastamiento y es una función del módulo elástico. En la valoración realizada, la definición del valor b se ha llevado a cabo tomando en consideración los valores del módulo elástico atribuido a las rocas y terrenos a lo largo del túnel.

En la formulación de las valoraciones llevadas a cabo en el ámbito del presente estudio:

- Q_0 es considerado el valor del caudal que será drenado en el túnel a corto tiempo o durante la fase de excavación.
- Q_{rid} representa por el contrario, el valor del caudal esperado en el túnel, una vez el sistema acuífero/túnel se ha estabilizado o a largo plazo, después de finalizada la excavación del túnel.

La dependencia de la porosidad de las fracturas a la presión efectiva es un proceso físico que también puede ocurrir en profundidades reducidas; sin embargo, a medida que la profundidad disminuye, este efecto se vuelve casi insignificante.

Cuando la profundidad y las presiones de poros aumentan se reduce el caudal drenado por el túnel y el efecto sobre la conductividad hidráulica y sobre el flujo se vuelven importantes. No obstante, esta tendencia podría no ser tan evidente en macizos fracturados o zonas de fallas geológicas.

Para la valoración del caudal de agua drenada en los túneles se han definido los siguientes elementos (la valoración se ha hecho tramo por tramo):

- Definición de las cargas hidráulicas en correspondencia con el eje del túnel.
- Identificación de las subunidades hidrogeológicas con comportamiento hidrodinámico homogéneo a lo largo del trazado de los túneles.
- Definición de los intervalos de variación de la permeabilidad para cada una de las subunidades hidrogeológicas.

La previsión del ingreso de agua en el interior del túnel, presentado en el capítulo correspondiente del presente informe, se refiere a un régimen tanto a corto como a largo plazo. El corto plazo se refiere a la etapa constructiva y el largo plazo a los años sucesivos después de terminada la excavación.

En definitiva, el intervalo del caudal a largo plazo, valorado en correspondencia con el eje del túnel, varía entre un valor mínimo y un valor máximo. En este caso específico, el valor mínimo representa las condiciones más favorables conexas con cargas hidráulicas H_0 mínimas en el que algunos tramos de túnel resultan ser excavados por encima del nivel freático. Sin embargo, es necesario recordar que el factor de reducción del caudal a largo plazo es más importante para cargas hidráulicas mayores. Esta condición es evidente a partir de los resultados de las evaluaciones analíticas presentadas en el próximo capítulo.

• Resultados del cálculo analítico

En la Tabla 5-2.41 se reportan todos los datos de “input” y de “output” de la valoración del caudal con método analítico. En los párrafos siguientes, por otro lado, se reportan los análisis del caudal a corto y largo plazo.

Se precisa que el cálculo analítico del caudal no toma en cuenta la limitación de la recarga de la superficie del caudal drenado en el túnel (abatimiento del nivel piezométrico). Por este motivo, la valoración analítica conlleva a una sobreestimación del caudal calculado a largo plazo, el cual se afecta significativamente por la tasa de recarga del sistema acuífero-túnel.

Sin embargo, este tipo de valoración si ha sido considerada por el cálculo del caudal realizado a través del modelo numérico. El resultado de este cálculo, que resulta ser más realista al largo plazo, se presenta en el capítulo siguiente.

Tomando en cuenta lo antes indicado se reporta a continuación el caudal calculado a corto y largo plazo con el método analítico que probé una estimación del caudal esperado en el túnel Pamplona.

Tabla 5-2.41. Cálculo analítico del caudal esperado en el túnel Pamplona a corto plazo.

DATOS											ANÁLISIS						
Geología			Progresiva		Fracturación	Carga Hidráulica		Radio Túnel	Tramo atravesado	Conductibilidad hidráulica	Caudal corto plazo		resistencia elástica de la roca	Factor de reducción caudal (efecto de disminuir la presión de poro)		Caudal largo plazo sin limitación de la recarga (modelo numérico)	
F	Roca	Fa lla	desde m	hasta m		H0 min m	H0 máx m				Qo min l/s/10 m	Qo max l/s/10 m		f min %	f max %	Q1 min l/s	Q1 max l/s
Capacho (Kic)	Lodolitas/Arcillolitas		K58+745	K58+755	H	0	2	5,8	10	1,0E-06	0,00	0,00	1E-02	0%	3%	0	0
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+755	K58+780	H	5	17,5	5,8	25	1,0E-06	0,60	0,64	1E-02	7%	22%	1,4	1,2
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+780	K58+810	H	17,5	27,5	5,8	30	1,0E-06	0,64	0,80	1E-02	22%	31%	1,5	1,6
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+810	K58+850	H	27,5	37,5	5,8	40	1,0E-06	0,80	0,96	1E-02	31%	39%	2,2	2,3
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+850	K58+880	L	37,5	42,5	5,8	30	4,3E-08	0,04	0,04	3E-03	16%	18%	0,1	0,1
	Lodolitas/Arcillolitas	F	K58+880	K58+885	H	42,5	42,5	5,8	5	1,0E-06	1,04	1,04	1E-02	43%	43%	0,3	0,3
Aguardiente (Kia)	Areniscas	F	K58+885	K58+890	H	42,5	42,5	5,8	5	1,6E-06	1,64	1,64	1E-02	43%	43%	0,5	0,5
	Areniscas		K58+890	K58+905	L	42,5	45	5,8	15	7,0E-07	0,70	0,73	5E-03	26%	27%	0,8	0,8
	Arcillolitas		K58+905	K58+970	M	40	45	5,8	65	3,2E-07	0,31	0,33	3E-03	17%	19%	1,7	1,7
	Arcillolitas		K58+970	K59+100	M	25	45	5,8	130	3,2E-07	0,23	0,33	3E-03	11%	19%	2,7	3,5
	Areniscas		K59+100	K59+160	L	30	60	5,8	60	7,0E-07	0,57	0,88	5E-03	19%	34%	2,8	3,5
	Areniscas		K59+160	K59+220	L	60	90	5,8	60	7,0E-07	0,88	1,16	5E-03	34%	45%	3,5	3,9
Tibú y Mercedes (Klim)	Arcillolitas		K59+220	K59+270	M	90	112,5	5,8	50	3,2E-07	0,53	0,62	3E-03	34%	39%	1,8	1,9
	Areniscas		K59+270	K59+340	L	112,5	130	5,8	70	7,0E-07	1,36	1,51	5E-03	51%	55%	4,7	4,7
	Arcillolitas		K59+340	K59+370	M	130	135	5,8	30	3,2E-07	0,69	0,71	3E-03	43%	45%	1,2	1,2
	Areniscas		K59+370	K59+450	L	130	135	5,8	80	7,0E-07	1,51	1,55	5E-03	55%	57%	5,4	5,4
	Arcillolitas	F	K59+450	K59+480	M	125	130	5,8	30	3,2E-07	0,67	0,69	3E-03	42%	43%	1,2	1,2
	Arcillolitas		K59+480	K59+540	L	117,5	125	5,8	60	4,3E-08	0,09	0,09	3E-03	41%	42%	0,3	0,3
	Arcillolitas		K59+540	K59+610	M	105	117,5	5,8	70	3,2E-07	0,59	0,64	3E-03	38%	41%	2,6	2,7
	Arcillolitas	F	K59+610	K59+620	M	100	105	5,8	10	1,0E-06	1,85	1,92	1E-02	68%	69%	0,6	0,6
	Arcillolitas		K59+620	K59+640	L	95	100	5,8	20	4,3E-08	0,07	0,08	3E-03	35%	36%	0,1	0,1
	Areniscas y Calizas		K59+640	K59+756	M	67,5	95	5,8	116	1,3E-06	1,70	2,15	1E-02	57%	66%	8,6	8,4
	Arcillolitas		K59+756	K59+812	H	62,5	67,5	5,8	56	1,0E-06	1,34	1,41	1E-02	54%	57%	3,4	3,4
	Arcillolitas		K59+812	K59+862	H	42,5	62,5	5,8	50	1,0E-06	1,04	1,34	1E-02	43%	54%	3,0	3,1
	Arcillolitas		K59+862	K59+912	H	10	42,5	5,8	50	1,0E-06	0,53	1,04	1E-02	13%	43%	2,3	3,0
	Areniscas	F	K59+912	K59+940	M	0	10	5,8	28	1,3E-06	0,00	0,64	1E-02	0%	13%	0	1,6
Girón (Jg)	Suelos residuales		K59+940	K60+075	H	0	2	5,8	135	2,0E-08	0,00	0,00	1E-02	0%	3%	0	0

Fuente: Geodata, 2018

- Corto plazo o durante construcción:

Los caudales a corto plazo se expresan en l/s/10 m de túnel excavado. Representan los caudales esperados en el frente de excavación y están destinados a disminuir con el tiempo y, a veces, a desaparecer completamente en función de su conexión con las áreas de alimentación de los circuitos hídricos subsuperficial y subterráneos y de las medidas que se apliquen para bloquear estos flujos. Los valores suministrados a corto plazo deben ser interpretados como valores de caudal específico (no pico) para un tramo de 10 m próximos al frente de excavación.

Los caudales calculados a lo largo del túnel muestran como las condiciones hidráulicas previstas son más o menos constantes a lo largo de todo el túnel. Si se excluyen los tramos próximos a los portales, donde los caudales serán nulos si se excava por encima del nivel freático, los caudales a corto plazo se encuentran comprendidos entre 0.05 y 2.0 l/s/10m. Estos valores pueden llegar a incrementarse considerablemente durante la excavación del túnel si se interceptan discontinuidades más permeables (p.e. $k=1E-5$ m/s) en correspondencia con las cargas hidráulicas mayores (p.e. 100 -130 m), en estos casos pueden llegar a presentarse caudales de pico del orden de 23 l/s. En la Tabla 5-2.42 se indican los caudales a corto plazo a lo largo del túnel Pamplona.

Tabla 5-2.42 Valores de caudales específicos a corto plazo a lo largo del túnel Pamplona (valores mínimos y máximos).

Geología			Progresiva		Caudal corto plazo	
Roca		Falla	desde	hasta	Q0 min (l/s/10m)	Q0 max (l/s/10m)
Kic	Lodolitas/Arcillolitas		K58+745,00	K58+755,00	0	0
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+755,00	K58+780,00	0,6	0,6
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+780,00	K58+810,00	0,6	0,8
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+810,00	K58+850,00	0,8	1,0
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+850,00	K58+880,00	0	0
	Lodolitas/Arcillolitas	F	K58+880,00	K58+885,00	1	1
Kia	Areniscas	F	K58+885,00	K58+890,00	1,6	1,6
	Areniscas		K58+890,00	K58+905,00	0,7	0,7
	Arcillolitas		K58+905,00	K58+970,00	0,3	0,3
	Arcillolitas		K58+970,00	K59+100,00	0,2	0,3
	Areniscas		K59+100,00	K59+160,00	0,6	0,9
	Areniscas		K59+160,00	K59+220,00	0,9	1,2
Kitm	Arcillolitas		K59+220,00	K59+270,00	0,5	0,6
	Areniscas		K59+270,00	K59+340,00	1,4	1,5
	Arcillolitas		K59+340,00	K59+370,00	0,7	0,7
	Areniscas		K59+370,00	K59+450,00	1,5	1,6
	Arcillolitas	F	K59+450,00	K59+480,00	0,7	0,7
	Arcillolitas		K59+480,00	K59+540,00	0,1	0,1
	Arcillolitas		K59+540,00	K59+610,00	0,6	0,6
	Arcillolitas	F	K59+610,00	K59+620,00	1,9	1,9
	Arcillolitas		K59+620,00	K59+640,00	0,1	0,1
	Areniscas y Calizas		K59+640,00	K59+756,00	1,7	2
	Arcillolitas		K59+756,00	K59+812,00	1,3	1,4
	Arcillolitas		K59+812,00	K59+862,00	1	1,3
	Arcillolitas		K59+862,00	K59+912,00	0,5	1
	Areniscas	F	K59+912,00	K59+940,00	0	0,6
Jg	Suelos residuales		K59+940,00	K60+075.36	0	0

Fuente: Geodata, 2018

- Largo plazo sin considerar la limitación de la recarga

Los caudales a largo plazo representan la evolución en el tiempo del caudal a corto plazo una vez que este último se encuentre estabilizado en equilibrio con el drenaje creado a través del túnel. Se suministran en l/s y deben entenderse como los caudales esperados a lo largo de todos los tramos homogéneos. En este caso, es posible evaluar un valor de flujo global para todo el túnel.

Como se ha indicado precedentemente, la reducción de los caudales en el tiempo está directamente conexas con la calidad del macizo rocoso (aquí definido por el módulo elástico) y por la tasa de recarga, no considerada en el cálculo analítico, pero si en la simulación numérica. En particular, a cada tramo homogéneo se le ha atribuido un valor de módulo elástico específico acorde con la valoración geológica y geomecánica provista.

A propósito de la incidencia de la carga hidráulica sobre la valoración del factor de reducción del caudal, se enfatiza que este último será aún más importante a medida que la carga hidráulica sea mayor; en otras palabras, se tendrá un porcentaje de reducción más importante para cargas hidráulicas mayores en correspondencia de las cuales se tiene normalmente el caudal a corto plazo más alto. Por lo tanto, los caudales bajos relacionados con cargas hidráulicas reducidas permanecen más constantes en el tiempo, mientras las entradas de agua que suceden en correspondencia con zonas de mayor carga hidráulica sufrirán una reducción más significativa.

Tomando en consideración lo antes expuesto, se ha procedido con la valoración de los caudales a largo plazo para el túnel Pamplona, los cuales se presentan en la Tabla 5-2.43 y varían entre 52 y 57 l/s. Estos caudales de largo plazo representan unos valores potenciales acumulados de caudal de infiltración, mas no una ocurrencia real a futuro de los mismos, debido a que el cálculo analítico no considera variaciones en la recarga ni otros fenómenos dados en el tiempo (como la afectación diferencial de la cabeza piezométrica según avance de la excavación, entre otros) los cuales sí se manejan a través el modelo numérico. Sólo son comparables directamente los valores a muy corto plazo.

Tabla 5-2.43 – Valores de caudales estabilizados a largo plazo a lo largo del túnel Pamplona sin considerar limitación de la recarga (valores mínimos y máximos).

Geología			Progresiva		Caudal largo plazo sin limitación de recarga			
Roca	Falla		desde	hasta	Q1 min		Q1 max	
			m	m	l/s/10m	l/s	l/s/10m	l/s
Kic	Lodolitas/Arcillolitas		K58+745,00	K58+755,00	0	0	0	0
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+755,00	K58+780,00	0,6	1,4	0,5	1,2
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+780,00	K58+810,00	0,5	1,5	0,5	1,6
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+810,00	K58+850,00	0,5	2,2	0,6	2,3
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+850,00	K58+880,00	0,03	0,1	0,04	0,1
	Lodolitas/Arcillolitas	F	K58+880,00	K58+885,00	0,6	0,3	0,6	0,3
Kia	Areniscas	F	K58+885,00	K58+890,00	0,9	0,5	0,9	0,5
	Areniscas		K58+890,00	K58+905,00	0,5	0,8	0,5	0,8

Geología			Progresiva		Caudal largo plazo sin limitación de recarga			
Roca	Falla		desde	hasta	Q1 min		Q1 max	
			m	m	l/s/10m	l/s	l/s/10m	l/s
Kia		Arcillolitas	K58+905,00	K58+970,00	0,3	1,7	0,3	1,7
		Arcillolitas	K58+970,00	K59+100,00	0,2	2,7	0,3	3,5
		Areniscas	K59+100,00	K59+160,00	0,5	2,8	0,6	3,5
		Areniscas	K59+160,00	K59+220,00	0,6	3,5	0,6	3,9
Kitm		Arcillolitas	K59+220,00	K59+270,00	0,4	1,8	0,4	1,9
		Areniscas	K59+270,00	K59+340,00	0,7	4,7	0,7	4,7
		Arcillolitas	K59+340,00	K59+370,00	0,4	1,2	0,4	1,2
		Areniscas	K59+370,00	K59+450,00	0,7	5,4	0,7	5,4
	F	Arcillolitas	K59+450,00	K59+480,00	0,4	1,2	0,4	1,2
		Arcillolitas	K59+480,00	K59+540,00	0,05	0,3	0,1	0,3
		Arcillolitas	K59+540,00	K59+610,00	0,4	2,6	0,4	2,7
	F	Arcillolitas	K59+610,00	K59+620,00	0,6	0,6	0,6	0,6
		Arcillolitas	K59+620,00	K59+640,00	0,05	0,1	0,05	0,1
		Areniscas y Calizas	K59+640,00	K59+756,00	0,7	8,6	0,7	8,4
		Arcillolitas	K59+756,00	K59+812,00	0,6	3,4	0,6	3,4
		Arcillolitas	K59+812,00	K59+862,00	0,6	3,0	0,6	3,1
		Arcillolitas	K59+862,00	K59+912,00	0,5	2,3	0,6	3,0
	F	Areniscas	K59+912,00	K59+940,00	0	0	0,6	1,6
Jg		Suelos residuales	K59+940,00	K60+075.36	0	0	0	0
					52		57	

Fuente: Geodata, 2018

- Largo plazo considerando la limitación de la recarga valorada con la modelación numérica:

No obstante, como se ha indicado anteriormente, los valores reportados en la Tabla 5-2.43 no consideran la limitación de la recarga del sistema acuífero-túnel en relación con el caudal drenado por el túnel y por lo tanto los valores tienden a sobre-estimarse.

No obstante, gracias a la modelación numérica y valoración de la recarga ha sido posible valorar el caudal drenado por el túnel Pamplona a largo plazo considerando la recarga efectiva del sistema acuífero-túnel interceptado por la obra subterránea. En estos cálculos no se tienen en cuenta las medidas propuestas para incrementar la recarga.

Una vez el túnel ha sido excavado, la permeabilidad del macizo rocoso atravesado comprendida entre 1E-7 m/s y 1E-6 m/s y la baja tasa de infiltración desde la superficie, pueden determinar el abatimiento del nivel piezométrico en correspondencia con el eje del túnel. Al largo plazo, el caudal drenado en el túnel varía en el tiempo hasta estabilizarse después de 10 años, en particular resultan los siguientes valores:

- Después de 1 año de excavado el túnel pamplona el caudal total resulta del orden de 23 l/s.
- Después de 5 año de excavado el túnel pamplona el caudal total resulta del orden de 12 l/s.
- Después de 10 año de excavado el túnel pamplona el caudal total resulta del orden de 8 l/s.

En la Tabla 5-2.44 se reportan los resultados finales de cálculo del caudal esperado en el túnel. Es posible apreciar, tramo por tramo, la evolución en el tiempo del caudal a corto plazo valorado con método analítico y el caudal a largo plazo en el que se ha tenido en cuenta el aporte del modelo numérico.

Si bien es cierto que la recarga por agua de lluvia por encima de la cota del túnel es baja se debe tener en cuenta que el valle estructural donde nace la quebrada San Antonio ubicada a aprox. 100 m al norte de la traza del túnel, constituye una zona donde convergen escurrientías de cuencas vecinas que ofrecen una buena disponibilidad hídrica en este sector específico, cuya topografía suave favorece los procesos de infiltración, lo cual mitiga el efecto de descenso del nivel piezométrico por la presencia del túnel y sus efectos colaterales, pudiendo llegar a retardarlo significativamente.

Vale la pena aclarar que los valores calculados de caudales a corto y largo plazo están estrechamente ligados a las condiciones geotécnicas del macizo rocoso y cargas hidráulicas que se prevén encontrar durante la excavación del túnel Pamplona. Si estas variables cambian, o varían respecto a lo originalmente previsto, los valores de caudales calculados deben ser revisados y actualizados. En otras palabras, la fiabilidad del modelo hidrogeológico está estrechamente ligada a la fiabilidad del modelo geológico y geotécnico de referencia del túnel.

Tabla 5-2.44. Cálculo del caudal esperado en el túnel (valoración analítica) a largo plazo con aplicación de la valoración numérica.

Geología			Progresiva		Caudal largo plazo sin limitación de la recarga				Filtro numérico - caudales Largo Plazo (1 año) con limitación de la recarga entregada para el modelo numérico			Filtro numérico - caudales Largo Plazo (5 años) con limitación de la recarga entregada para el modelo numérico			Filtro numérico - caudales Largo Plazo (10 años) con limitación de la recarga entregada para el modelo numérico		
					Q1 min		Q1 max		Red %		red %		red %				
Roca		Falla	desde	hasta	l/s/10m	l/s	l/s/10m	l/s	Red %	l/s/10m	l/s	red %	l/s/10m	l/s	red %	l/s/10m	l/s
Kic	Lodolitas/Arcillolitas		K58+745,00	K58+755,00	0	0	0	0	23%	0,00	0,000	13%	0,00	0,000	10%	0,00	0,000
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+755,00	K58+780,00	0,6	1,4	0,5	1,2	23%	0,14	0,346	13%	0,08	0,196	10%	0,06	0,151
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+780,00	K58+810,00	0,5	1,5	0,5	1,6	14%	0,09	0,268	6%	0,04	0,115	5%	0,03	0,096
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+810,00	K58+850,00	0,5	2,2	0,6	2,3	14%	0,11	0,449	6%	0,05	0,192	5%	0,04	0,160
	Lodolitas/Arcillolitas		K58+850,00	K58+880,00	0,03	0,1	0,04	0,1	14%	0,01	0,017	6%	0,00	0,007	5%	0,00	0,006
	Lodolitas/Arcillolitas	F	K58+880,00	K58+885,00	0,6	0,3	0,6	0,3	14%	0,15	0,073	6%	0,06	0,031	5%	0,05	0,026
Kia	Areniscas	F	K58+885,00	K58+890,00	0,9	0,5	0,9	0,5	14%	0,23	0,115	6%	0,10	0,049	5%	0,08	0,041
	Areniscas		K58+890,00	K58+905,00	0,5	0,8	0,5	0,8	14%	0,10	0,147	6%	0,04	0,063	5%	0,04	0,053
	Arcillolitas		K58+905,00	K58+970,00	0,3	1,7	0,3	1,7	14%	0,04	0,281	6%	0,02	0,120	5%	0,02	0,100
	Arcillolitas		K58+970,00	K59+100,00	0,2	2,7	0,3	3,5	14%	0,03	0,427	6%	0,01	0,183	5%	0,01	0,153
	Areniscas		K59+100,00	K59+160,00	0,5	2,8	0,6	3,5	14%	0,08	0,477	6%	0,03	0,204	5%	0,03	0,170
	Areniscas		K59+160,00	K59+220,00	0,6	3,5	0,6	3,9	31%	0,27	1,629	16%	0,14	0,841	11%	0,10	0,578
Kitm	Arcillolitas		K59+220,00	K59+270,00	0,4	1,8	0,4	1,9	31%	0,16	0,822	16%	0,08	0,424	11%	0,06	0,292
	Areniscas		K59+270,00	K59+340,00	0,7	4,7	0,7	4,7	31%	0,42	2,952	16%	0,22	1,524	11%	0,15	1,047
	Arcillolitas		K59+340,00	K59+370,00	0,4	1,2	0,4	1,2	31%	0,21	0,643	16%	0,11	0,332	11%	0,08	0,228
	Areniscas		K59+370,00	K59+450,00	0,7	5,4	0,7	5,4	31%	0,47	3,750	16%	0,24	1,936	11%	0,17	1,331
	Arcillolitas	F	K59+450,00	K59+480,00	0,4	1,2	0,4	1,2	31%	0,21	0,625	16%	0,11	0,323	11%	0,07	0,222
	Arcillolitas		K59+480,00	K59+540,00	0,05	0,3	0,1	0,3	31%	0,03	0,161	16%	0,01	0,083	11%	0,01	0,057
	Arcillolitas		K59+540,00	K59+610,00	0,4	2,6	0,4	2,7	31%	0,18	1,284	16%	0,09	0,663	11%	0,07	0,456
	Arcillolitas	F	K59+610,00	K59+620,00	0,6	0,6	0,6	0,6	31%	0,57	0,574	16%	0,30	0,296	11%	0,20	0,204
	Arcillolitas		K59+620,00	K59+640,00	0,05	0,1	0,05	0,1	31%	0,02	0,046	16%	0,01	0,024	11%	0,01	0,016
	Areniscas y Calizas		K59+640,00	K59+756,00	0,7	8,6	0,7	8,4	31%	0,53	6,103	16%	0,27	3,150	11%	0,19	2,166
	Arcillolitas		K59+756,00	K59+812,00	0,6	3,4	0,6	3,4	14%	0,19	1,047	6%	0,08	0,449	5%	0,07	0,374
	Arcillolitas		K59+812,00	K59+862,00	0,6	3,0	0,6	3,1	14%	0,15	0,727	6%	0,06	0,311	5%	0,05	0,260
	Arcillolitas		K59+862,00	K59+912,00	0,5	2,3	0,6	3,0	14%	0,07	0,371	6%	0,03	0,159	5%	0,03	0,132
	Areniscas	F	K59+912,00	K59+940,00	0	0	0,6	1,6	23%	0,00	0,000	13%	0,00	0,000	10%	0,00	0,000
Jg	Suelos residuales		K59+940,00	K60+075.36	0	0	0	0	23%	0,00	0,000	13%	0,00	0,000	10%	0,00	0,000
						52		57			23			12			8

Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.11 Probabilidad de afectación de los puntos de agua censados mediante método DHI (Drowdown Hazard Index).

Este capítulo abarca la previsión, expresada en términos probabilísticos, del potencial de afectación de los puntos de agua localizados en el área de influencia del túnel Pamplona, debido a la excavación de esta obra subterránea.

El análisis de la probabilidad de afectación se ha llevado a cabo sobre 14 puntos de agua ubicados en el área de influencia del túnel y sus inmediaciones. Estos puntos de agua fueron identificados durante el inventario realizado en época húmeda e intermedia y constituyen una muestra representativa de los recursos hídricos presentes en la zona de influencia del túnel. El análisis y los resultados obtenidos para el túnel Pamplona fueron hechos bajo la condición constructiva de túnel drenante.

La metodología de cálculo utilizada para este análisis es conocida como *Drawdown Hazard Index* (DHI, Dematteis et al., 2001, Torri & Dematteis, 2007⁴), fue presentada en el congreso mundial de túneles organizado por AITES ITA en el 2001, celebrado en Milano-Italia, y provee una definición probabilística acerca de la ocurrencia del fenómeno de afectación de los recursos hídricos debido a la excavación de obras subterráneas. En el parágrafo siguiente se describe en detalle la metodología DHI.

En la literatura existente, el tema relacionado con la probabilidad de afectación de puntos de agua en superficie debido a la construcción específica de túneles es tratado generalmente mediante enfoques cualitativos y subjetivos o mediante la aplicación de modelos numéricos de flujo enfocados a casos específicos. El método DHI utilizado en el presente estudio para valorar la probabilidad de afectación de las fuentes de aguas localizadas en superficie debido a la construcción del túnel Pamplona, representa el único método, según el conocimiento de los autores, que permite obtener un resultado mediante un proceso estandarizado y verificable. A manera de ejemplo se cita la valoración que algunos autores reconocidos han hecho del método en cuestión, como por ejemplo Vincenzi et al. (2010) quien ilustra una comparación del método DHI con el modelo numérico de flujo.

Por las razones antes expuestas se concluye como el método DHI aplicado en el presente estudio del componente hidrogeológico, constituye el método idóneo para llevar a cabo la valoración de afectación aquí relacionada, dado que fue concebido específicamente para este fin y el mismo ha sido aplicado con éxito en estudios análogos realizados para diferentes túneles como por ejemplo túnel del Perthus (España-Francia), túnel Torino-Lyon (Italia-Francia), túnel Villarodaine Bourget (Francia) y túnel Terzo Valico (Italia). En Colombia ha sido aplicado en el marco del desarrollo de estudios de impacto ambiental para los siguientes túneles: túneles de oriente en vía Medellín – Río Negro (dos túneles viales), túneles ruta del sol, sector 1, tramo 1 (16 túneles viales), túneles vía al Mar2 (14 túneles viales), túneles carretera Bogotá – Villavicencio, sector chirajara – bijagual (5 túneles), entre

⁴ Dematteis, A., Kalamaras, G., Eusebio, A. (2001). "A systems approach for evaluating springs drawdown due to Túneling", AITES-ITA 2001 World Túnel Congress, Milano, Italy 10-13 June, II, pp. 257-264.

Torri, R., Dematteis, A. (2007). "Drawdown hazard of springs and wells in Túneling: predictive model and verification" Proc. XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems, Lisbon 17-21 Sept. 2007, 10 pp.

otros.

En la Tabla 5-2.48 del presente informe, se calcula el valor DHI para los puntos de agua localizados en la zona de influencia del túnel Pamplona.

5.1.8.11.1 Método del cálculo

A continuación, se presenta la descripción del método para la valoración del índice de probabilidad de afectación de los puntos de agua subsuperficial y subterránea (DHI).

El sistema *acuífero – túnel* es analizado detalladamente por ocho (8) variables, que están relacionadas con el fenómeno de abatimiento del nivel freático y de la afectación de los puntos de agua presentes en superficie. Entre estas ocho (8) variables, cuatro (4) de ellas se definen como variables fundamentales del sistema, y se refieren a las condiciones hidrogeológicas a cota del túnel en el tramo de proyección del punto de agua en superficie, y las cuatro (4) restantes son considerados como factores claves, y se relacionan con las características geométricas y geológicas que conectan el punto de agua en superficie con el túnel en profundidad.

Con el fin de realizar el cálculo del índice de la probabilidad de afectación de los puntos de agua (DHI), a cada punto se le asigna un valor numérico para cada una de las variables antes descritas, valores que representan las condiciones hidrogeológicas típicas para aquel punto de agua en particular. La asignación del valor numérico de la variable obedece siempre al siguiente criterio; valores bajos para las condiciones de menor probabilidad de afectación y valores altos para aquella de mayor probabilidad.

Tal método de atribución de los valores de la variabilidad requiere, obviamente, tratar puntos de agua localizados geográficamente de manera unívoca, y para los cuales sea posible una proyección puntual sobre el trazado del túnel.

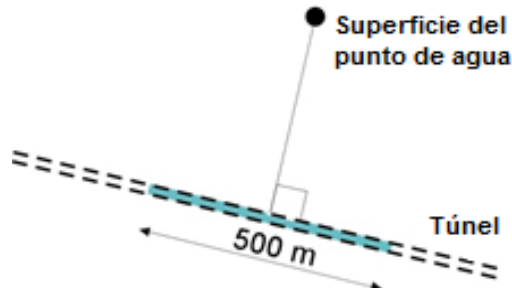
- **Sistema de proyección del punto de agua sobre el túnel**

Dado que todas las variables del sistema se relacionan con las condiciones geomecánicas e hidrogeológicas previstas a lo largo del trazado del túnel, es necesario proyectar, en planta, cada punto de agua sobre el trazado mismo, como se indica en la Figura 5-2.71.

En presencia de zonas de fallas o de estructuras geológicas permeables particulares, con orientación no perpendicular al túnel, la distancia del túnel ha sido considerada a lo largo de la estructura misma, porque se supone que el hipotético flujo de agua que podría drenar al punto en análisis tendrá lugar en esta dirección. En este caso, la proyección del punto recae en correspondencia con la intersección de la zona de falla con el túnel.

Para los puntos de agua en proximidad de los portales, cuya proyección perpendicular al trazado cae fuera del trazado mismo, la proyección se ha hecho sobre la última progresiva del túnel más cercana al punto.

Figura 5-2.71. Esquema de la relación geométrica entre la posición del punto de agua considerado y el tramo de túnel de referencia.



Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

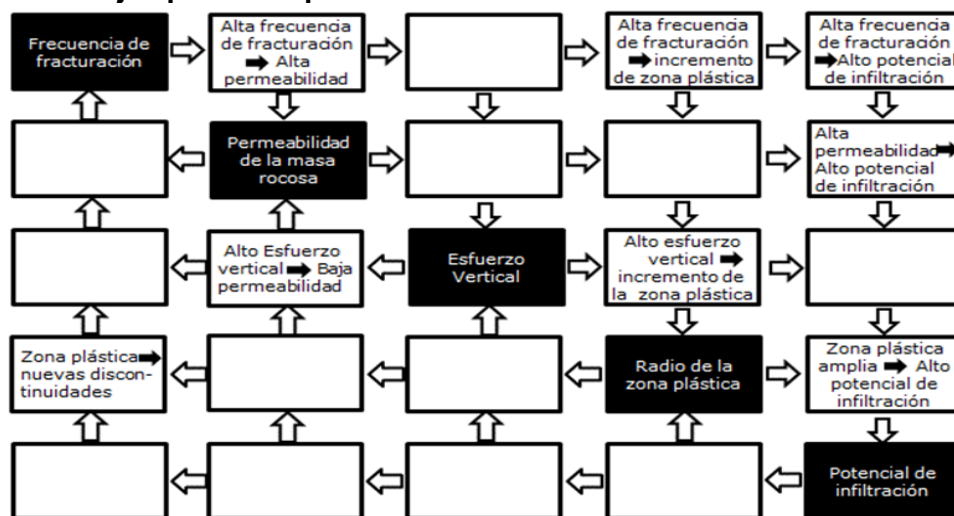
La proyección en planta de cada punto de agua sobre el trazado ha permitido determinar la progresiva de referencia del punto de agua, y obtener los valores de las variables con base en las condiciones geológicas e hidrogeológicas previstas a lo largo del eje del túnel. Los valores han sido asignados considerando una franja de 250 m entorno a la proyección del punto de agua sobre el eje, porque se considera que las interacciones mayores se manifestarán sobre este intervalo.

5.1.8.11.2 Descripción de las variables del sistema

- Variables fundamentales del sistema**

La interacción entre las cuatro variables fundamentales del sistema *acuífero-túnel* se describe en la matriz de la Figura 5-2.72 mediante relación de causa-efecto entre las mismas variables. La interacción entre ellas determina el potencial de drenaje que el tramo de túnel examinado tiene sobre los puntos de agua (PI).

Figura 5-2.72. Ejemplo conceptual de la matriz del sistema Acuífero-túnel



Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

- Frecuencia de fracturación (FF):

La presencia de fracturas mayores o menores que interceptan el túnel, condicionan directamente la posibilidad de drenaje que ellas tienen sobre el macizo. De este modo, una mayor fracturación determina una mayor permeabilidad y, en consecuencia, una mayor posibilidad de flujo al interior del túnel. Adicionalmente, la frecuencia de fracturación afecta directamente dos de las variables fundamentales descritas a continuación: la permeabilidad del macizo y la amplitud de la zona plástica sobre el contorno de la excavación subterránea (que aumenta con la misma). La caracterización ha sido hecha con base en el perfil geológico y geotécnico de referencia del proyecto y con los nuevos datos geológicos obtenidos durante la campaña de investigaciones del presente estudio, identificándose sectores caracterizados por la presencia de roca sana, roca fracturada y zonas de fallas.

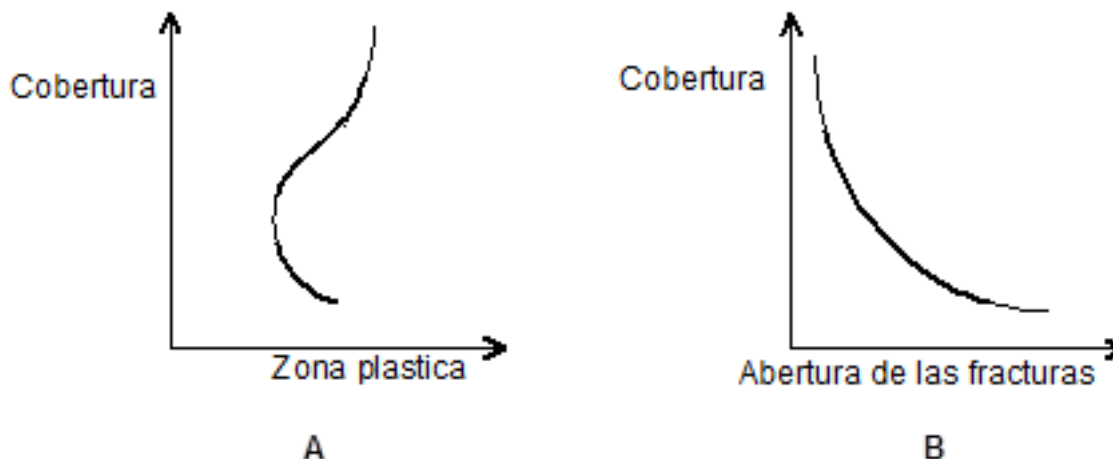
- Permeabilidad del macizo (MK):

Se trata del grado de permeabilidad asignado a los diferentes complejos hidrogeológicos reconocidos en el sistema *acuífero-túnel* e interceptados por el túnel. Tal variable toma en cuenta tanto la permeabilidad debida al componente homogéneo de la fracturación (conductividad de cada fractura en particular), como la permeabilidad intrínseca de la matriz rocosa y describe un grado de permeabilidad equivalente de todo el sistema.

- Espesor de la cobertura (OV):

El espesor de la cobertura influye en el efecto drenante del túnel ya sea en el entorno de la excavación, en la zona plástica, como en el macizo mismo, donde se observa un progresivo cierre de la fractura con la profundidad debido a la variación de las condiciones de esfuerzos locales. En la Figura 5-2.73 se muestra un ejemplo del modelo conceptual.

Figura 5-2.73. Esquema de la influencia que la cobertura tiene sobre la amplitud de la zona plástica que se forma entorno de una excavación subterránea (A) y, a la escala del macizo, sobre la abertura media de las fracturas (B).



Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

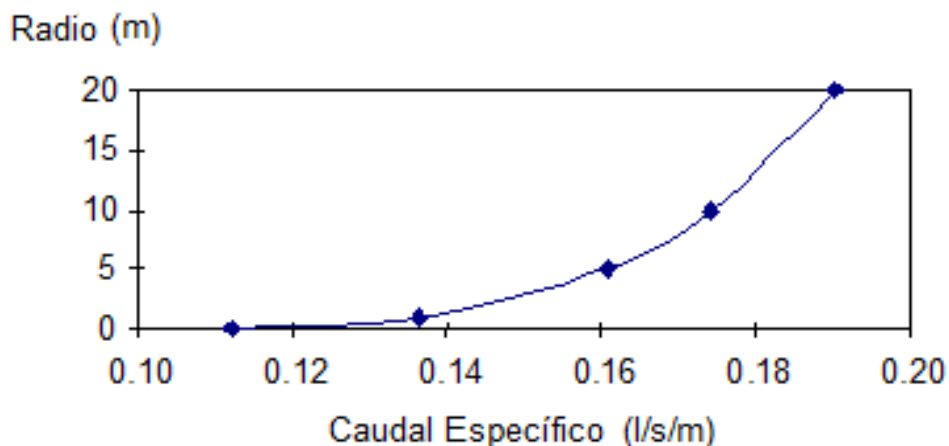
- Amplitud de la zona plástica (PZ):

La zona plástica que se forma en el contorno de la excavación por efecto de la perturbación

del campo local de esfuerzos corresponde a una franja de roca intensamente fracturada y por lo tanto de mayor permeabilidad; de amplitud variable entre 1 y 2-3 veces el diámetro de la excavación. La extensión de la zona plástica está en función del diámetro del túnel, del espesor de la cobertura, de la técnica de excavación adoptada y, más en general, de las características geomecánicas del macizo. El valor numérico de la variable PZ ha sido asignado en cada caso considerado a partir de las características geomecánicas del macizo rocoso.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona plástica puede ser entendida como un volumen de roca donde aumenta el potencial drenante de la excavación, implicando un aumento del efecto drenante del túnel. La variación del efecto drenante al variar las dimensiones de la zona plástica puede ser simulado, en una primera aproximación, con enfoques analíticos tomados de la literatura (p.e. túnel que drena un acuífero no perturbado infinitamente extenso en un medio homogéneo, GOODMAN et al., 1965, BRUCE et al., 1980, ALBERTS & GUSTAFSON, 1983). Asumiendo, por ejemplo, una conductividad hidráulica del macizo rocoso del orden de 10^{-6} m/s y una carga hidráulica al nivel del túnel igual a 100 m, resulta como el radio del túnel influye de manera significativa en la cantidad de agua drenada (ver Figura 5-2.74). Si se asume que en la zona plástica la permeabilidad sea superior en uno o más órdenes de magnitud a aquella del macizo, entonces, al efecto drenante de la excavación se sumara a aquel de la zona plástica circunscrita en su contorno.

Figura 5-2.74. Relación entre el radio del túnel y el caudal drenado (aplicando la fórmula de GOODMAN et al., 1965)



Fuente: Goodman et. al, 1965

En el caso que nos ocupa, en la valoración de la variable PZ se ha considerado una zona plástica de amplitud equivalente a dos veces el radio de la excavación.

- **Factores claves del sistema**

- Distancia del túnel (DT):

Esta variable ha sido valorada determinando la distancia entre el punto de agua y el túnel. Para esto se considera la proyección en planta y la diferencia de cota. En presencia de zonas de falla, la distancia al túnel ha sido considerada a lo largo de la zona de falla, porque se supone que el hipotético flujo de agua que podría drenar al punto en análisis circulará a lo largo de esta dirección. Con base en la experiencia obtenida en contextos hidrogeológicos análogos, han sido asignados valores diversos para clases de distancia DT, asumiendo que, para distancias inferiores a 200 m, el efecto es máximo, y para distancias superiores a 5000 m, el efecto es despreciable.

- Intersección con canales de permeabilidad alta (CP):

Esta variable toma en consideración la presencia de zonas de elevada conductividad hidráulica entre el punto de agua y el túnel. Desde un punto de vista geológico, este caso puede estar representado por zonas de falla, zonas de intensa fracturación, o por niveles con disolución química, carsismo o pseudo-carsismo. En el caso en el cual uno de estos canales de alta permeabilidad conecte hidráulicamente un punto de agua en superficie con el túnel, se crea una continuidad ideal entre los dos puntos. En estas condiciones la probabilidad de afectación del punto de agua crece drásticamente.

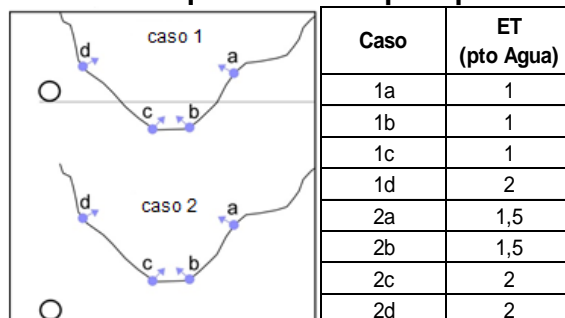
Para el caso en estudio se ha asumido una conexión punto de agua/túnel para todos aquellos puntos de agua situados a una distancia inferior o igual a 50 m de una zona de falla. En el contexto geológico interceptado por el túnel pamplona, es posible la presencia de fenómenos de pseudo-carsismo especialmente en la formación Tibú-Mercedes.

- Efecto topográfico (ET):

Se trata de una variable que considera el aspecto morfológico del contexto en el que se sitúa el punto de agua en evaluación. La recíproca posición del punto de agua y el túnel respecto al perfil topográfico de la ladera puede influir en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de drenaje. En el esquema conceptual de la Figura 5-2.75 se muestran los casos posibles, así como su respectiva valoración numérica. El valor asignado a la variable ET asume valor de 1 para las condiciones de menor probabilidad de afectación y un valor de 2 para aquella de mayor probabilidad.

En el caso de los puntos de agua, que pueden estar localizados sea sobre la ladera como en su parte inferior (pie), y por lo tanto no en el fondo del valle, se distinguen ocho (8) casos diferentes, que toman en cuenta la ubicación del punto de agua y el túnel sobre la misma ladera o sobre laderas diferentes y su recíproca posición en cota.

Figura 5-2.75. Esquema conceptual del efecto topográfico (ET). En la tabla de la izquierda se muestran los valores que asume ET para puntos de agua.



Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

- Tipo de puntos de agua (TS):

Esta variable valora el tipo de relación que el punto de agua tiene con el sistema de flujo hídrico subsuperficial y subterráneo. Se distinguen tres tipos: someros, profundos y mixtos. En el caso de los puntos de agua someros (en adelante subsuperficiales) la manifestación hídrica es alimentada desde los terrenos de cobertura cuaternaria o desde una variación local de la intensidad de fracturación y alteración de la parte cortical del substrato; la surgencia hídrica en este caso se localiza frecuentemente en correspondencia con cambios morfológicos de la ladera y es alimentada por sistemas de flujos locales. Los puntos de agua profundos son generalmente alimentados por sistemas de flujos más extensos, desarrollados al interior del macizo rocoso; los cuales pueden emerger en correspondencia con límites de permeabilidad representados por fallas o por contactos tectónicos o estratigráficos, muchos de ellos evidenciados por cambios fuertes en la topografía. Los puntos de agua mixtos representan un caso intermedio, presentando alimentación ya sea subsuperficial como profunda, con porcentajes variables.

En el caso en examen no se han encontrado casos de puntos de agua alimentados claramente y exclusivamente por circuitos profundos en el área interceptada por el trazado del túnel Pamplona. Por lo tanto, todos los puntos censados han sido clasificados en su gran mayoría como subsuperficiales, con aportes menos relevantes de flujos mixtos. Los puntos de agua con alimentación mixta representan un caso intermedio, contienen alimentación ya sea superficial como profunda, con porcentajes variables. La valoración asignada es la siguiente: 1a-punto de agua subsuperficial (1), 1b-Punto de agua Intermedio (1,5) y 1c-Puntos de agua Profundo (2).

A diferencia de las demás variables, que relacionan el punto de agua con la condición prevista a lo largo del túnel, el tipo de alimentación (TS) es específico de cada punto de agua examinado, independientemente de la presencia del túnel en análisis.

- **Definición del índice de las variables**

En la Tabla 5-2.45 se definen las ocho (8) variables y su índice correspondiente, necesario para el cálculo del DHI.

Tabla 5-2.45. Descripción de las ocho (8) variables del sistema acuífero-túnel y definición de los índices correspondientes para los puntos de agua.

Código	Descripción	Valor numérico
FF	Frecuencia de fracturación	1 = fallas principales y/o zona de fracturación con desarrollo de morfología cárstica; 0,75 = zona de mayor fracturación y/o alteración hidrotermal (sin morfología cárstica); 0,1 = ausencia de fallas principales y/o zonas de fracturación y disolución.
MK	Permeabilidad del macizo	0,9 = permeabilidad de alta a muy alta; 0,75 = permeabilidad alta; 0,5 = permeabilidad media; 0,25 = permeabilidad baja; 0,1 = permeabilidad baja a muy baja.
OV	Espesor de la cobertura	0,9 = cobertura < 50 m; 0,5 = 50 m < cobertura < 100 m; 0,2 = 100 m < cobertura < 500 m; 0,1 = cobertura > 500 m
PZ	Extensión de la zona plástica	1 = radio zona plástica > diámetro túnel; 0 = radio zona plástica < diámetro túnel.
DT	Distancia del túnel	1,9 = dist. eje. < 200 m; 1,5 = 200 m < dist. eje. < 500 m; 1,2 = 500 m < dist. eje. < 1000 m; 1,1 = 1000 m < dist. eje. < 5000 m; 0 = dist. eje. > 5000 m
CP	Intersección con canales de permeabilidad	2 = intersección con fallas mayores y/o zona de disolución con desarrollo de régimen hidrodinámico de tipo cárstico; 1,5 = presunta intersección (p.e. falla evidenciada en planta, pero no en el perfil, o puntos en el tramo de una zona de falla, sin la certeza que esté conectado a ella; 1 = ninguna intersección.
ET	Efecto topográfico	2 = distancia vertical > 0 y misma ladera; 1 = túnel parietal y otra ladera o distancia vertical < 0 y misma ladera; 1,5 = distancia vertical > 0 y otra ladera.
TS	Tipo de Punto de agua	2 = Puntos de agua profundo (alimentada desde el substrato rocoso); 1,5 = puntos de agua mixto; 1 = puntos de agua subsuperficial (alimentada principalmente desde depósitos cuaternarios o cobertura del macizo rocoso).

Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

- Definición del grado de afectación**

El potencial de drenaje (PI), calculado de la matriz, es definido por la siguiente ecuación:

$$PI = (41 \cdot FF + 22 \cdot MK + 17 \cdot OV + 20 \cdot PZ) / 100$$

Los factores multiplicadores de las variables fundamentales que aparecen en la ecuación anterior han sido calculados mediante una matriz de interacción binaria y una matriz de interacción global.

El índice de probabilidad de afectación (DHI) es el producto del potencial de drenaje (PI) para los factores claves, normalizados respecto a su valor máximo:

$$DHI = PI \cdot CP \cdot TS \cdot DT \cdot ET \cdot 100 / DHI_{\max}$$

El DHI_{\max} , que se obtiene de la condición teórica de mayor probabilidad de afectación del punto de agua ($DT = 1,9$; $CP = 2$; $TS = 2$; $ET = 2$; $FF = 1$; $MK = 0,9$; $OV = 0,9$; $PZ = 1$) es igual a 1460,72.

Con el fin de obtener un valor normalizado entre 0 y 1, se procede a relacionar cada punto de agua en examen con el máximo valor teórico indicado en el párrafo anterior (1460,72).

El valor DHI obtenido de esta manera, teóricamente variable entre 0 y 1, ha sido reagrupado en tres clases de probabilidad de afectación basado en una retroalimentación realizada sobre túneles ya excavados como por ejemplo el túnel Perthus localizado entre España-Francia y el túnel Villarodaine Bourget localizado en Francia (Torri & Dematteis, 2007). En la Tabla 5-2.46 se indican las tres clases.

Tabla 5-2.46. Grado de probabilidad de afectación de los puntos de agua.

DHI	DESCRIPCIÓN
1	Muy Baja a imperceptible
2	Baja
3	De Media a Alta

Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

5.1.8.11.3 Resultados

En este numeral se resumen los resultados correspondientes al estudio de impacto sobre los puntos de agua presentes en el área de influencia del túnel Pamplona. El método empleado para su valoración corresponde al DHI (*Drawdown Hazard Index*), antes descrito. Del análisis de la distribución de las distintas clases de probabilidad de afectación para los 14 puntos de agua censados en la zona de influencia del túnel pamplona resultó lo siguiente (ver Tabla 5-2.47):

Tabla 5-2.47. Potencial impacto sobre los puntos hidrogeológicos localizados en la zona de influencia del túnel Pamplona.

DHI	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	%
1	Muy Baja a imperceptible	6	43%
2	Baja	8	57%
3	Media a Alta	0	0%
TOTAL			100%

Fuente: Geodata, 2018

- 6 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 1, es decir, en ellos no se prevé afectación o ésta es despreciable desde el punto de vista probabilístico. Estos puntos representan el 33% del total de puntos relacionados con los túneles del corredor vial.
- 8 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 2, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación baja. Estos puntos representan el 67% del total.
- 0 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 3, es decir, en ningún punto de agua se prevé una probabilidad de afectación media a alta.

Los puntos de agua que han resultado con alguna probabilidad de afectación, de acuerdo con el método DHI, se encuentran alineados con el sistema de sistemas de fallas regionales que discurren en dirección NNW_SSE y E_W.

- En la Tabla 5-2.49 se muestran los puntos de agua subsuperficial y subterránea que presentan alguna probabilidad de afectación (baja), especificando el tipo de punto y el caudal medido.

Tabla 5-2.48. Cálculo valor DHI para los puntos de agua ubicados en la zona de influencia del túnel Pamplona.

			KEY FACTORS OF WATER-POINTS				FUNDAMENTAL VARIABLES OF THE SYSTEM				RESULTS		
CODE	TUNNEL	TYPE	Distance from the Tunnel	Permeability Channels	Water-point type	Topographic Effect	Fracture Frequency	Rock Mass Permeability	Overburden	Plastic Zone Radius	Potential of Inflow	Drowdown Hazard Index	
			DT	CP	TS	ET	FF	MK	OV	PZ	PI	DHI value	DHI class
UF1-PA01	Pamplona	Interflujo	1,9	1	1	1	0,5	0,5	0,9	1	0,67	0,09	1
UF1-PA02	Pamplona	Manantial	1,5	1,5	1	2	0,5	0,5	0,5	1	0,6	0,18	2
UF1-PA03	Pamplona	Manantial	1,5	1,5	1	2	0,5	0,5	0,5	1	0,6	0,18	2
UF1-PA04	Pamplona	Manantial	1,5	1,5	1	2	0,5	0,5	0,5	1	0,6	0,18	2
UF1-PA05	Pamplona	Interflujo	1,5	1,5	1	2	0,75	0,25	0,2	1	0,6	0,18	2
UF1-PA06	Pamplona	Manantial	1,5	1,5	1	2	0,5	0,5	0,9	1	0,67	0,21	2
UF1-PA07	Pamplona	Manantial	1,5	1,5	1	2	0,75	0,25	0,2	1	0,6	0,18	2
UF1-PA08	Pamplona	Interflujo	1,5	1	1	2	0,5	0,25	0,2	1	0,49	0,1	1
UF1-PA09	Pamplona	Resurgencia	1,9	1	1	1	0,5	0,5	0,9	1	0,67	0,09	1
UF1-PA10	Pamplona	Interflujo	1,5	1,5	1	1,5	0,5	0,5	0,5	1	0,6	0,14	1
UF1-PA19	Pamplona	Interflujo	1,9	1	1	2	0,5	0,5	0,9	1	0,67	0,17	2
UF1-PA20	Pamplona	Interflujo	1,9	1	1	2	0,5	0,5	0,9	1	0,67	0,17	2
UF1-PA102	Pamplona	Interflujo	1,5	1,5	1	1	0,5	0,1	0,2	1	0,46	0,07	1
UF1-PA103	Pamplona	Resurgencia	1,5	1,5	1	1	0,5	0,1	0,2	1	0,46	0,07	1

Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.49. Puntos de agua subsuperficial y subterránea con probabilidad de impacto bajo localizados en la zona de influencia del túnel pamplona.

Punto de Agua (ID PA)	Tipo de Punto ID	Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá)			Caudal (l/s)		Permanencia	Usuarios	
		E	N	ELV	nov-18	abr-may/18		Si/No	DHI
UF1-PA02	Manantial	1158099	1308642	2420	0,221	0,352	Perenne	Si	2
UF1-PA03	Manantial	1158039	1308669	2409	0,214	0,212	Perenne	No	2
UF1-PA04	Manantial	1158043	1308721	2421	1,029	1,100	Perenne	Si	2
UF1-PA05	Interflujo	1158208	1308883	2442	0,157	0,177	Perenne	Si	2
UF1-PA06	Manantial	1157762	1309240	2482	0,011	0,040	Perenne	No	2
UF1-PA07	Manantial	1158323	1309298	2568	0,313	0,449	Perenne	Si	2
UF1-PA19	Interflujo	1159213	1309611	2287	0,085	0,268	Perenne	Si	2
UF1-PA20	Interflujo	1159653	1308983	2257	0,065	0,088	Perenne	Si	2

Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.11.4 Medidas de prevención, mitigación y compensación sugeridas

- **Medidas de prevención**

La principal medida de prevención se aplica en las primeras etapas de diseño, específicamente en el diseño geométrico del túnel. En el caso del túnel de Pamplona se decidió desplazar hacia el SE el trazado original, con el propósito de retirarlo de la zona de falla regional que discurre en dirección E-W y que conforma el valle estructural donde aflora una fuente utilizada en el sector de Cristo Rey. Este desplazamiento del trazado disminuye sensiblemente la potencial afectación del túnel sobre su entorno al construirse en una zona menos afectada tectónicamente respecto a su posición original.

En la Figura 5-2.76 se presenta visualmente la explicación del desplazamiento del diseño del eje del túnel, consistente en un corrimiento de 90 metros en promedio a partir de la línea roja que muestra el alineamiento considerado originalmente, hasta el alineamiento definitivo por la línea amarilla.

Figura 5-2.76. Corrimiento del túnel para alejarlo de Zona de Falla



Fuente: Geodata, 2018

• Medidas de Mitigación

Las medidas de mitigación más efectivas encaminadas a disminuir la potencial afectación que la obra subterránea pudiera ejercer sobre los diferentes puntos de agua y recursos hídricos presentes en superficie, son aquellas que se planifican y ejecutan simultáneamente con la construcción del túnel.

Según los resultados de estas medidas y eventuales hallazgos de conductos saturados de mayor tamaño al esperado (caudales más altos a los caudales críticos, que se encuentren en las perforaciones de avanzada), se prevén también medidas de mitigación contingentes.

En este sentido se indican a continuación las medidas de mitigación consideradas para el túnel de Pamplona.

▪ Medidas de Mitigación Estándar

- Excavación parcial o por etapas en terrenos de calidad geotécnica pobre a muy pobre ($RMR < 45$), incluidas zonas de falla.

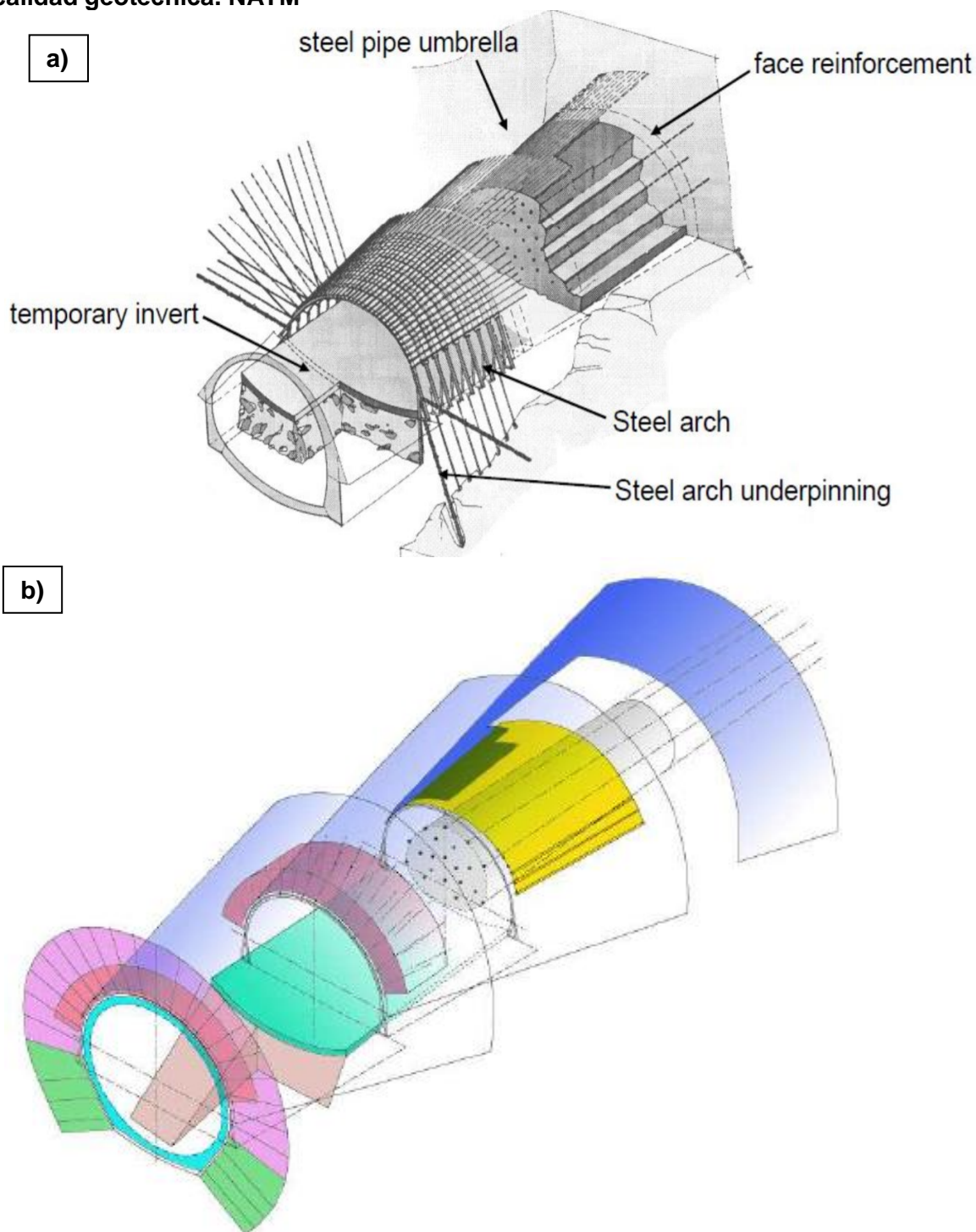
El túnel de Pamplona está constituido principalmente por lodolitas, arcillolitas y areniscas muy meteorizadas y cizalladas, así como suelos residuales que en mayor o menor grado integran las formaciones geológicas que serán interceptadas por el túnel (Kic, Kia y Kitm).

Las posibles medidas de mitigación a aplicar se relacionan directamente con los procedimientos constructivos, desde dos variantes, una del propio proceso de la voladura y otra del cambio de metodología constructiva.

Para minimizar la aureola de perturbación alrededor del túnel y asegurar la estabilidad de la excavación en estos terrenos complejos y con potencial drenante, la excavación se podrá ejecutar mediante avances en sección completa con pases de entre 0,5 a 1,0 m de longitud, disminuyendo las cargas efectivas de material explosivo y adaptando en lo posible los esquemas de tiro, o en su caso mediante medios mecánicos, dependiendo de las condiciones reales observadas en el frente de trabajo. Podrá optarse por avances bajo paraguas de micropilotes en clave, de hasta 12m de longitud, que den soporte a la clave y hombros del túnel. Todo ello previa inspección y evaluación de los frentes diariamente por parte de personal facultado en la toma de decisiones del equipo de construcción.

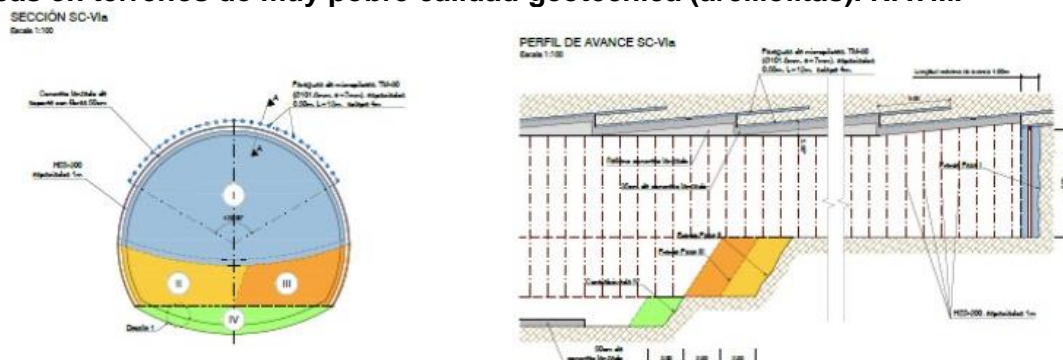
En la Figura 5-2.77 se muestra una secuencia esquemática que ilustra de manera general el proceso por etapas antes descrito y en la Figura 5-2.78 se muestra una sección tipo específica considerada para el túnel Pamplona con sistema de ejecución TIPO NATM (sección SC-Va).

Figura 5-2.77. (a y b) Secuencia de excavación por etapas en terrenos de muy mala calidad geotécnica. NATM



Fuente: Geodata S.p.A.

Figura 5-2.78. Túnel de Pamplona, sección tipo SC-Via, secuencia de excavación por etapas en terrenos de muy pobre calidad geotécnica (arcillolitas). NATM.



Fuente: Informe IX Túnel Pamplona (UF1), Geoconsult 2018

Excavación con técnica especial de voladuras para terrenos de calidad geotécnica regular ($45 < \text{RMR} < 60$), buena ($60 < \text{RMR} < 75$) y muy buena ($\text{RMR} > 75$).

En el túnel de Pamplona estos terrenos lo constituyen principalmente los diferentes niveles de areniscas consolidadas que integran en mayor o menor grado las formaciones geológicas que serán interceptadas por el túnel, especialmente la formación aguardiente (Kia) y en menor proporción la formación Tibú-Mercedes (Kitm).

Para el abatimiento de la roca en terrenos de calidad regular hasta muy buena, se utilizará la técnica conocida como “smooth blasting” o voladuras lisas, la cual prevé, entre otros aspectos, el uso de cargas desacopladas, según esquema de tiro adoptado y menor cantidad de explosivo por metro lineal en aquellos barrenos ubicados en el perímetro del túnel (incluso uso de precorte), que finalmente determinarán la línea de excavación. Esto con el propósito de limitar o controlar la zona de fracturación debida a la propagación de la onda explosiva en el macizo rocoso. Limitando de esta manera la extensión de la zona de fracturación o perturbación en torno al túnel excavado y en consecuencia el efecto drenante del mismo.

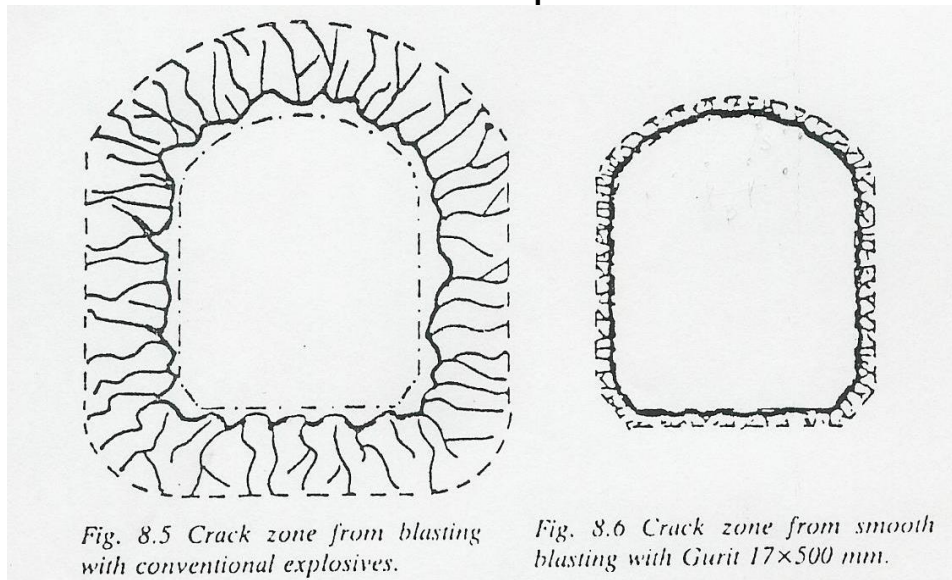
En la Figura 5-2.79, se ilustra esquemáticamente el efecto de la onda explosiva en un macizo rocoso cuando se utilizan explosivos convencionales y explosivos desacoplados previstos en las voladuras lisas (smooth blasting).

- Relleno de los piezómetros que están directamente sobre el túnel.

Con el objetivo de evitar la existencia de conductos de flujo directo que puedan generar un drenaje de las aguas del macizo hacia el túnel, se prevé la clausura de los piezómetros en el tramo inferior de 20 metros sobre la cota clave del túnel, de manera previa al inicio de las excavaciones.

La clausura de la franja inferior de los piezómetros se realiza mediante la intrusión de una lechada de concreto con aditivo retardante y aditivo impermeabilizante, de tal forma que se selle completamente el ducto generado al interior del tubo en la sección de interés.

Figura 5-2.79. Fracturamiento del macizo rocoso por la voladura.



Fuente: Indumil.

La estrategia aquí planteada, además de evitar filtraciones hacia el túnel, permite dar continuidad y estabilidad operativa a los piezómetros, de tal forma que sean viables las campañas de monitoreo.

- Medidas de Mitigación Contingentes

Se realizan sólo en el caso que los caudales de infiltración superen los caudales críticos y que las medidas estándar de mitigación no sean suficientes para controlar la filtración de aguas desde el macizo, por encima de dichos caudales críticos. Es necesario tener presente que los bajos caudales de infiltración que se esperan a medida que se avanza mediante los métodos de excavación previstos, permiten suponer que las medidas estándar serán efectivas para lograr mantener un nivel de sello hidráulico razonable en las paredes del túnel.

- Inyecciones de impermeabilización del macizo rocoso.

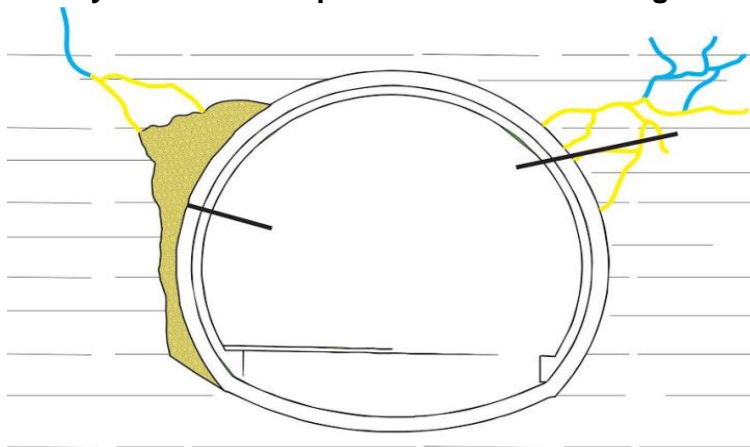
No obstante, lo antes indicado, una medida de choque para mitigar un eventual efecto drenante significativo del túnel sobre su entorno consiste en el tratamiento a través de inyecciones de las zonas de falla y/o zonas más fracturadas a través de las cuales se detecten o se observen flujos puntuales significativos.

En el presente documento se propone un protocolo para implementar las eventuales medidas de impermeabilización relacionadas con inyecciones en los sitios hidrogeológicamente más críticos, sin entrar en el diseño particular de las mismas.

Como esquematización conceptual de este procedimiento, se presenta en la Figura 5-2.80 un dibujo con la representación del llenado de fisuras como sello hidráulico, donde se

muestra en amarillo el material que se inyecta para generar el sello y en azul el volumen de agua retenido en las fisuras al interior del macizo gracias al sello aplicado. En color café se observa un eventual relleno estructural del cuerpo del túnel el cual se utiliza como elemento constructivo mas no como sello hidráulico.

Figura 5-2.80. Post-inyecciones de impermeabilización contingentes.



Fuente: Ferrocol, 2016

- Consideraciones Generales de las inyecciones de impermeabilización

En los sectores de excavación del túnel Pamplona en los cuales de acuerdo con el modelo geológico, geomecánico e hidrogeológico se prevé la presencia de zonas de fallas, zonas más fracturadas y/o zonas de mayor permeabilidad del macizo rocoso a través de las cuales se pueden instaurar flujos significativos con el potencial de abatir el nivel piezométrico y afectar los recursos hídricos subterráneos y/o superficiales, se recomienda mantener una especial atención a los caudales de infiltración encontrados pues es en aquellas zonas donde se podría evidenciar con mayor probabilidad un aumento del caudal de infiltración por encima del caudal crítico del tramo. Los sectores potencialmente críticos son reportados en la Tabla 5-2.50. Los caudales críticos en términos de m³/día se citan en la Tabla 5-2.51.

Tabla 5-2.50. Tramos del túnel Pamplona donde de acuerdo con el perfil geológico y geotécnico se prevé encontrar zonas de fallas y/o zonas de mayor fracturación y/o zonas de mayor permeabilidad.

PK Inicial (m)	PK Final (m)	Longitud Tramo (m)	Cobertura (m)
K58+745,00	K58+890,00	145	<=50
K59+450,00	K59+480,00	30	>50 (210m)
K59+610,00	K59+640,00	30	>50 (201m)
K59+640,00	K59+756,00	116	>50 (176m)
K59+912,00	K59+940,00	28	<=50

Fuente: Geodata, 2018.

Tabla 5-2.51. Caudales críticos para el túnel de Pamplona

Abscisa inicial (m)	Abscisa Final (m)	Longitud (m)	Q. Crítico m ³ /día/10m
K58+745,00	K58+755,00	10	N/A
K58+755,00	K58+780,00	25	55
K58+780,00	K58+810,00	30	69
K58+810,00	K58+850,00	40	83
K58+850,00	K58+880,00	30	4
K58+880,00	K58+885,00	5	90
K58+885,00	K58+890,00	5	142
K58+890,00	K58+905,00	15	63
K58+905,00	K58+970,00	65	29
K58+970,00	K59+100,00	130	29
K59+100,00	K59+160,00	60	76
K59+160,00	K59+220,00	60	100
K59+220,00	K59+270,00	50	54
K59+270,00	K59+340,00	70	131
K59+340,00	K59+370,00	30	61
K59+370,00	K59+450,00	80	134
K59+450,00	K59+480,00	30	60
K59+480,00	K59+540,00	60	8
K59+540,00	K59+610,00	70	55
K59+610,00	K59+620,00	10	166
K59+620,00	K59+640,00	20	7
K59+640,00	K59+756,00	116	186
K59+756,00	K59+812,00	56	122
K59+812,00	K59+862,00	50	115
K59+862,00	K59+912,00	50	90
K59+912,00	K59+940,00	28	55
K59+940,00	K60+075.36	135.36	N/A

Fuente: Geodata, 2018.

La identificación preventiva de estas zonas de falla y/o zonas de mayor fracturación que eventualmente interconecten zonas saturadas y semisaturadas con el túnel, se muestran en el perfil geológico e hidrogeológico (Anexo 5.1.3.8). Se recomienda que estas zonas potencialmente críticas sean sistemáticamente controladas durante el avance de la excavación, con observación directa de cada nuevo frente, por personal especializado del equipo de construcción y levantamiento de una ficha control de las distintas observaciones como diaclasas, presencia de agua, RMR, RQD, juntas y demás aspectos a tener en cuenta. En determinado caso, ante casos de presencia importante de caudal de infiltración, podrían llegar a realizarse perforaciones exploratorias ejecutadas por delante del frente, que permitan la verificación directa de la presión y cantidad de agua presente en el macizo. En el caso que se requieran las intervenciones de impermeabilización a través de

inyecciones en las zonas de falla, zonas fracturadas y/o zonas de mayor permeabilidad presentes en el macizo rocoso, donde la presencia de las filtraciones de agua sean notorias (según umbrales de caudales críticos), se debe prever el uso de diferentes tipos de lechadas estables de baja densidad y con grado de fluidez variable, de acuerdo a la permeabilidad del terreno tratado; utilizando cemento ordinario para permeabilidades de altas a medias y microcementos de granulometría adecuada para permeabilidades medias a bajas.

- Protocolo propuesto de aplicación de las inyecciones

Considerando el hecho que la aplicación de inyecciones implica la inclusión de materiales ajenos al macizo rocoso y aunque el nivel de contaminación de estos es considerado bajo, de todas formas, en los tramos de túnel previstos en la Tabla 5-2.50 resulta conveniente limitar su uso a aquellos sectores que realmente lo requieran, en caso de que se haga indispensable su implementación.

Con este propósito se propone a continuación un protocolo de aplicación de las inyecciones, que toma en cuenta las reales condiciones geológicas, estructurales, hidrogeológicas y constructivas encontradas durante la excavación del túnel. Este protocolo es aplicable tanto en suelo como en roca, en aquellas condiciones que se detecten sean necesarias aplicar por problemas de sostenimiento del frente de excavación o por ser actuaciones necesarias para preservar condiciones hidrogeológicas actualmente presentes.

- I. Paso 0, Aseguramiento de la excavación. De acuerdo con el tipo de terreno encontrado y el agua de infiltración presente entre el frente de excavación y los últimos 10 m de túnel excavado (incluido el frente mismo), se procede a asegurar el tramo de túnel excavado mediante la instalación oportuna del soporte o sostenimiento previsto en el diseño o el que se considere luego del levantamiento geomecánico realizado por personal calificado.
- II. Paso 1, Caso en el cual no se considera necesario el uso de inyecciones. Se da en el caso de que no se presente flujo de agua proveniente del macizo rocoso o esta sea muy escaso, donde se tenga un caudal observado por debajo de los parámetros que definen el caudal crítico. No se considera necesario realizar ningún pretratamiento del terreno y se podrá continuar con la excavación de este tramo de túnel.
- III. Paso 2, Caso en el cual se debe proceder con la implementación de inyecciones. Si esto se requiere por la presencia de agua existente en el avance, donde se presente un flujo de agua con un caudal mayor al caudal crítico del tramo (definido precedentemente) proveniente del macizo rocoso o terreno, se deberá proceder con la aplicación de inyecciones de acuerdo con el diseño que para tal efecto haya sido considerado, esto, antes de dar continuidad a la excavación o avance del túnel. El diseño de las inyecciones deberá tomar en cuenta el tipo de terreno o macizo rocoso encontrado y la presencia de agua proveniente del mismo. Se deben definir con claridad como mínimo los siguientes aspectos:

- a) Extensión de la aureola de impermeabilización alrededor de la excavación,
- b) Cantidad de barrenos a ejecutar en el perímetro de la excavación (distancia radial entre barrenos),
- c) Longitud, diámetro, traslapes, direccionalidad e inclinación de los barrenos,
- d) Diseño de la mezcla a emplear (tipos de materiales a emplear, granulometría, relación A/C, control de calidad, entre otros), parámetros y criterios de inyección (caudal, volumen, presión, entre otros), metodología de inyección (ascendente, descendente, entre otros), registros de parámetros de inyección, definición de los equipos de inyección (perforadora, bombas, mezcladores, circuitos de inyección, obturadores, entre otros).
- e) Las inyecciones se realizarán hasta alcanzar la condición de que el flujo remanente de agua no supere el caudal crítico ($Q_{\text{remanente}} \leq Q_{\text{crítico}}$) o hasta que la presión de inyección de la lechada en la última perforación realizada de máximo 6 m de longitud, sobrepase la presión inicial de la primera inyección ejecutada en el área, con flujo de agua superior al caudal crítico, en un 75%.

Durante la construcción del túnel por cada frente de excavación, se clasificará geomecánicamente el macizo rocoso o terreno encontrado (p.e. utilizando RMR, Q). Mientras que, en superficie, se recomienda, realizar simultáneamente el monitoreo previsto en los puntos de agua y cursos de aguas superficiales que integran la red de monitoreo.

Igualmente se realizará por parte del área de ingeniería la medición del caudal de infiltración con determinación de parámetros fisicoquímicos in situ para estas aguas (conductividad, PH, temperatura, ORP, oxígeno disuelto), a través de las perforaciones con barreno ejecutadas para las voladuras. Sin embargo, se tendrá presente no interferir con las actividades del frente de excavación, así como realizar las pruebas in situ preferiblemente en horas de relevo.

Todos los datos recopilados deben ser analizados integralmente como mínimo cada 50 m de túnel excavado; esto con el objeto de retroalimentar las previsiones realizadas en los estudios hidrogeológicos, particularmente en lo que respecta a la actualización de los caudales críticos. Las inyecciones previstas pueden ser optimizadas durante la excavación del túnel con base en las reales condiciones geológicas e hidrogeológicas encontradas, debidamente evidenciadas y analizadas.

- **Medidas de Compensación**

En el supuesto poco probable de que no sean efectivas las medidas de mitigación definidas, se prevén medidas de compensación estándar y medidas de compensación contingentes.

- **Medidas de Compensación Standard**

La Tabla 5-2.52 ilustra la estrategia de intervenciones a prever para la compensación del riesgo en función de la probabilidad de ocurrencia de la afectación de los recursos hídricos.

Estas intervenciones se deben enfocar de acuerdo con el uso que tengan los puntos de agua y el potencial de afectación de acuerdo con la metodología DHI.

Tabla 5-2.52. Descripción del tipo de intervención en relación con la probabilidad de impacto atribuida a los puntos de agua analizados.

Clase DHI	Probabilidad	Intervención sugerida
1	despreciable	Ningún tipo de intervención prevista
2	baja	Prever el diseño de intervenciones o estrategias que permitan el aprovisionamiento de agua potable alternativo de emergencia y transitorio de acuerdo con el uso que la comunidad les da a las fuentes de agua.
3	media - alta	Prever el diseño de intervenciones o estrategias que permitan el aprovisionamiento de agua potable alternativo permanente de acuerdo con el uso que la comunidad les da a las fuentes de agua.

Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

Las intervenciones sugeridas han sido clasificadas como intervenciones de emergencia, transitorias y definitivas.

- a. Las intervenciones de emergencia permiten el aprovisionamiento provisional con fuentes alternas (p.e. carrotanques), pueden ser previstas también como medidas de mitigación sólo para los puntos de agua clasificados con probabilidad de impacto bajo (DHI=2).
 - b. Las intervenciones transitorias contemplan la conexión a redes de acueducto existentes, una vez conocida la real magnitud del impacto. Este tipo de intervención se prevé sólo para los puntos de agua clasificados con impacto bajo (DHI=2). Mientras se aplica la medida transitoria bien podría continuar operando la utilización de vehículos cisterna con una frecuencia establecida a un plazo definido.
 - c. Las intervenciones de aprovisionamiento de agua como alternativa permanente contemplan la conexión a nuevas fuentes o nuevas redes, para ser construidos en el caso que las condiciones lo ameriten, una vez conocida la real magnitud del impacto. Este tipo de intervención se prevé sólo para los puntos de agua clasificados con impacto medio a alto (DHI=3). Una medida transitoria bien podría convertirse en una solución definitiva si la disponibilidad del recurso hídrico satisface la demanda o servir de paliativo mientras se aplica la medida permanente.
- Medidas de Compensación Convencionales
 - Conexión a acueductos veredales

La primera medida corresponde a implementar o mejorar la conexión al acueducto veredal o distrito de riego más cercano. Esto implica verificar con el proveedor las condiciones y nivel de servicio disponibles. El costo será el equivalente a una conexión domiciliaria que actualmente está alrededor de \$300.000 por punto de consumo. Para la conexión se tendrá en cuenta el levantamiento de redes existentes realizado como parte de este EIA.

- Conexión a otras fuentes puntuales

La segunda medida corresponde a implementar o mejorar la conexión a otra fuente de suministro de agua aledaña. Esto implica trasladar la conexión afectada hacia otro punto de agua disponible, lo cual se realizaría sobre puntos de agua cercanos ya identificados o incluso más aguas arriba de los límites del área de influencia. El costo de la intervención se determina en \$410.000 por conexión, suponiendo que se realice una adecuación en la obra de captación y una larga extensión en manguera.

- Otras medidas de compensación

Según sea necesario implementar medidas de compensación y de acuerdo con las condiciones de negociación con la comunidad, se propone considerar otras posibles medidas que pueden aplicarse en caso de no ser viables las dos medidas indicadas anteriormente.

- Sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.
- Traslado de bocatmas (proveedores locales).
- Mejora en sistemas de suministro y almacenamiento.
- Control de pérdidas en redes de distribución existentes.

Las medidas citadas requerirán para su implementación viabilidad técnica y económica avalada por parte del Concesionario.

- Alternativas de aprovisionamiento de agua

En el caso del túnel Pamplona existen por lo menos dos fuentes de aprovisionamiento de agua que pueden ser utilizadas como medidas compensatorias en el caso que las circunstancias lo requieran, tanto de carácter provisional o como de carácter permanente. Estas fuentes son:

- a. Aprovisionamiento de agua proveniente de la excavación del túnel. Para este caso específico se puede llegar a utilizar bien sea el agua drenada durante el proceso constructivo o el agua proveniente de perforaciones específicas ejecutada en el interior del túnel. Siempre que sea posible se recomienda utilizar el agua derivada del segundo caso, dado que al ser un flujo puntual es posible conducirlo directamente hasta la zona de acopio o tratamiento evitando su contaminación con el agua industrial, facilitándose de esta manera su depuración o tratamiento en el caso que fuera necesario aplicarlo.
- b. Aprovisionamiento de agua del punto identificado como UF1-PA09. Ente punto de agua se ubica hacia el portal oriental del túnel Pamplona. No se prevé una afectación significativa sobre este punto de agua debido a la excavación del túnel. Se trata del punto con el mayor caudal medido en toda la zona de estudio ($Q > 2$ l/s). Actualmente se encuentra subutilizado debido a que en la zona existen acueductos veredales

como fuente primaria. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este punto es un afluente importante de la quebrada San Antonio.

De acuerdo con la inclinación de pendiente del túnel Pamplona el agua que se capte en su interior o que sea drenada durante su excavación, fluirá hacia el portal oriental; considerando que el punto de agua UF1-PA09 se ubica en cercanías del mismo portal, es posible establecer un sistema similar al mostrado en la Figura 5-2.81 el cual serviría sólo en el caso de ser necesaria, como medida permanente para el suministro de agua en caso de evidenciarse un impacto significativo al recurso hídrico por la excavación del túnel.

En la Figura 5-2.82 se muestran los principales puntos que integran la medida de compensación prevista como medida permanente.

- Medidas de Compensación Contingentes

En el caso que las medidas hasta ahora expuestas sigan siendo insuficientes para dar continuidad del abastecimiento del agua a puntos de la zona de influencia, o se hagan muy difíciles de implementar, se propone utilizar otras fuentes alternas de agua natural.

- Utilización de aguas de la laguna de Borrero.

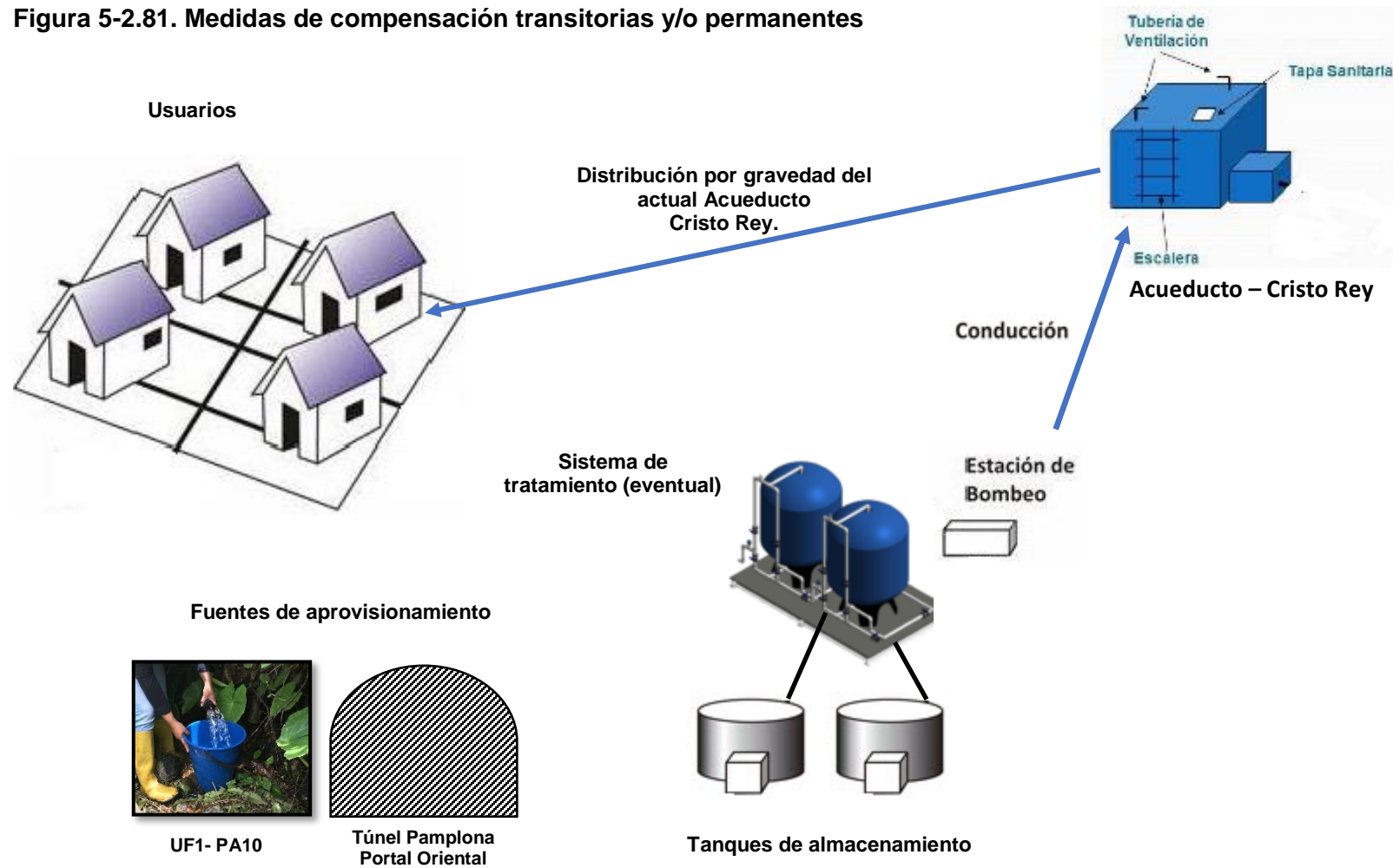
Esta es una fuente alterna de agua natural consistente en la quebrada que nace en la laguna de Borrero localizada cerca al área de influencia del proyecto, según el esquema que se presenta en la Figura 5-2.83 y la Figura 5-2.84.

En la Figura 5-2.84 se observa el punto potencial de captación a la salida de la laguna de Borrero, a una cota de 2471 msnm, una línea de bombeo (en rojo) de 656 metros resaltada en rojo hasta un tanque elevado a una altura de 2821 msnm, y desde allí una conducción por gravedad de 2024 metros (en azul) hasta la zona donde se encuentra la captación de Cristo Rey, a una cota de 2548 msnm, donde se empalmaría con el sistema existente.

Aunque es muy improbable que se llegue a requerir una compensación de esta magnitud, se plantea esta situación como un evento exclusivamente contingente ante eventualidades no considerados dentro del Estudio de Impacto Ambiental, correspondiendo estas fundamentalmente a fenómenos naturales o sociales a escalas no previsibles.

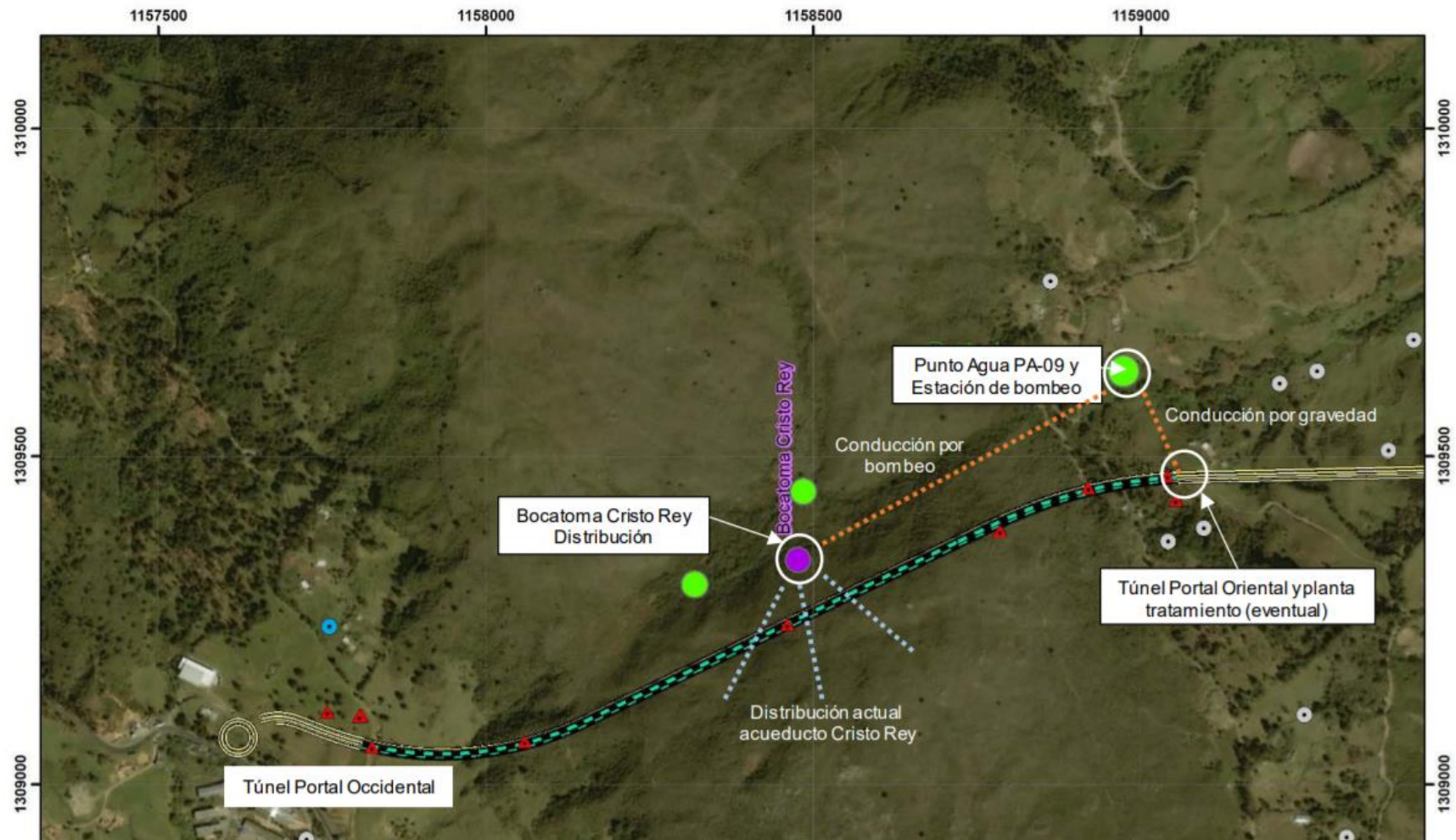
Es de tener en cuenta que actualmente la empresa de acueducto de Pamplona “Empopamplona S.A. E.S.P.”, cuenta con capacidad instalada para servir la zona de la Ciudadela Simón Bolívar, donde se encuentran los Barrios Cristo Rey, Simón Bolívar y Juan XXIII entre otros. Sin embargo, por manejo de redes internas de los barrios aún se cuenta con conexiones directas a fuentes naturales como suministro alterno de agua no potable.

Figura 5-2.81. Medidas de compensación transitorias y/o permanentes



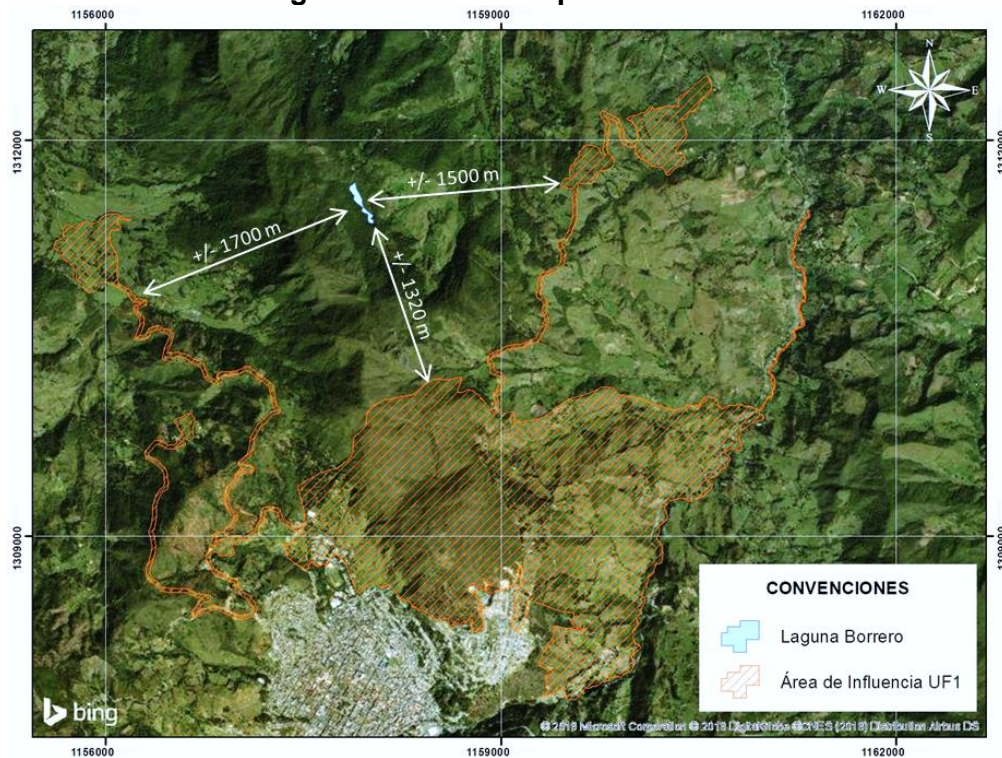
Fuente: Adaptación del sistema implementado en el Túnel 8, Ruta del Sol, 2018 (Cortesía gestión ambiental Túnel 8).

Figura 5-2.82. Medidas de compensación estándar transitorias y/o permanentes



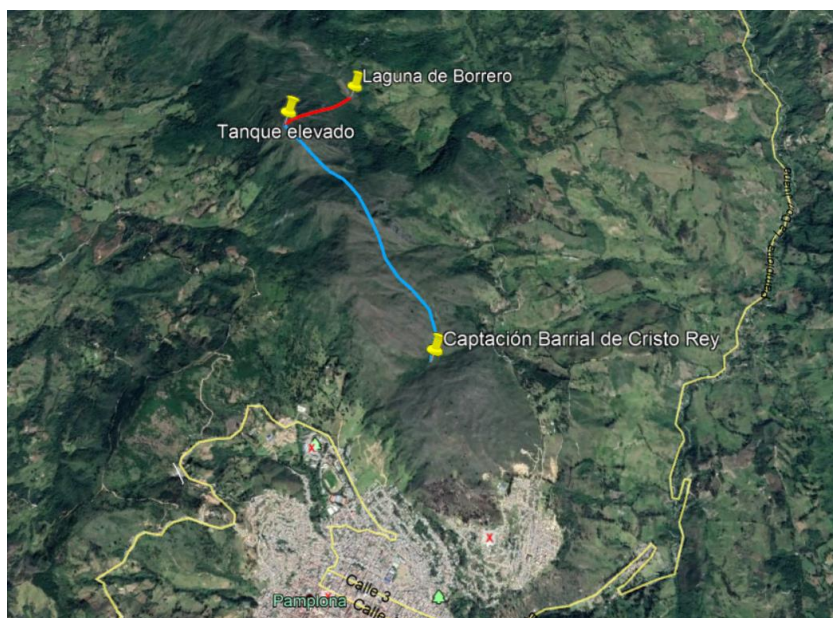
Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.83. Ubicación laguna el borrero respecto al área de influencia de la UF1.



Fuente: Concol-Aecom, 2018.

Figura 5-2.84. Esquema hipotético de una posible utilización de aguas de la laguna de Borrero.



Fuente: Geodata, 2018.

- Instalación de micropresas en cauces para aumentar la recarga.

En el caso en que se verifiquen descensos acelerados en los niveles piezométricos medidos sobre el túnel, se propone además de todas las medidas ya indicadas, instalar micropresas elaboradas con sacos de suelo-cemento o bolsacretos, a intervalos de entre 20 y 30 metros y con alturas de 1.5 m, sobre los cauces principales asociados a las escorrentías superficiales en el área sobre el túnel o en sus inmediaciones, con particular énfasis en el cauce alto de la quebrada San Antonio, de tal forma que las escorrentías superficiales generadas por eventos de lluvias sean retenidas el mayor tiempo posible sobre el material coluvio-aluvial con lo que se aumenta la infiltración a través de dicho material hacia la zona de recarga en dirección vertical hacia la zona fracturada del macizo.

5.1.8.12 Modelo numérico del flujo subsuperficial y subterráneo del Túnel de Pamplona

5.1.8.12.1 Introducción

El uso de la simulación numérica de los flujos subsuperficiales y subterráneos en el ámbito del estudio de impacto ambiental conexo con la realización del túnel Pamplona nace de la exigencia de verificar las condiciones hidrogeológicas observadas en campo y deducidas del análisis de los datos a disposición que han permitido definir el modelo hidrogeológico conceptual. A continuación, se describen los elementos de base considerados en la construcción de las secciones a lo largo de las cuales se han realizado los modelos numéricos.

Los análisis cruzados de los datos disponibles han puesto en evidencia una serie de elementos específicos que describen un contexto hidrogeológico complejo que difícilmente puede ser subestimado y simplificado a través de una representación tridimensional de gran escala que corra el riesgo de no considerar elementos estructurales e hidrodinámicos que influyen en modo determinante en la organización y distribución de los flujos subsuperficiales y subterráneos entorno al trazado del túnel.

Es más efectivo utilizar un enfoque numérico de tipo 2D vertical capaz de simular las condiciones de flujo específicas alrededor del túnel, representando con suficiente detalle las estructuras evidenciadas por las investigaciones disponibles sin que la incertidumbre de las condiciones de flujo a gran escala influya fuertemente en el entorno más próximo al túnel, el cual, concentra la mayoría de las investigaciones realizadas y por lo tanto el mayor grado de conocimiento.

El modelo numérico ha sido construido en modo coherente con el modelo conceptual presentado en el capítulo 5.1.8.1.2, y con las características hidrogeológicas valoradas mediante trabajo de campo, ejecución de pruebas en perforaciones y análisis de los datos obtenidos durante los inventarios de puntos de agua. El cálculo numérico toma en consideración además los resultados de la prospección geoelectrica y la valoración de la recarga de los acuíferos.

Por las razones expuestas se aplicó el enfoque de la modelización numérico 2D vertical con el objeto de aprovechar al máximo la información primaria disponible, la cual se encuentra concentrada a lo largo de la traza del túnel y alcanza su cota en profundidad. De este modo las simulaciones de los circuitos hídricos en roca se realizan con un mejor detalle, permitiendo verificar su interacción con la presencia del túnel y los posibles impactos sobre los puntos de agua vinculados con los terrenos de cobertura o acuíferos subsuperficiales (tipo de puntos de agua). Adicionalmente, este tipo de análisis numérico se contrasta con la metodología DHI (Drowdown Hazard Index) que sigue un camino separado, pero persigue el mismo fin en lo que ha valoración de impactos se refiere. Otro aspecto importante que complementa la modelación 2D realizado en el presente informe lo constituye la valoración de la recarga a través del método Kennesey, explicado en el capítulo 5.1.8.12.3, con lo cual no se le confía a una sola herramienta de análisis la valoración hidrogeológica del túnel Pamplona.

Han sido seleccionadas tres secciones verticales en correspondencia con los sectores más representativos hidrogeológicamente del túnel Pamplona. Estas secciones son.

- Sección numérica_S1

Localización en el túnel: PK58+772
Puntos de agua en superficie: UF1-PA10 y UF1-PA21
Sondeo/piezómetro de referencia: S15
Condición de cobertura: Baja cobertura (25 metros)
Condición hidrogeológica analizada: Interacción entre los depósitos superficiales y flujos en roca

- Sección numérica_S2

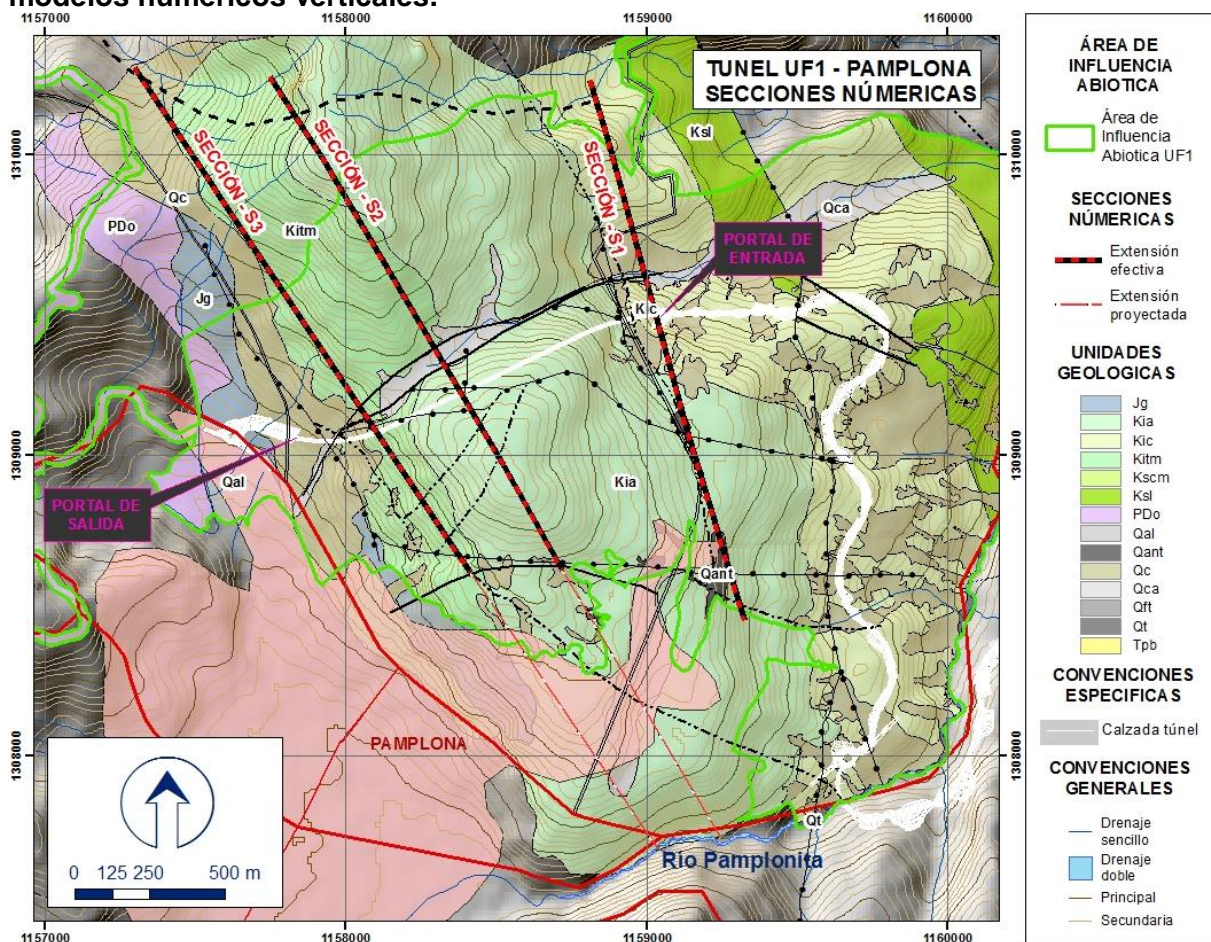
Localización en el túnel: PK59+474
Puntos de agua en superficie: UF1-PA08 y UF1-PA22
Sondeo/piezómetro de referencia: S17
Condición de cobertura: Alta cobertura (220 metros)
Condición hidrogeológica analizada: distribución de los flujos a lo largo de la zona de falla E-W

- Sección numérica_S3

Localización en el túnel: PK59+787
Punto de agua en superficie: UF1-PA06
Sondeo/piezómetro de referencia: S19
Condición de cobertura: Cobertura media (140 metros)
Condición hidrogeológica analizada: flujo en roca a través de calizas (pseudocarsismo/fracturación)

Las tres secciones antes descritas se ilustran en la Figura 5-2.85.

Figura 5-2.85 – Trazado de las secciones a lo largo de las cuales se realizaron los modelos numéricos verticales.



Fuente: Geodata, 2018.

5.1.8.12.2 Principales elementos considerados en la simulación numérica.

Las secciones consideradas representan las condiciones hidrogeológicas más representativas que serán encontradas durante la excavación del túnel Pamplona; Los elementos de “input” se derivan directamente del modelo hidrogeológico conceptual precedentemente elaborado y han permitido validar los resultados obtenidos en función de los siguientes elementos:

- Geometría del acuífero, distinguiendo zonas saturadas o parcialmente saturadas de aquellas secas utilizando el resultado de:
 - Tomografías eléctricas longitudinales y perpendiculares al túnel Pamplona
 - Líneas sísmicas;

- Permeabilidades de las unidades hidrogeológicas derivadas de información primaria (pruebas in situ tipo Lefranc, Lugeon y slug), a través de las cuales se profundizó en el conocimiento del comportamiento hidráulico de:
- - Basamento rocoso;
 - Zonas de falla;
 - Horizontes de alteración del basamento rocoso (suelos residuales);
 - Depósitos cuaternarios de origen aluvial y coluvial.
- Recarga de los acuíferos (régimen pluviométrico), derivada del estudio específico de valoración de la recarga realizado para el túnel Pamplona;
- Zona de descarga natural del nivel freático y piezométrico (Puntos de agua y cursos de aguas superficiales); derivada del inventario de puntos de agua y conocimiento hidrográfico del sector;
- Límites a flujo nulo (límites laterales y de base de las unidades hidrogeológicas), tomados considerando el entorno geológico e hidrogeológico de la zona de estudio, en particular la presencia del mayor elemento hidrográfico representado por el río Pamplonita.

Para cada sección numérica se ha considerado la geometría del túnel Pamplona.

- Diámetro de la sección tipo;
- Cobertura topográfica.

La simulación numérica se realizó tomando únicamente la sección del túnel Pamplona por ser esta la principal obra subterránea que al superar ampliamente la sección de la galería condicionará en su entorno las direcciones del flujo subsuperficial y subterráneo.

El comportamiento de las secciones ha sido seleccionado en modo tal de poder representar el mayor número de puntos de agua en superficie con la finalidad de poder valorar la interacción entre la excavación del túnel y los puntos de agua localizados en superficie;

Los resultados obtenidos permiten su valoración y seguimiento durante las sucesivas fases de construcción de las obras sea a corto como a largo plazo. Particularmente, considerando los siguientes elementos:

- Variación del nivel piezométrico;
- Variación de las direcciones de flujo;
- Caudales esperados al interior de los túneles;
- Variación de los regímenes hidráulicos de los principales puntos de agua presente en la zona de influencia del proyecto.
- Variación del macizo rocoso realmente encontrado durante construcción

5.1.8.12.3 Método de modelación

Los tres modelos numéricos fueron realizados en dos etapas:

- **Fase de calibración**

En estado estacionario en condiciones de contorno coherentes con el modelo conceptual elaborado con base en los datos disponibles;

- **Fase de simulación**

En estado transitorio de las condiciones de drenaje que se genera con la excavación del túnel. El efecto dren del túnel Pamplona ha sido verificado en diferentes tiempos, comenzando desde la apertura de la excavación y en particular para los siguientes momentos:

- 1 día
- 10 días
- 100 días
- 1 año;
- 2 años
- 5 años
- 10 años

El modelo numérico ha sido construido utilizando el método de elementos finitos, código Feflow 7.0 (Wasy AG, Berlin) que aplica la ley de Darcy en todas sus partes. El código Feflow es uno de los más potentes, reconocidos y ampliamente aceptados por la comunidad científica internacional, además, el hecho de utilizar elementos finitos permite una mejor discretización de los elementos a modelar dando mayor fiabilidad a los resultados.

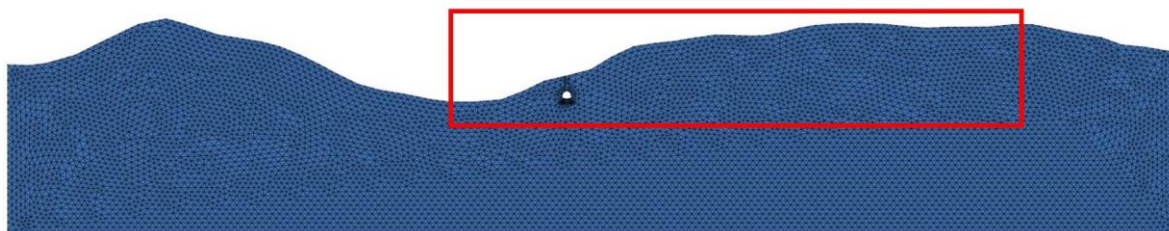
La discretización del dominio de simulación ha sido hecha aplicando una grilla de celdas triangulares realizando un afinamiento de la grilla en inmediaciones del túnel, a lo largo de los contactos geológicos y hacia la superficie topográfica, esto con el fin de poder simular con mayor maniobrabilidad los flujos en correspondencia con aquellos sectores donde se prevé una mayor curvatura de las líneas de flujo. En la Figura 5-2.86 a la Figura 5-2.88 que siguen se muestran las grillas a lo largo de las tres secciones consideradas.

La extensión lateral de las secciones ha sido considerada de acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual, teniendo en cuenta además la cobertura y carga hidráulica por encima del túnel. Hacia el noroccidente (NW), las secciones han sido prolongadas más allá de la cuenca que involucra el macizo rocoso en el cual será excavado el túnel. A continuación, se relaciona cada sección en particular:

- El límite NW de la sección S1 se encuentra a unos 800 m del eje del túnel, la cobertura en este caso es reducida y del orden de aprox. 20 m.
- El límite NW de la sección S2, se encuentra a unos 1200 m del eje del túnel; la cobertura en este caso es de 200 m;
- El límite NW de la sección S3, se encuentra a unos 1400 m del eje del túnel; la cobertura en este caso es intermedia y del orden de 130 m.

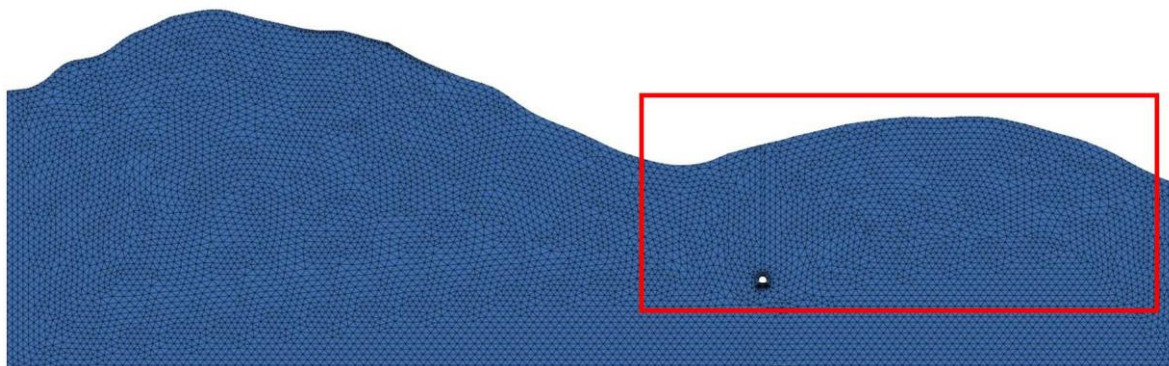
Para poder hacer visible el contraste del comportamiento del agua en el macizo entre la situación antes de proyecto (Modelo Estacionario) y las situaciones con proyecto (Modelo Transiente) incluyendo además el efecto del fenómeno de “El Niño”, esto último atendiendo solicitud de la ANLA, para cada sección se realizó un encuadre en la zona de interés próxima al túnel, respecto a la ventana de modelación inicialmente elaborada, la cual abarcaba una sección muy grande pero que no permitía observar específicamente el área de mayor interés alrededor del túnel. Ver recuadro en rojo en la Figura 5-2.86 a la Figura 5-2.88

Figura 5-2.86 – Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S1.



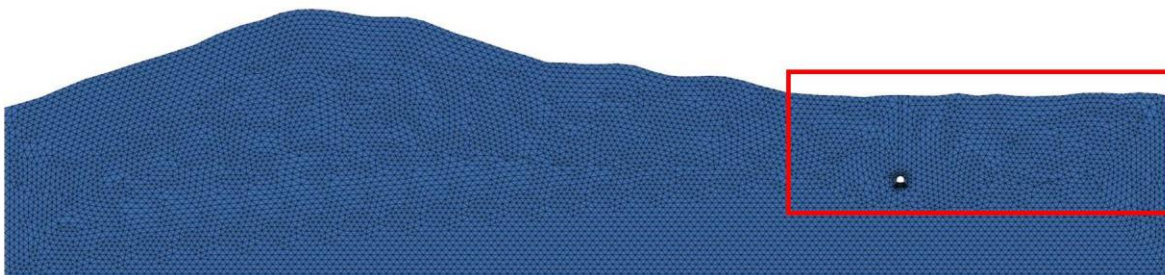
Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.87 – Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S2.



Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.88 – Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S3.



Fuente: Geodata, 2018

Hacia el sector sureste (SE), la simulación se ha realizado considerando el límite hidráulico representado por el flujo hacia el valle del río Pamplonita que drena el acuífero en roca interceptado por la excavación del túnel. El efecto del drenaje realizado por el río ha sido simulado colocando en el borde vertical de la sección un límite de flujo de primer orden (Dirichlet) simulando una exfiltración (Seepage Face). Tal condición ha permitido simular el nivel freático observado en los piezómetros construidos, en correspondencia con el eje del túnel, sin extender físicamente la sección hasta el susodicho curso de agua.

A tales limites, en las condiciones de flujo simulado tanto en sentido NW como SE, la perturbación sobre los flujos subsuperficiales y subterráneos debido al efecto drenante del túnel es nula.

5.1.8.12.4 Calibración del modelo

Los tres modelos fueron calibrados en estado estacionario con el fin de simular las condiciones hidrodinámicas no perturbadas verificando las condiciones de contorno en modo tal de poder simular la presencia de los puntos de agua y los piezómetros que se encuentran alineados a lo largo de las secciones teniendo en cuenta los resultados del estudio de recarga.

Los datos piezométricos disponibles en las áreas adyacentes a las zonas consideradas en las simulaciones indican una profundidad variable del nivel piezométrico. Por lo tanto, con el fin de calibrar el modelo se ha considerado que las condiciones de flujo simuladas deben permitir la verificación de la superficie piezométrica de acuerdo con las mediciones reportadas en la Tabla 5-2.53.

Tabla 5-2.53. Resultados de las calibraciones de los modelos considerando los valores de la cota piezométrica medida en el eje del túnel.

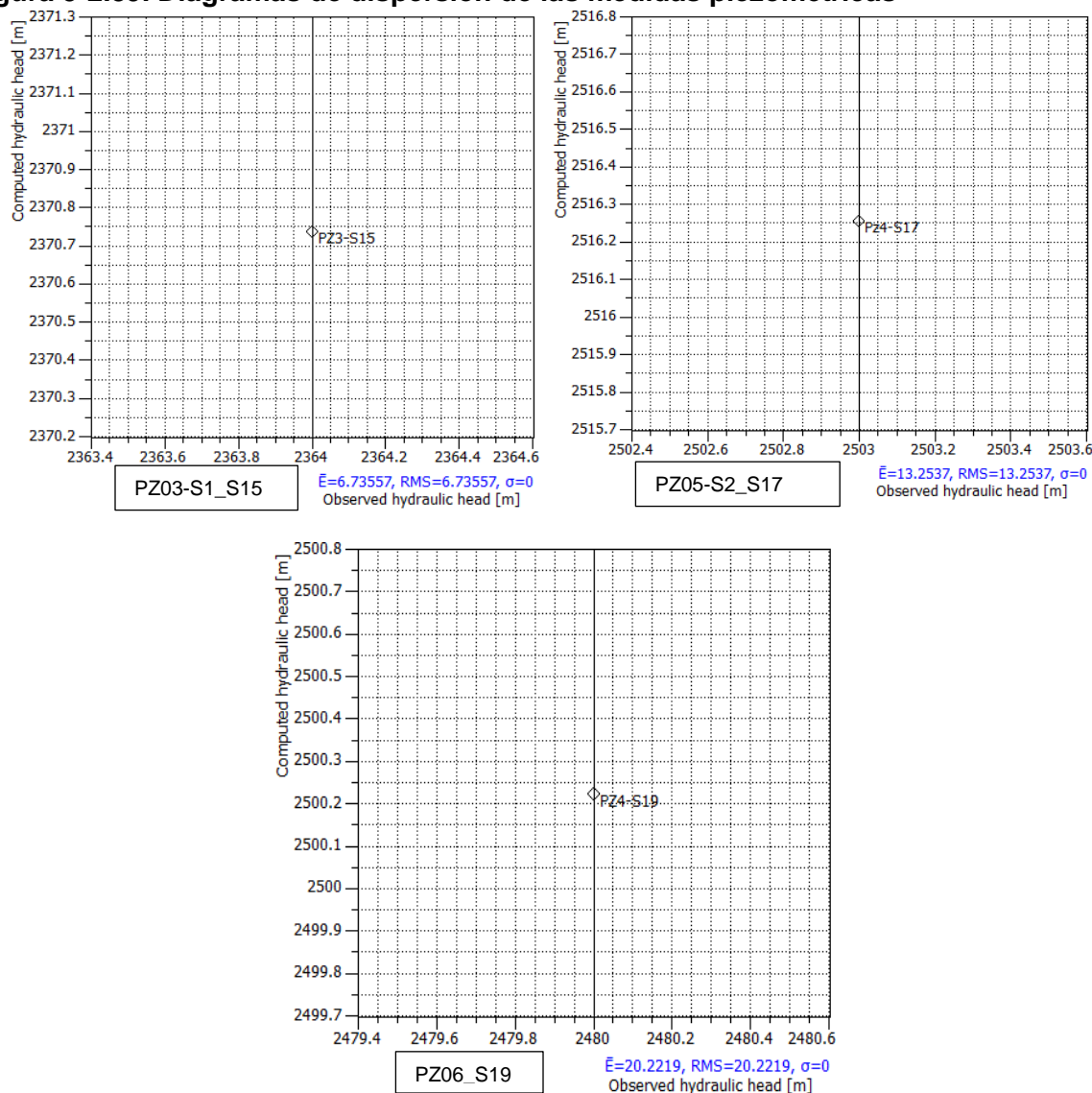
Sección (código)	piezómetro (código)	cota medida del nivel piezométrico (msnm)	cota simulada del nivel piezométrico(msnm)	diferencia (m)
S1	S15	2364	2370.7	6.7
S2	S17	2503	2516.3	13.3
S3	S19	2480	2500.2	20.2

Fuente: Geodata, 2018

Aunque las diferencias entre las cotas medidas y aquellas simuladas parecen elevadas, se considera satisfactoria la fase de calibración considerando que, especialmente en el caso de la sección S2 y sección S3, el nivel del agua subterránea se encuentra entre 50 y 100 m de profundidad respecto a la superficie topográfica, lo que permite que la cabeza hidráulica por encima del túnel pueda variar en el tiempo dependiendo de las condiciones de recarga.

En la Figura 5-2.89 se muestran los diagramas de dispersión derivados de las simulaciones realizadas, a partir de las medidas piezométricas tomadas a lo largo del eje del túnel en correspondencia con las secciones consideradas para las simulaciones numéricas.

Figura 5-2.89. Diagramas de dispersión de las medidas piezométricas



Fuente: Geodata, 2018

De hecho, la reconstrucción del comportamiento de la superficie piezométrica se realizó a través de una detallada calibración de la permeabilidad en dominios diferentes dentro del macizo y horizonte alterado del basamento. Además, se ha considerado oportuno, dada la particular configuración de la topografía, discriminar porciones de topografía caracterizados por una tasa de infiltración específica, tal como se ha evidenciado en el estudio del balance hidrogeológico.

- **Condiciones de contorno**

En régimen permanente, los valores iniciales de potencial no ejercen ninguna influencia en el resultado final siendo este representativo de un estado de equilibrio final. Los potenciales iniciales constituyen el punto de partida del cálculo iterativo realizado por el programa. Los valores de potencial impuestos no cambian durante el cálculo. La geometría de los flujos hídricos subsuperficiales y subterráneos se reconstruyó imponiendo condiciones de flujo al contorno con el fin de simular la recarga por infiltración desde superficie y para simular la presencia de los puntos de agua presentes a lo largo de la sección del modelo.

- Límites de flujo nulo

En el modelo los límites laterales y aquellos de base fueron considerados a flujo nulo, es decir, comparables a los límites impermeables. Los límites laterales fueron fijados a una distancia más allá de la cual no existe alteraciones de los flujos debido al efecto drenante de la obra subterránea. El límite inferior a flujo nulo se justifica por la baja permeabilidad de la roca del basamento que disminuye con la profundidad.

- Límites de flujo impuestos

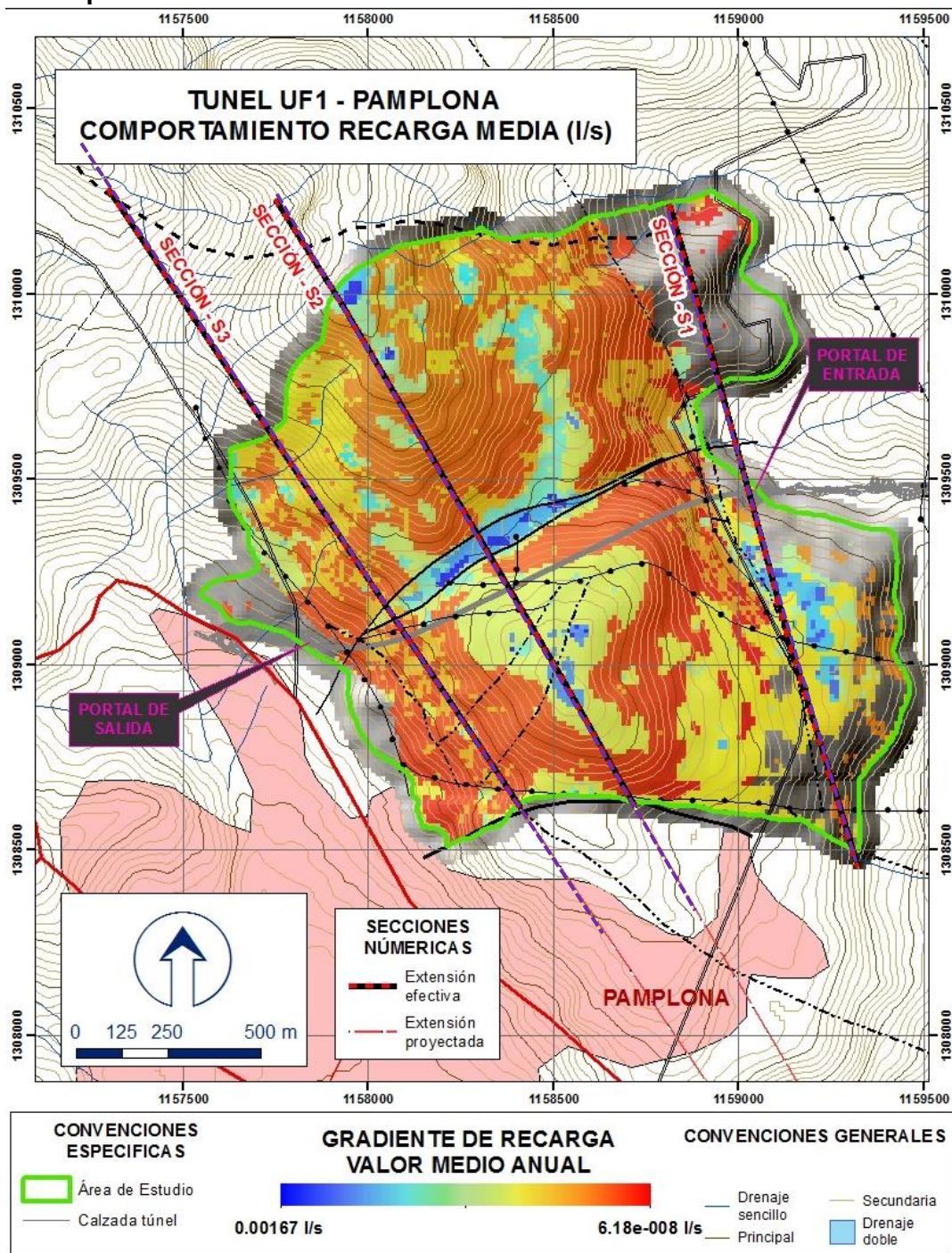
A lo largo de la superficie topográfica se ha impuesto un flujo de ingreso en modo tal de poder simular la infiltración que recarga el acuífero. La presencia de puntos de agua alimentados por la napa se ha simulado imponiendo a los nodos correspondientes una restricción adicional: la inversión del flujo (de adentro hacia afuera) a través del nodo en el que la cota de la superficie piezométrica supera la cota del nodo mismo. A partir del estudio de infiltración, del cual se reporta a continuación el resultado en términos de recarga media a lo largo de las cuencas de referencia, se han identificado sectores de mayor y menor recarga por infiltración desde superficie. Figura 5-2.90. Los colores azules indican los sectores con mayor recarga y aquellos rojos los de recarga menor.

A lo largo de la sección se han considerado valores más elevados en correspondencia con aquellos sectores en los cuales el modelo de recarga indica un potencial de infiltración mayor. Se ha buscado mantener, en función de la calibración del modelo, la mayor coherencia posible con el estudio de recarga. Figura 5-2.91 a Figura 5-2.93.

- Consideración del fenómeno de “El Niño”

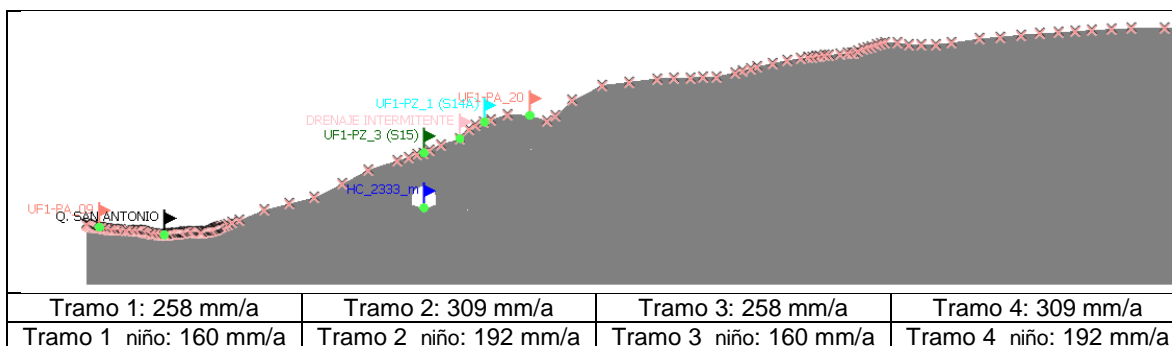
Para representar el efecto del fenómeno de “El Niño”, es una buena aproximación ajustar el valor de la infiltración (recarga) de manera proporcional a la disminución en la precipitación media anual debida a este fenómeno. Tomando como referencia la disminución de la precipitación sufrida en eventos recientes (2009-2010, Ideam) se realiza una reducción de un 38% en los valores de recarga aplicados en el borde superior de las secciones numéricas. Los efectos en disminución de los niveles freáticos se presentan en las figuras de la simulación a un año para cada una de las tres secciones establecidas. Como podrá apreciarse, el efecto del túnel es casi inocuo para el agua en el macizo rocoso siempre y cuando se apliquen las medidas de manejo especificadas en este Estudio.

Figura 5-2.90. Variación de la recarga al interior de las cuencas interceptadas por el túnel Pamplona.



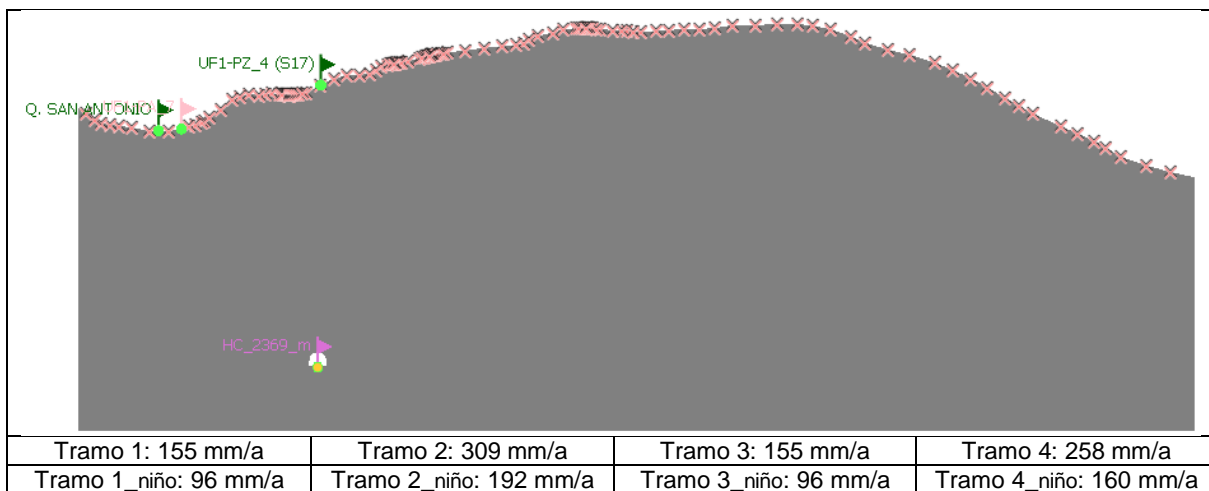
Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.91. Valores de recarga a lo largo de la sección S1.



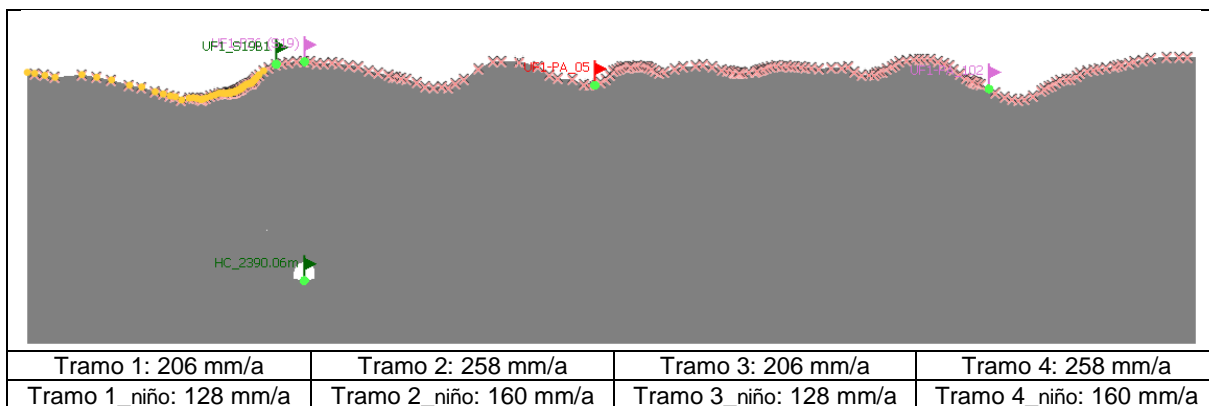
Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.92. Valores de recarga a lo largo de la sección S2.



Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.93. Valores de recarga a lo largo de la sección S3.



Fuente: Geodata, 2018

- **Conductividad hidráulica**

La calibración del modelo se hizo atribuyendo valores de conductividad hidráulica diferentes a los distintos complejos hidrogeológicos que fueron identificados en el modelo hidrogeológico conceptual y obtenidos de las pruebas de permeabilidad realizadas. El macizo rocoso a la cota del túnel Pamplona ha sido dividido a su vez en subunidades hidrogeológicas caracterizadas por una intensa fracturación, tal como expuesto en la descripción del modelo conceptual. Los valores de conductividad utilizadas en el modelo son los indicados en la Tabla 5-2.35.

Las secciones S2 y S3 representan un modelo hidrogeológico muy complejo, dada su intercepción con zonas de fallas geológicas regionales, que tal como como ha sido descrito en el modelo conceptual, tienden a aislar sectores del acuífero en roca que desarrollan sistemas de flujo en dirección longitudinal a su rumbo. En tal sentido es necesario entender que a lo largo de los planos de falla es probable que se generen materiales tipo “gauge” de naturaleza limo-arcillosa de baja permeabilidad que constituyen barreras a los flujos transversales. La circulación hídrica sería por lo tanto mayor a lo largo de la franja de fracturación que se desarrolla contigua al plano de falla que corre en dirección semiparalela al túnel (E-W). Esto de manera coherente con lo indicado por las secciones de tomografía eléctrica UF1-TE04, UF1-TE03, UF1-TE02, en particular la UF1-TE03 (ver Figura 5-2.44).

En los modelos numéricos, por lo tanto, se han distinguido sectores de espesor limitado (<5m) de baja permeabilidad correspondientes a los planos de falla y sectores de mayor espesor (>10 m) y mayor permeabilidad correspondientes a la franja de fracturación. De los análisis de los núcleos obtenidos de las perforaciones mecánicas y pruebas de permeabilidad realizadas, se concluye que el macizo rocoso reportado a lo largo del túnel se encuentra fracturado y permeable independientemente del litotipo dominante. Tal condición al parecer se debe al hecho que la traza del túnel corre paralela a una importante zona de falla regional.

La segmentación de zonas acuíferas por la presencia de fallas regionales se evidencia también por la prospección geoeléctrica. Como ha sido descrito en el modelo conceptual, de hecho, las fallas tienden a aislar sectores de baja resistividad potencialmente saturadas o parcialmente saturadas de sectores de alta resistividad, los cuales normalmente se caracterizan por la ausencia de agua.

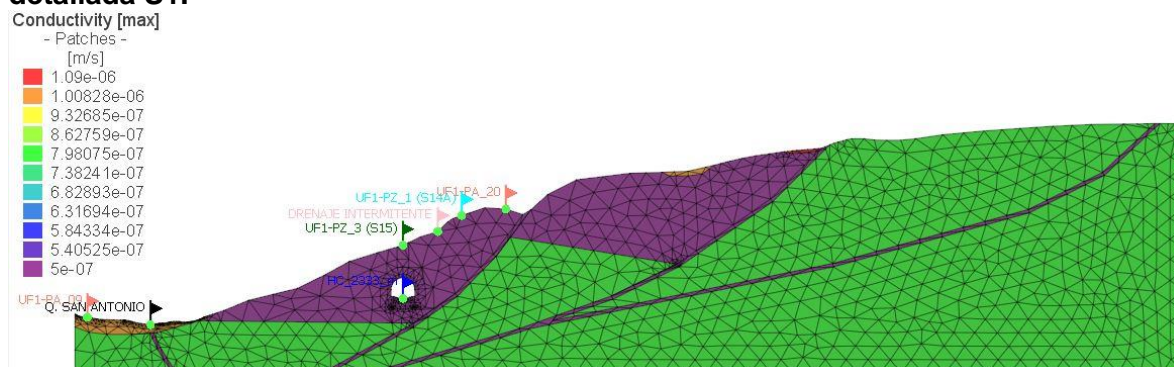
Para obtener la calibración del modelo numérico se consideraron los valores de permeabilidad hidráulica reportados en la Tabla 5-2.54 a la Tabla 5-2.56 y la Figura 5-2.94 a la Figura 5-2.96.

Tabla 5-2.54. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S1.

Sección S1 - Formación	K (m/s)	Ss	Sondeo
Depositos coluviales cuaternarios (Qc)	5E-7 / 1E-6	5.4E-5	S15/S19/S20
Lodolitas	5E-7	3.8E-5	S15/S15A
Suelo residual (Sr) - Limos y limos-arcillosos	1E-9 / 1E-8	7.3E-7	S15A/S21A
Gauge de falla	S/n mat.orig.	5.4E-5	-

Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.94. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección detallada S1.



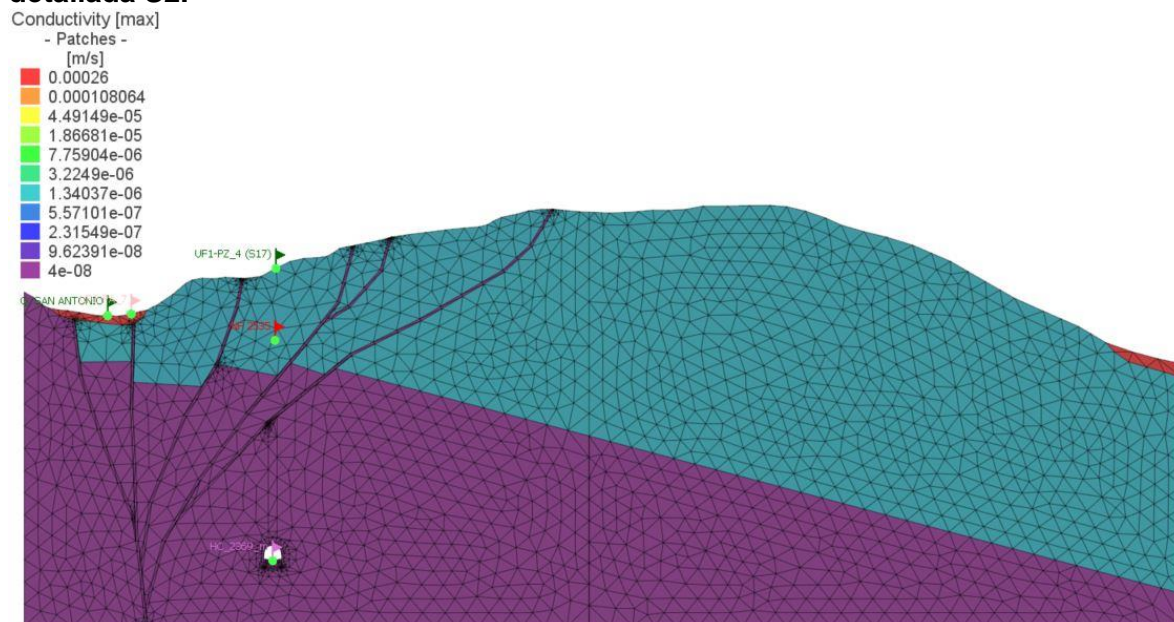
Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.55. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S2.

Sección S2 - Formación	K (m/s)	Ss	Sondeo
Areniscas (fracturada y muy fracturada, falla)	5E-7 / 8E-7	6.2E-6	S17
Depositos Coluviales	5E-6 / 5E-7	2.6E-4	S15/S19/S20
Arcillolitas (fracturada y muy fracturada, falla)	4E-8 / 1E-7	5.6E-5	S17/S19
Suelo residual (Sr) - Limos y limos-arcillosos	1E-9 / 1E-8	7.3E-7	S15A/S21A
Gauge de falla	S/n mat.orig.	5.4E-5	-

Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.95. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección detallada S2.



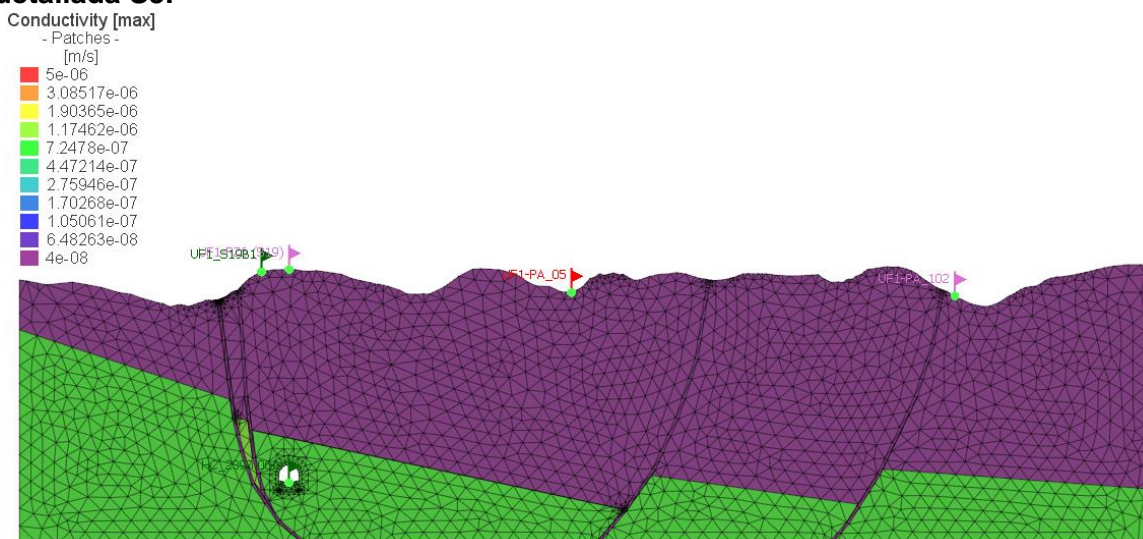
Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.56. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S3.

Sección S3 - Formación	K (m/s)	K (m/s)	Sondeo
Areniscas (fracturada y muy fracturada, falla)	8E-7	6.2E-6	S17
Depositos Coluviales	5E-6 / 5E-7	2.6E-4	S15/S19/S20
Arcillolitas (fracturada y muy fracturada, falla)	4E-8 / 1E-7	5.6E-5	S17/S19
Suelo residual (Sr)) - Limos y limos-arcillosos	1E-9 / 1E-8	7.3E-7	S15A/S21A
Gauge de falla	S/n mat.orig.	5.4E-5	-

Fuente: Geodata, 2018

Figura 5-2.96. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección detallada S3.

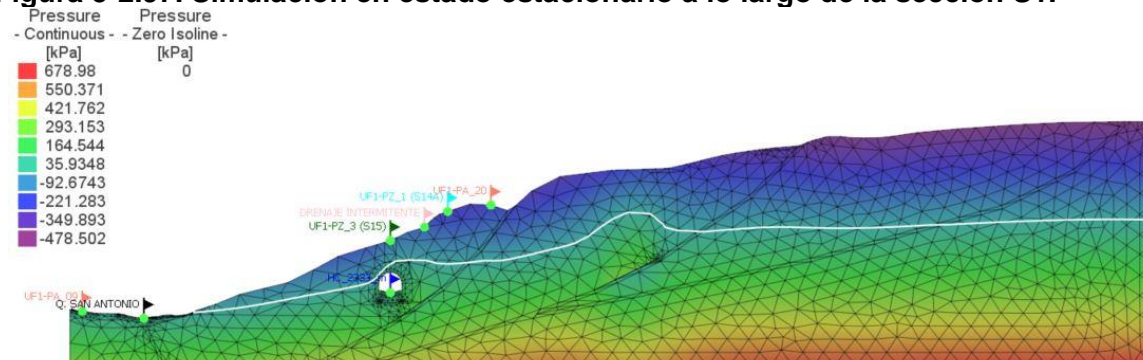


Fuente: Geodata, 2018

- **Simulación en estado estacionario (condición “anteoperam”)**

Desde la Figura 5-2.97 y hasta la Figura 5-2.99 se representan las condiciones en estado estacionario, es decir, sin considerar la presencia del túnel.

Figura 5-2.97. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S1.

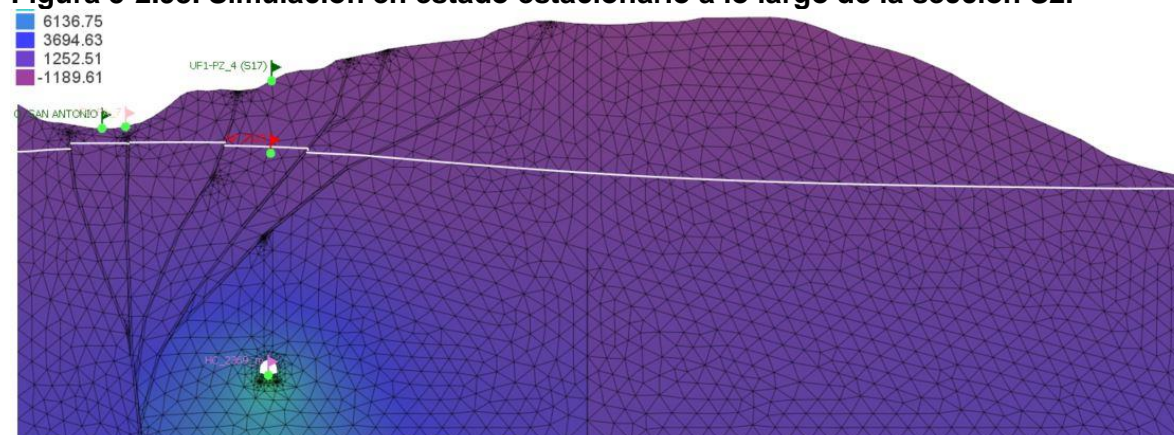


Fuente: Geodata, 2018

En la Figura 5-2.97 se observa que el nivel piezométrico en roca no está directamente conexo con la superficie freática representada por los flujos someros o subsuperficiales que alimentan el punto de agua UF1-PA20, por lo que puede considerarse un nivel freático suspendido asociado a un acuífero colgado. Este punto de agua se alimenta principalmente desde la superficie y está separado de los flujos profundos por los estratos de suelo residual de baja permeabilidad, sin embargo, los dos niveles, en el modelo se encuentran conectados en términos de potencial hidráulico y, por lo tanto, la despresurización del acuífero en roca puede causar, por compensación, un drenaje descendente del nivel colgado.

El punto de agua UF1-PA09, dada su posición altimétrica respecto al nivel piezométrico medido en el piezómetro S15, se considera que recibe una cuota de alimentación tanto del acuífero en roca como desde la superficie a través del agua de lluvia. Aunque dada la extensión y morfología suave de su microcuenca es de esperar que el mayor aporte provenga de la precipitación en grado tal de garantizar su permanencia.

Figura 5-2.98. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S2.

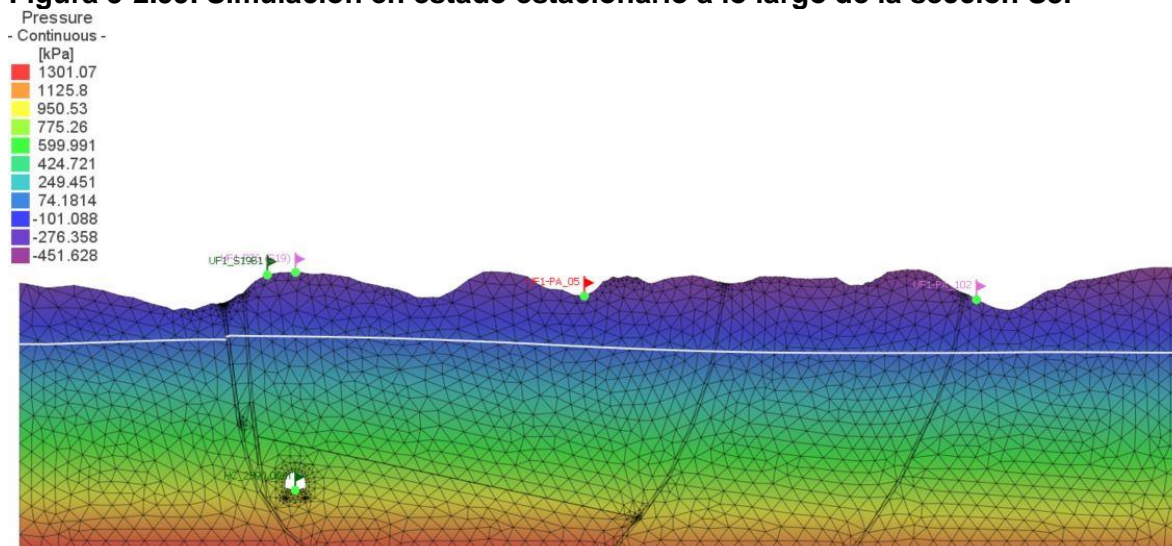


Fuente: Geodata, 2018

La simulación a lo largo de la sección S2 pone en evidencia el comportamiento de los flujos influenciados por la zona de falla que corre paralela al trazado del túnel. La zona intermedia entre las dos fallas resulta ser una zona potencialmente acuífera tal como ha sido evidenciado por la prospección geoelectrica (Ver Figura 5-2.44). Estos flujos se consideran conexos con el acuífero superficial que alimenta el punto de agua UF1-PA07.

Por fuera de la zona de falla, a la derecha de la sección, el nivel freático no se encuentra conexo con la superficie, como evidenciado por el nivel piezométrico medido en el piezómetro S17, y resulta drenado por el Río Pamplonita ubicado a al SW de la sección.

Figura 5-2.99. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S3.



Fuente: Geodata, 2018

La sección S3 representa un nivel en roca no conexo directamente con los flujos subsuperficiales y que alimentan el punto de agua UF1-PA05. Los flujos en roca son drenados por el Río Pamplonita ubicado a la derecha de la sección (SW).

Los flujos que alimentan el punto de agua UF1-PA05, al igual que el punto de agua UF1-PA20 de la sección 1, al parecer poseen características relacionados con acuíferos colgados, aunque no se descarta que en épocas de mayores precipitaciones la recarga del acuífero en roca permita el ascenso de su superficie freática hasta contribuir en su alimentación, creándose condiciones de flujos mixtos. No obstante, tomando en cuenta el escenario de acuíferos colgados, estos puntos deben considerarse en equilibrio con el potencial hidráulico del nivel freático en roca. Por lo que una despresurización de este último debería conducir a un nuevo estado de equilibrio de los niveles freáticos relacionados con flujos subsuperficiales con el fin de compensar el descenso de los potenciales hidráulicos del nivel piezométrico más profundo.

5.1.8.12.5 Resultados del modelo numérico

Una vez calibrado el modelo en régimen estacionario, se ha procedido con la simulación en estado transitorio considerando el inicio de la excavación del túnel respecto a cada una de las secciones. El efecto drenante del túnel ha sido verificado desde el momento de la apertura de la excavación para los siguientes intervalos tiempo:

- Corto plazo
 - $t_0 = 0$ días
 - $t_1 = 1$ día
 - $t_2 = 10$ días
- Mediano plazo
 - $t_3 = 100$ días (aproximadamente 3 meses)

- $t_4 = 365$ días (1 año)
- $t_5 = 730$ días (2 años)
- Largo plazo
 - $t_6 = 1825$ días (5 años)
 - $t_7 = 3650$ días (10 años)

Las simulaciones realizadas a largo plazo se asimilan al régimen estabilizado.

Los resultados de las simulaciones permiten valorar el caudal esperado en el túnel en régimen transitorio (corto plazo) y estabilizado (largo plazo), así como la variación de la superficie piezométrica y los potenciales impactos en superficie. En esta fase no se ha realizado ninguna valoración de la excavación en condiciones de macizo rocoso tratado con inyecciones.

Los resultados gráficos de las simulaciones se muestran desde la Figura 5-2.100 hasta la Figura 5-2.105; Mientras que para cada intervalo de tiempo simulado, se proveen los resultados numéricos en términos de variaciones de caudal en el túnel y del caudal de los puntos de agua presentes a lo largo de las secciones.

También se muestran los gráficos de las variaciones piezométricas simuladas en los piezómetros presentes a lo largo de las secciones y utilizadas en la fase de calibración antes descrita.

En lo que respecta a la valoración del caudal esperado en el túnel, vale la pena hacer un breve comentario acerca de la comparación de los resultados obtenidos a través de las simulaciones numéricas y aquellos calculados con método analítico. En este sentido se observa que mientras los valores de caudal calculados en el corto plazo presentan una buena coherencia, no pasa lo mismo para los valores simulados a largo plazo. En este último caso se evidencia una mayor discrepancia, resultando mayores aquellos valores obtenidos con método analítico.

Esta diferencia que puede ser significativa se debe al hecho que el modelo analítico considera que una vez sucedido el drenaje del acuífero la disminución de la presión intersticial determina una disminución de la permeabilidad del macizo rocoso. Por lo que la disminución del caudal drenado por el túnel en el tiempo está supeditado al cierre de las fracturas y a la consecuente disminución de la permeabilidad más que al abatimiento de la carga hidráulica por encima del túnel.

En el modelo numérico, sin embargo, este tipo de fenómeno no se considera y la disminución del caudal está exclusivamente relacionada con la disminución de la carga hidráulica. En consecuencia, el caudal a largo plazo valorado a través del modelo numérico es por lo general más bajo respecto a aquel obtenido con el método de cálculo analítico.

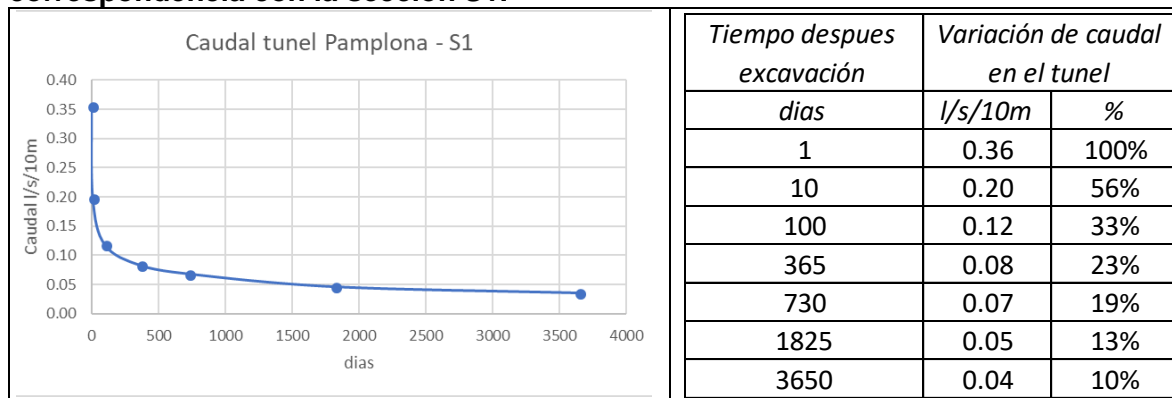
Cabe resaltar que las descripciones a continuación corresponden a escenario de túnel simplemente excavado, ya que al aplicar medidas de manejo las condiciones serán prácticamente iguales a las de antes de la excavación (Ver imágenes del modelo).

- **Sección S1**

- Caudal drenado en el túnel:

En la Tabla 5-2.57 se muestra la curva de abatimiento del caudal en el túnel.

Tabla 5-2.57. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S1.



Fuente: Geodata, 2018

El caudal a corto plazo, después de un día de la apertura de la excavación, es de aprox. 0,4 l/s/10m de túnel (Tabla 5-2.57). De acuerdo con la valoración realizada con el método analítico en correspondencia con la misma abscisa de la sección S1 (PK58+772), los valores obtenidos están entre 0.4 y 0.6 l/s/10 m de túnel, es decir, los dos métodos arrojan valores similares. Sin embargo, el modelo numérico a largo plazo indica un fuerte decrecimiento del caudal que, en régimen estabilizado, después de 10 años de la apertura de la excavación, se reduce aproximadamente 10 veces y se estabiliza en aproximadamente 0,04 l/s/10m de túnel.

Ya en los primeros 10 días del inicio de la excavación se nota una significativa disminución del caudal y pasados 100 días de la apertura el caudal pasa a 0,1 l/s/10m.

- Potenciales impactos en superficie:

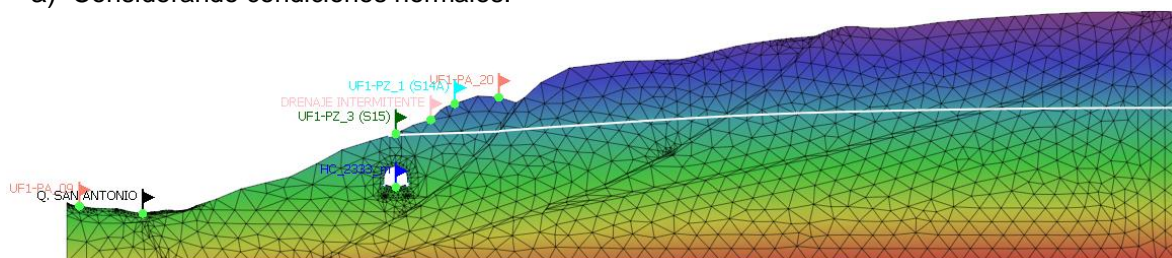
Los impactos en superficie han sido valorados en función de las variaciones porcentuales de los caudales de los puntos de agua UF1-PA09 y UF1-PA20 que se encuentran a lo largo de la sección S2 a aprox. 170 m al NW y 100 m al SE del eje del túnel. El punto de agua UF1-PA09 se encuentra en una cota similar a aquella del túnel (ligeramente por debajo), mientras que el punto UF1-PA20 se ubica en una cota superior, aprox. 70 m por encima.

A lo largo de la sección S1 los impactos sobre los flujos en roca que alimentan el punto de agua UF1-PA09 resultan afectados sólo parcialmente, mientras que aquellos que alimentan el punto de agua UF1-PA20 la afectación es mayor, hasta anularse completamente.

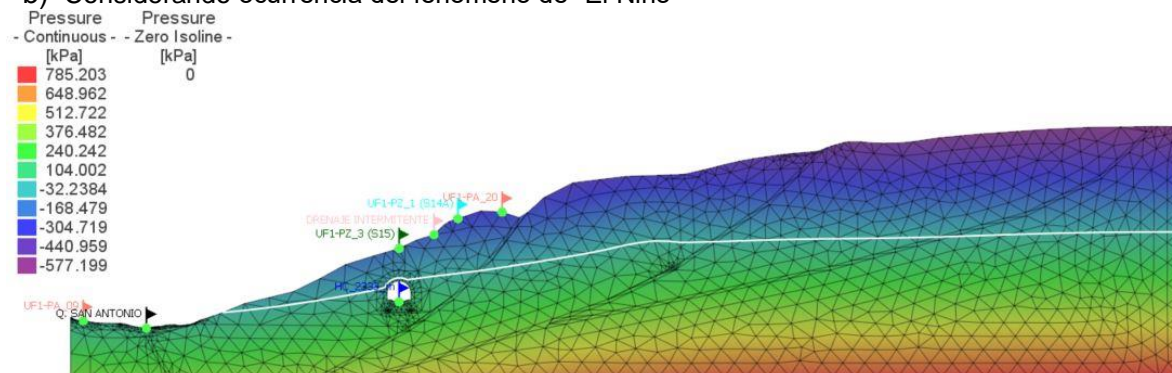
En la Figura 5-2.100 se representan los flujos a lo largo de la sección S1 a un año de iniciada la excavación del túnel. Se presenta el comportamiento del primer año para poder mostrar el efecto hidrológico de un ciclo anual y validar el comportamiento del agua en el macizo ante el efecto del fenómeno de “El Niño” según solicitud de la autoridad ambiental.

Figura 5-2.100. Simulación a un año de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S1 con presencia del túnel y medidas de manejo aplicadas

a) Considerando condiciones normales.



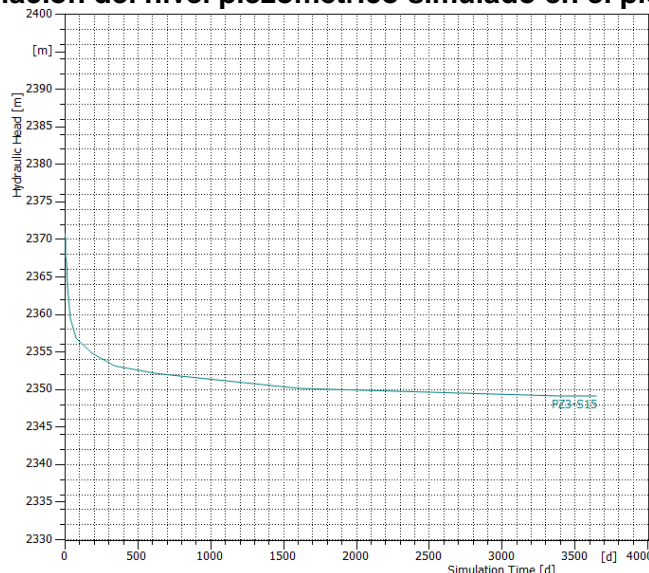
b) Considerando ocurrencia del fenómeno de “El Niño”



Fuente: Geodata, 2018

En la Figura 5-2.101 es posible valorar la variación del nivel piezométrico al interior del piezómetro S15 ubicado a lo largo de la sección S1 en correspondencia con el eje del túnel. Se observa como el túnel drena los circuitos en roca.

Figura 5-2.101. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro PZ03-S15



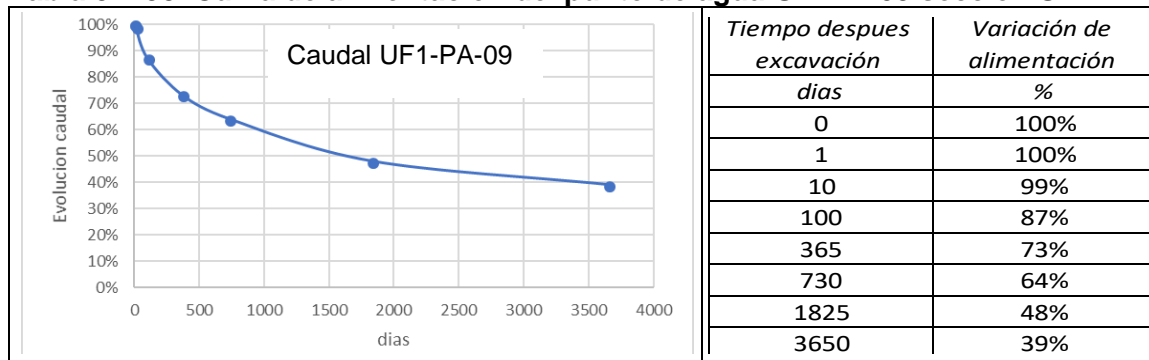
Fuente: Geodata, 2018

- Punto de agua UF1-PA09

El modelo numérico muestra que la perturbación del flujo que ingresa al túnel determina una afectación parcial del drenaje de los circuitos que alimentan el punto de agua UF1-PA09. La Tabla 5-2.58 muestra que la cuota de alimentación del punto que se desarrolla a lo largo de la sección en análisis disminuye aprox. un 60% a largo plazo (10 años) mientras que en los primeros 100 días después de la apertura de la excavación se observa una disminución de aprox. un 25%.

La falta de esta cuota de alimentación del punto UF1-PA09 no significa que ésta se seque. Bajo las condiciones simuladas el impacto sobre el punto de agua se manifestará por lo tanto con una disminución del caudal de hasta aprox. un 40% de la cuota del caudal no perturbado.

Tabla 5-2.58. Curva de alimentación del punto de agua UF1-PA09 sección S1.

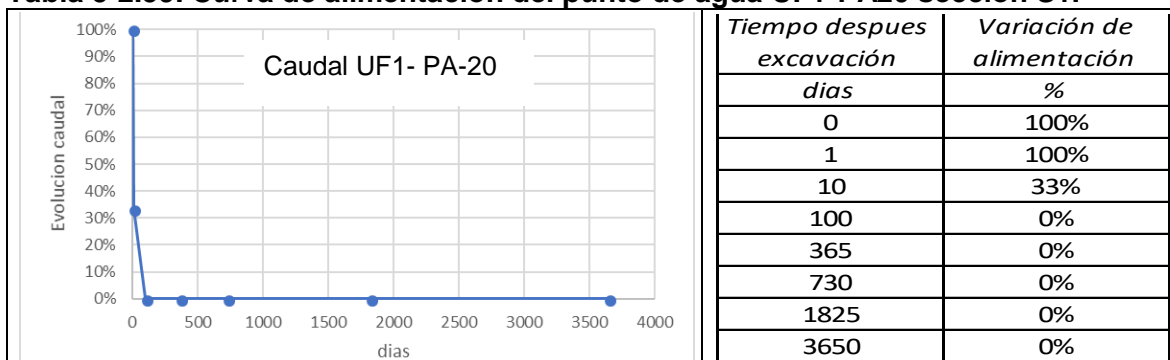


Fuente: Geodata, 2018

- Punto de agua UF1-PA20

Bajo las condiciones simuladas el impacto de los flujos que alimentan a lo largo de la sección S1 el punto de agua UF1-PA20 resultan ser no significativos relacionándolos con el inicio de la excavación; la reducción de un 30% en los niveles del punto que se muestra en la Tabla 5-2.59 reflejan el aislamiento entre el punto y los circuitos subterráneos alrededor de la excavación.

Tabla 5-2.59. Curva de alimentación del punto de agua UF1-PA20 sección S1.



Fuente: Geodata, 2018

El modelo numérico muestra que la perturbación de los flujos inducidos por el túnel determina el drenaje del circuito en roca y la despresurización del sistema de equilibrio en el nivel piezométrico medido en el piezómetro PZ-06_S14A; sin embargo, no interviene en el drenaje descendente de los circuitos más superficiales, que debido a los estratos arcillosos de la Fm Capacho permanecen completamente aislados respecto a los circuitos en roca más profundos.

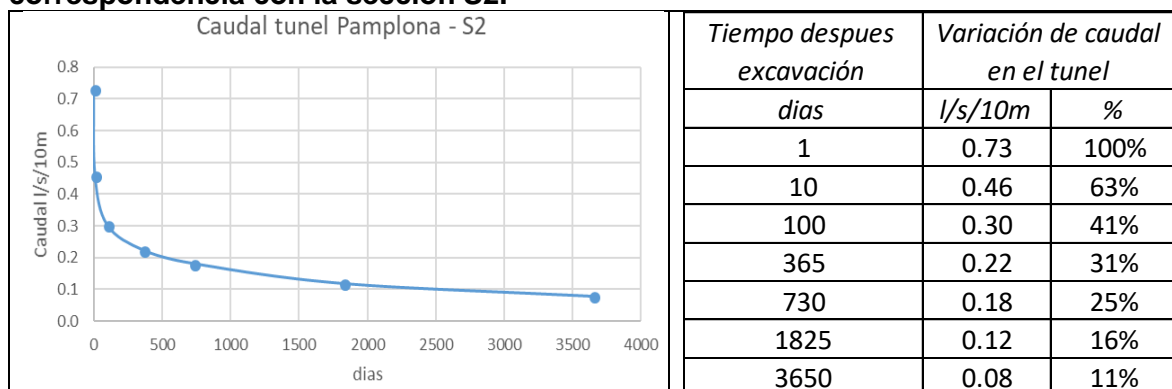
Se precisa que si los flujos subsuperficiales que alimenta el punto UF1-PA20 y UF1-PA09 permanecen completamente aislados de los circuitos en roca, es posible que el potencial impacto sea menor al previsto en la simulación numérica o prácticamente inexistente. Para esto es necesario que el substrato que infrayace los depósitos cuaternarios o zonas más meteorizadas del macizo rocoso contenga una permeabilidad característica continua muy baja (impermeable), del orden de $1E-10$ m/s o inferior, como efectivamente se da en la Fm Capacho.

- **Sección S2**

- Caudal drenado en el túnel:

En la Tabla 5-2.60 se muestra la curva de abatimiento del caudal en el túnel.

Tabla 5-2.60. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S2.



Fuente: Geodata, 2018

El caudal a corto plazo, después de un día de la apertura de la excavación, es de aprox. 0,7 l/s/10m de túnel (Tabla 5-2.60). De acuerdo con la valoración realizada con el método analítico en correspondencia con la misma abscisa de la sección S2 (PK59+474), el valor obtenido es de aprox. 0,6 l/s/10 m de túnel, es decir, los dos métodos arrojan valores similares.

Sin embargo, el modelo numérico a largo plazo indica un fuerte decrecimiento del caudal que, en régimen estabilizado, después de 10 años de la apertura de la excavación, se reduce aproximadamente 10 veces y se estabiliza en aprox. 0,1 l/s/10m.

Ya en los primeros 10 días del inicio de la excavación se nota una significativa disminución del caudal y pasados 100 días de la apertura el caudal pasa a 0,3 l/s/10m.

- Potenciales impactos en superficie:

Los potenciales impactos en superficie fueron valorados en función de la variación porcentual del caudal del punto de agua UF1-PA07 que se encuentra a lo largo de la sección 2 (S2). El punto de agua se ubica a aprox. 100 m hacia el NW respecto al eje del túnel. A pesar de esta corta distancia, desde un punto de vista geológico estructural e hidrogeológico, su circuito de alimentación está parcialmente compartido y seccionado por un sistema de fallas con dirección preferencia E-W, que permiten reducir el grado de conexión directa entre los segmentos del macizo rocoso en el cual se realiza la excavación y aquel en el cual se desarrolla el acuífero que sustenta el punto de agua.

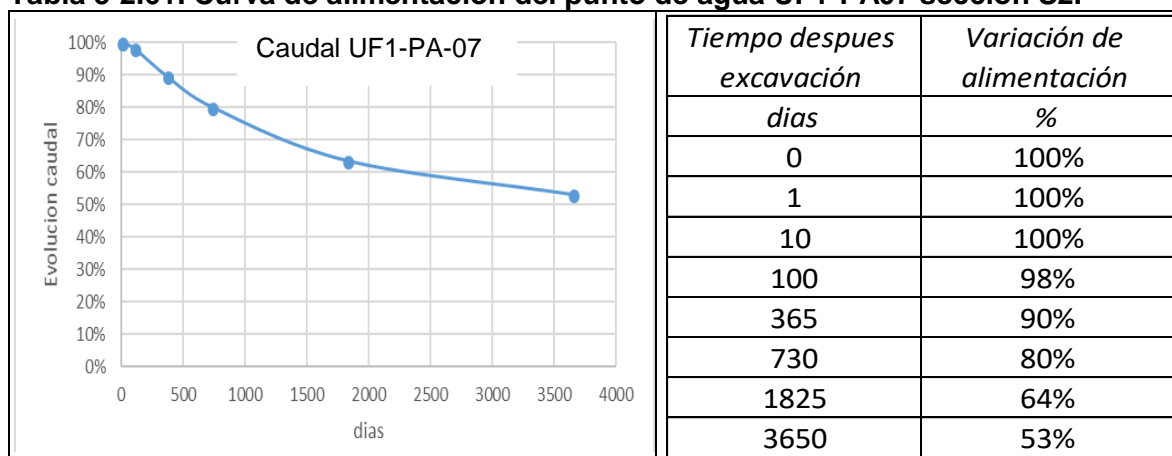
Tal condición, valorada en la definición del modelo hidrogeológico conceptual ha sido considerada en la construcción del modelo numérico.

El modelo numérico muestra que la perturbación de los flujos inducidos por el túnel determina un drenaje parcial de los circuitos que alimentan el punto de agua UF1-PA07. Los datos reportados en la Tabla 5-2.61 indica que la cuota de alimentación del punto de agua que se desarrolla a lo largo de la sección S2 disminuye en casi un 50% al largo plazo (10 años), mientras que en los primeros 100 días luego de la apertura de la excavación no

se observa una disminución apreciable (aprox. 2%).

La falta de esta cuota de alimentación del punto UF1-PA07 no significa que ésta se seque. El impacto sobre el punto de agua se manifestará por lo tanto con una disminución del caudal al largo plazo de hasta aprox. un 50%.

Tabla 5-2.61. Curva de alimentación del punto de agua UF1-PA07 sección S2.



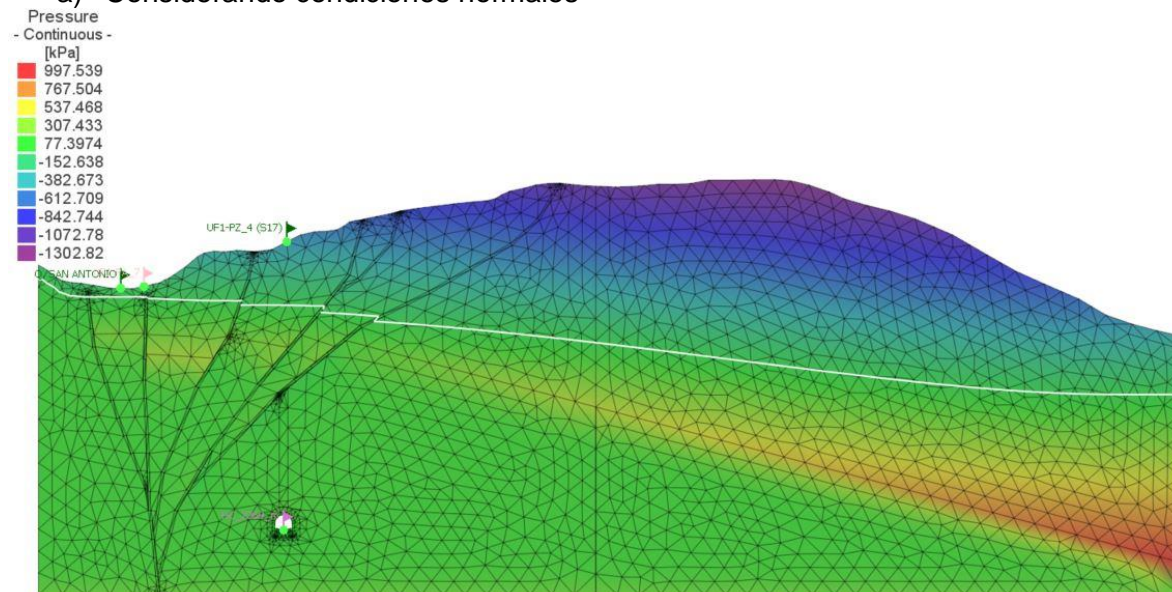
Fuente: Geodata, 2018

En las Figura 5-2.102 se representan los flujos a lo largo de la sección S2 a un año de iniciada la excavación del túnel. Se observa, el rol de distribución de los flujos en roca atribuidos a la zona de falla transversal a la sección. Al largo plazo los circuitos en roca serían drenados por el túnel hasta ubicar el nivel piezométrico en inmediación de la excavación, en caso de que no se aplicaran las medidas de manejo establecidas para la excavación del túnel.

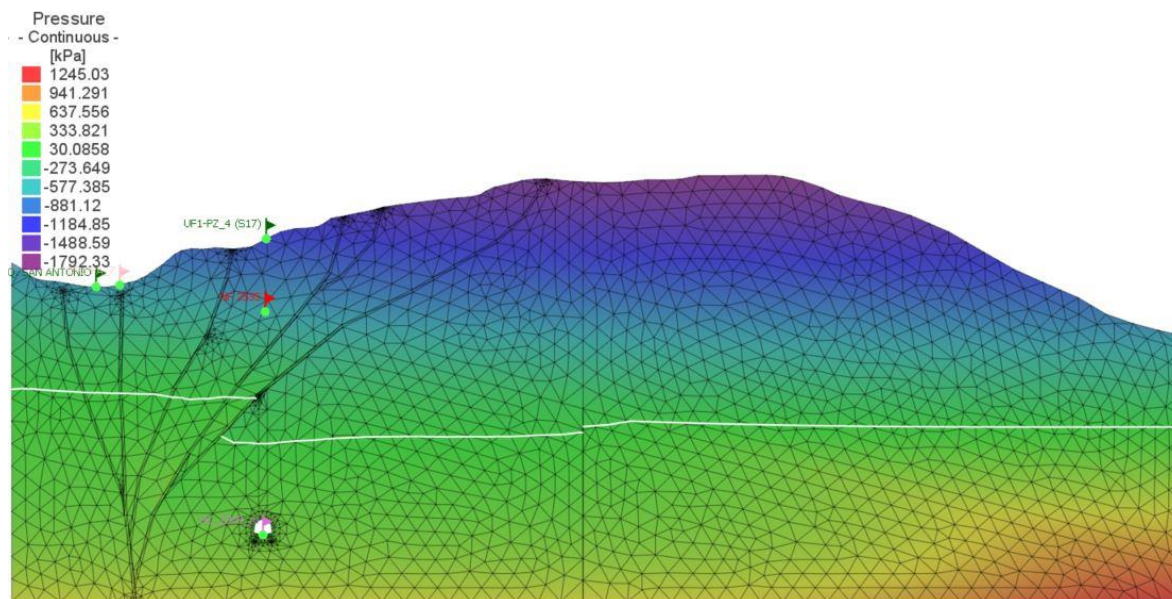
Se presenta el comportamiento del primer año para poder mostrar el efecto hidrológico de un ciclo anual y validar el comportamiento del agua en el macizo ante el efecto del fenómeno de “El Niño” según solicitud de la autoridad ambiental.

Figura 5-2.102. Simulación a un año de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S2 con presencia del túnel y medidas de manejo aplicadas.

a) Considerando condiciones normales



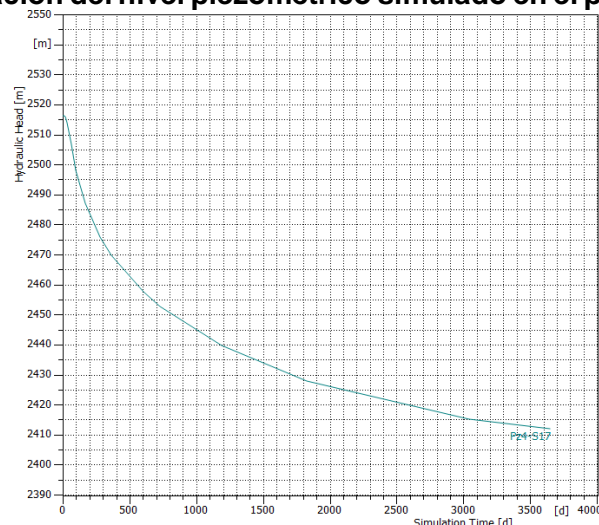
b) Considerando ocurrencia del fenómeno de “El Niño”



Fuente: Geodata, 2018

En la Figura 5-2.103 es posible valorar la variación del nivel piezométrico al interior del piezómetro S17, ubicado en correspondencia con el eje del túnel e interceptado por la sección S2. Se observa como el túnel drena los circuitos en roca.

Figura 5-2.103. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro PZ06_S17.

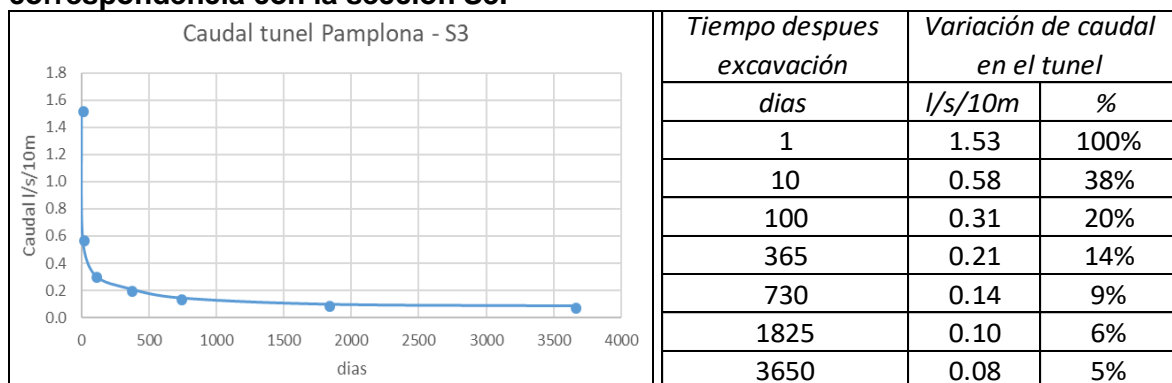


Fuente: Geodata, 2018

- **Sección S3**
 - Caudal drenado en el túnel:

En la Tabla 5-2.62 se muestra la curva de abatimiento del caudal en el túnel

Tabla 5-2.62. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S3.



Fuente: Geodata, 2018

El caudal a corto plazo, después de un día de la apertura de la excavación, es de aprox. 1,5 l/s/10m de túnel (Tabla 5-2.62). De acuerdo con la valoración realizada con el método analítico en correspondencia con la misma abscisa de la sección S2 (PK59+787), el valor obtenido es de aprox. 1,3 l/s/10 m de túnel, es decir, los dos métodos arrojan valores similares. Sin embargo, el modelo numérico a largo plazo indica un fuerte decrecimiento del caudal que, en régimen estabilizado, después de 10 años de la apertura de la excavación,

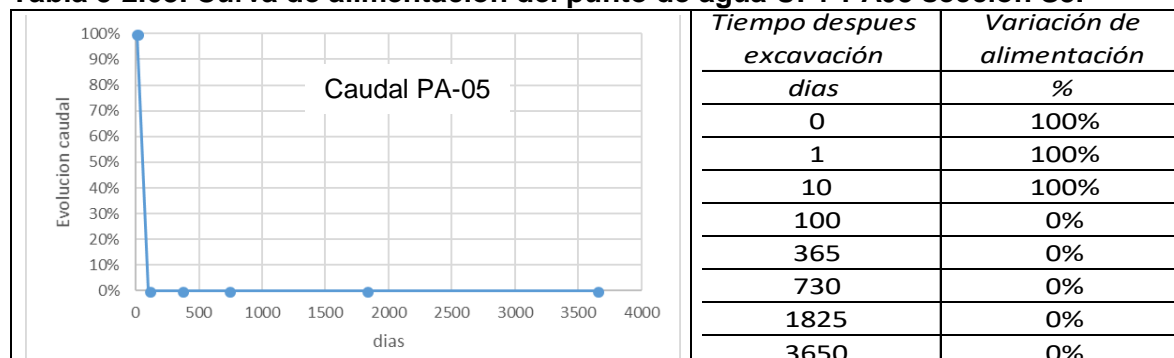
se reduce drásticamente y se estabiliza en aprox. 0,1 l/s/10m. Ya en los primeros 10 días del inicio de la excavación se nota una significativa disminución del caudal y pasados 100 días de la apertura el caudal pasa a 0,3 l/s/10m.

- Potenciales impactos en superficie:

Los potenciales impactos en superficie fueron valorados en función de la variación porcentual del caudal del punto de agua UF1-PA05 que se encuentra a lo largo de la sección 3 (S3). El punto de agua se ubica a aprox. 200 m hacia el SE respecto al eje del túnel. La alimentación de este punto de agua proviene principalmente de los flujos subsuperficiales que fluyen a lo largo de la pendiente en una dirección transversal al eje de la sección S3 simulada para el presente modelo numérico.

El modelo numérico muestra que la perturbación de los flujos inducidos por el túnel determina el drenaje del circuito en roca y la despresurización del sistema de equilibrio en el nivel piezométrico medido en el piezómetro PZ-06_S19 ; sin embargo no interviene en el drenaje descendente de los circuitos más superficiales, que debido a los estratos arcillosos de la Fm Tibú-Mercedes permanecen completamente aislados respecto a los circuitos en roca más profundos, la Tabla 5-2.63 muestra los descensos de caudal en el punto UF1-PA05 corroborando así la intermitencia de la surgencia.

Tabla 5-2.63. Curva de alimentación del punto de agua UF1-PA05 sección S3.



Fuente: Geodata, 2018

Al igual que en el caso de la sección S1, se precisa que si los flujos subsuperficiales que alimenta el punto UF1-PA05 permanecen completamente aislados de los circuitos en roca, es posible que el potencial impacto sea menor al previsto en la simulación numérica o prácticamente inexistente. Para esto es necesario que el substrato que infrayace los depósitos cuaternarios o zonas más meteorizadas del macizo rocoso contenga una permeabilidad característica continua muy baja (impermeable), menor o igual a 1E-10 m/s.

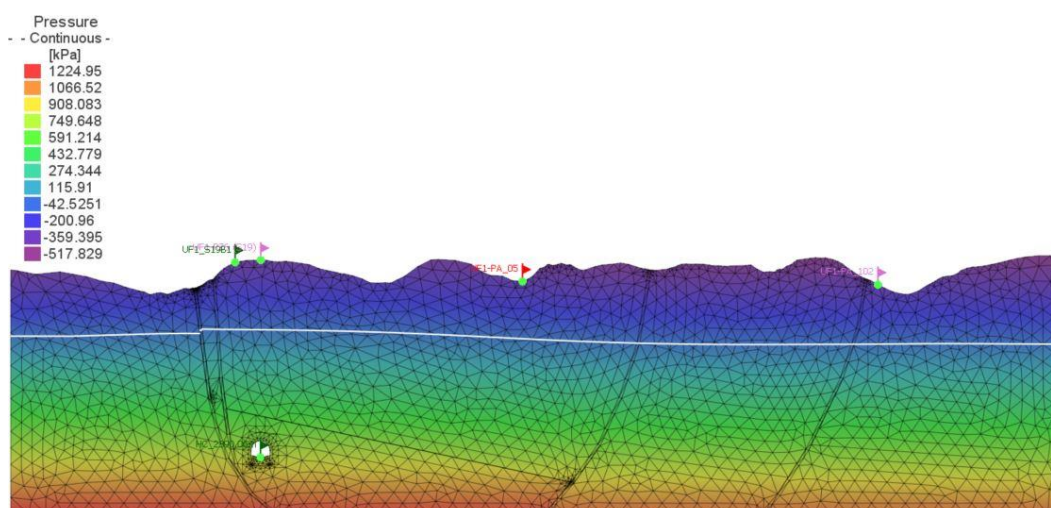
En la Figura 5-2.104 se representan los flujos a lo largo de la sección S2 a 100 días de iniciada la excavación del túnel. Se observa que el drenaje inducido por el túnel resulta influenciado por la distribución de los flujos desde la zona de falla transversal a la sección simulada (falla en dirección E-W). Tal condición es coherente en relación con lo expuesto

precedentemente para la sección S2. Al largo plazo los circuitos en roca serían drenados por el túnel hasta ubicar el nivel piezométrico en inmediación de la excavación, en caso de que no se aplicaran las medidas de manejo establecidas para la excavación del túnel.

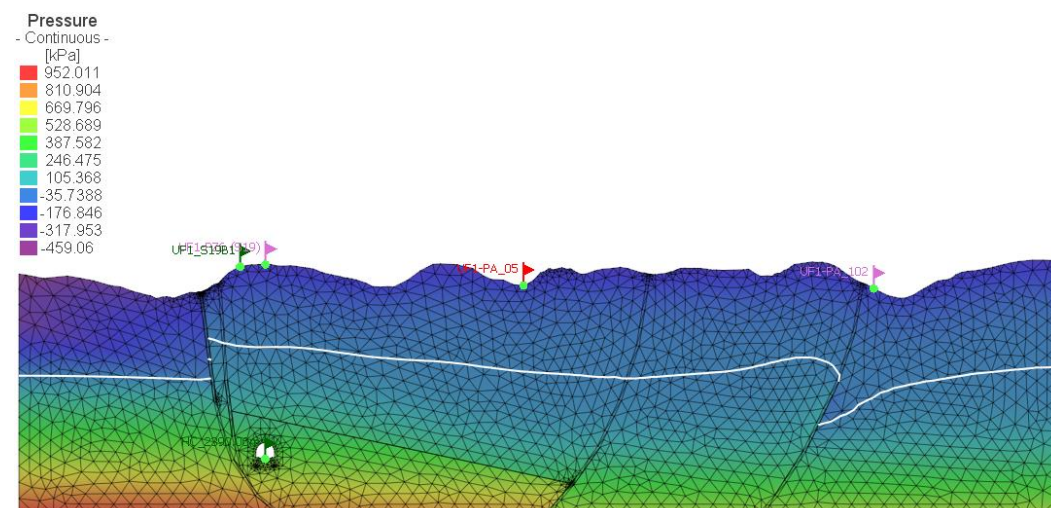
Se presenta el comportamiento del primer año para poder mostrar el efecto hidrológico de un ciclo anual y validar el comportamiento del agua en el macizo ante el efecto del fenómeno de “El Niño” según solicitud de la autoridad ambiental.

Figura 5-2.104. Simulación de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S3 con presencia del túnel y medidas de manejo aplicadas

a) Considerando condiciones normales



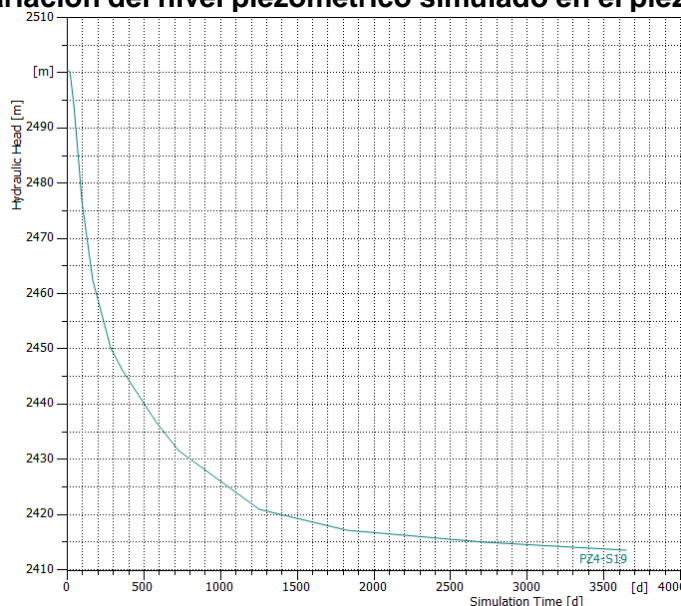
b) Considerando ocurrencia del fenómeno de “El Niño”



Fuente: Geodata, 2018

En la Figura 5-2.105 es posible valorar la variación del nivel piezométrico al interior del piezómetro Pz-06_S19, ubicado en correspondencia con el eje del túnel e interceptado por la sección S3. Al igual que en los casos precedentes, se observa como el túnel drena los circuitos en roca.

Figura 5-2.105. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro PZ06-S17.



Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.12.6 Caudal crítico

De acuerdo con la valoración realizada a través de las simulaciones numéricas y el cálculo analítico del caudal esperado a corto plazo en el túnel Pamplona se define el caudal crítico tomando en consideración la discriminación por tramos homogéneos realizada con base en el perfil geológico geotécnico del túnel. En la Tabla 5-2.64 se muestran los valores de caudal críticos establecidos.

El caudal crítico es considerado para cada sector con características geológicas e hidrogeológicas homogéneas con el objeto de tener en cuenta las condiciones de infiltración específicas que se esperan en el frente de excavación. El valor de caudal crítico se expresa por lo tanto en términos de volumen de agua drenada después de un día de excavación.

Al término de un día de excavación, el caudal total no debe ser mayor al caudal máximo diario (m³/día) definido a partir del caudal específico (l/s/10 m de túnel) para cada tramo en particular. En estos términos, el caudal real puede haber superado el umbral mínimo y cumplir con el máximo diario dependiendo del tiempo de la respuesta para el taponamiento de las discontinuidades filtrantes.

Tabla 5-2.64. Caudal crítico establecido para el túnel Pamplona.

Geología			Progresiva		Q0 crítico	
Roca	Falla		desde	hasta	Q0 max. específico	Q0 max. Diario
			m	m	l/s/10m	m3/día/10m
Kic		Lodolitas/Arcillolitas	K58+745,00	K58+755,00	0	N/A
		Lodolitas/Arcillolitas	K58+755,00	K58+780,00	0,6	55
		Lodolitas/Arcillolitas	K58+780,00	K58+810,00	0,8	69
		Lodolitas/Arcillolitas	K58+810,00	K58+850,00	1,0	83
		Lodolitas/Arcillolitas	K58+850,00	K58+880,00	0,04	4
	F	Lodolitas/Arcillolitas	K58+880,00	K58+885,00	1,0	90
Kia	F	Areniscas	K58+885,00	K58+890,00	1,6	142
		Areniscas	K58+890,00	K58+905,00	0,7	63
		Arcillolitas	K58+905,00	K58+970,00	0,3	29
		Arcillolitas	K58+970,00	K59+100,00	0,3	29
		Areniscas	K59+100,00	K59+160,00	0,9	76
		Areniscas	K59+160,00	K59+220,00	1,2	100
Kitm		Arcillolitas	K59+220,00	K59+270,00	0,6	54
		Areniscas	K59+270,00	K59+340,00	1,5	131
		Arcillolitas	K59+340,00	K59+370,00	0,7	61
		Areniscas	K59+370,00	K59+450,00	1,6	134
	F	Arcillolitas	K59+450,00	K59+480,00	0,7	60
		Arcillolitas	K59+480,00	K59+540,00	0,09	8
		Arcillolitas	K59+540,00	K59+610,00	0,6	55
	F	Arcillolitas	K59+610,00	K59+620,00	1,9	166
		Arcillolitas	K59+620,00	K59+640,00	0,08	7
		Areniscas y Calizas	K59+640,00	K59+756,00	2,2	186
		Arcillolitas	K59+756,00	K59+812,00	1,4	122
		Arcillolitas	K59+812,00	K59+862,00	1,3	115
		Arcillolitas	K59+862,00	K59+912,00	1,0	90
	F	Areniscas	K59+912,00	K59+940,00	0,6	55
Jg		Suelos residuales	K59+940,00	K60+075.36	0	N/A

Nota: N/A= No aplica por considerar que se excava por encima del nivel freático

Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.12.7 Consideraciones finales

A continuación, se relacionan los principales elementos que fueron considerados en la construcción del modelo numérico realizado siguiendo el enfoque 2D vertical.

- **Principales características del acuífero en roca**

Consiste principalmente de rocas de origen sedimentario que forman una alternancia más o menos densa de niveles de composición arenosa y arcillosa e intermedias. Con algunas intercalaciones de horizontes conglomerados con grado de cementación variable y niveles

de rocas carbonatadas potencialmente susceptibles de disolución química, especialmente a lo largo de los sectores fracturados; desde un punto de vista del comportamiento hidrodinámico, estos horizontes se han comparado con los niveles arenosos, que son más permeables.

Por lo tanto, se han distinguido 2 subunidades hidrogeológicas principales que presentan una variabilidad interna de la permeabilidad y que se ilustran en la Tabla 5-2.37. Estas distinciones se realizaron no sólo en función de la formación geológica a la que pertenecen sino más bien en relación con la litología, su composición granulométrica, su reología y, obviamente, con base en los datos de permeabilidad disponibles.

La permeabilidad obtenida a través de pruebas in situ realizadas en perforaciones mecánicas evidencian una permeabilidad media comprendida entre $1E-6$ m/s para los litotipos arenosos y de $1E-7$ para aquellos más arcillosos. Estos valores son analizados y en la Tabla 5-2.36 se entrega una propuesta estadística de todos los datos obtenidos a través de las pruebas de permeabilidad realizadas en el substrato rocoso, en los sondeos ejecutados a lo largo de la traza del túnel.

De este análisis se evidencia que el macizo rocoso en el cual será excavado el túnel se caracteriza por presentar una permeabilidad media de acuerdo con la clasificación de la norma AFTES; lo cual se puede deducir también al observar las muestras obtenidas en los sondeos que en algunos casos muestran un grado de fracturación importante aún en aquellos sectores donde el túnel presenta la mayor cobertura (aprox. 220 m).

El hecho que la permeabilidad del macizo sea relativamente importante se evidencia también por el comportamiento de la superficie piezométrica medida en los piezómetros instalados a lo largo de la traza; la cual se presenta generalmente a profundidad significativa y se conecta sólo localmente con los acuíferos superficiales. La posición de la superficie piezométrica por encima de la cota del túnel se ilustra en la Figura 5-2.68.

Se trata de una superficie piezométrica que drena en el fondo del valle del río Pamplonita y de recarga generalmente reducida, tal como lo evidencia el estudio de valoración de la recarga presentado en el capítulo 5.1.8.12.3.

Desde un punto de vista hidroquímico, el agua muestreada en los sondeos presenta una conductividad eléctrica que varía entre 94 y 712 $\mu S/cm$ indicando una baja mineralización. Se trata por lo tanto de agua conexas con circuitos poco profundos y rápidos, con un tiempo de residencia breve y poca interacción con la matriz sólida del acuífero en roca.

El modelo geológico de referencia pone en evidencia la presencia de zonas de fallas con persistencia regional; el sistema principal que cumple un rol preponderante en inmediaciones al túnel corresponde con la falla subvertical de rumbo dominante E-W paralela al trazado del túnel. Tal sistema pareciera tener un rol hidrogeológico importante; distribuyendo los flujos en profundidad constituyendo una barrera a los flujos transversales (formación de gauge arcilloso en correspondencia con el núcleo de la falla) pero facilitando la saturación y los flujos paralelos a su rumbo (zona de fracturación). Tal condición es

puesta en evidencia por la investigación geoeléctrica y el marco estructural en el cual será excavado el túnel Pamplona (Ver Figura 5-2.44).

- **Principales características de los acuíferos superficiales**

Los datos disponibles indican que los puntos de agua inventariados son en la mayoría de los casos de tipo perenne y que algunos de ellos tienen una importancia estratégica garantizando el aprovisionamiento de agua para un número considerable de usuarios. En particular, los puntos de agua UF1-PA02, UF1-PA04, UF1-PA05 y UF1-PA07 tienen mayor relevancia en este sentido.

Los datos hidrodinámicos de los puntos de agua inventariados, muestreados y analizados indican que los circuitos que los alimentan son principalmente de tipo subsuperficial, rápidos y limitados.

Aparentemente, el retículo hidrográfico menor por encima del túnel se encuentra poco desarrollado y se activa especialmente durante precipitaciones importantes. Los puntos de agua, al parecer tienen mayor permanencia, aunque el caudal sea generalmente bajo ($Q < 1$ l/s) salvo un par de excepciones que presentan caudales mayores a 1 l/s.

La correlación entre conductividad eléctrica y mineralización del agua en términos de TDS (Total Dissolved Solids) indican que el agua muestreada se clasifica como agua poco mineralizada ($TDS \leq 50$ mg/l) y mineral ($50 < TDS \leq 500$ mg/l); el valor máximo es de 378 mg/l. La medida de actividad redox indica un ambiente oxidante ($E_h > 0$ mV).

La subsistencia de los acuíferos superficiales generalmente no conexos con el nivel piezométrico en roca, pero suficientemente desarrollados para garantizar la permanencia del punto de agua; sugieren que estos se encuentran limitados en la base por horizontes de baja permeabilidad que en las condiciones de equilibrio hidráulico actual les dan la característica de acuífero colgado.

Los niveles de baja permeabilidad que constituyen el lecho de los acuíferos colgados están constituidos por los horizontes de alteración del substrato rocoso que forma un material arcillo-limoso continuo, pero de potencia limitada; los valores de permeabilidad obtenidos de las pruebas Lefranc ejecutadas en el sondeo S21 en correspondencia con el horizonte de suelo residual evidencian un valor medio de $2E-8$ m/s;

Los acuíferos superficiales se encuentran por su parte constituidos por espesores considerables de material aluvio-coluvial de permeabilidad muy variable (entre $1E-8$ m/s y $1E-6$ m/s). La alimentación de estos acuíferos proviene en su mayor parte de la precipitación.

Los acuíferos superficiales donde se alojan los flujos que alimentan los puntos de agua han sido representados en el modelo numérico adoptado y la simulación en régimen estacionario ha sido calibrada además del nivel piezométrico del acuífero en roca, considerando también la presencia de los puntos de agua en superficie.

5.1.8.13 Red de Monitoreo

Se propone a continuación una red de monitoreo representativa de la calidad y cantidad de agua superficial, subsuperficial y subterránea presente a lo largo de la Unidad Funcional 1 (UF1). Entre los puntos de agua censados, se ha identificado una serie representativa del contexto hidrológico e hidrogeológico, que se sugiere controlar en el tiempo para monitorear las variaciones de caudal del agua superficial, subsuperficial y subterránea, así como la evolución de sus parámetros fisicoquímicos in situ (conductividad eléctrica, temperatura, pH) y de calidad.

La Red de Monitoreo se convierte en una Línea Base, que aportará información para el conocimiento, la evaluación y el control de la situación hidrogeológica del área de estudio.

Se propone dar inicio a este monitoreo antes del comienzo de las excavaciones de las obras, continuarlo durante su fase constructiva y como mínimo durante un año después de terminada la construcción de la UF1.

5.1.8.13.1 Criterios de Selección de Puntos para la Red de Monitoreo

- **Criterios Generales:**

La selección de los puntos de la red de monitoreo se basa en criterios específicos del proyecto, en los resultados del presente estudio hidrogeológico y en concordancia con algunas recomendaciones generales establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (1994). Cada criterio corresponde a la valoración de cada una de las variables que se requieren a continuación.

- Determinar la profundidad del nivel freático.
- Determinar la dirección del flujo del agua subsuperficial y subterránea.
- Medición de los caudales de los principales cursos de agua superficial en términos de afectación del caudal por la presencia de la obra.
- Determinar la relación con cuerpos mineralizados de aguas subterráneas.
- Calibrar modelos de cuencas hidrogeológicas.
- Prever los niveles de agua y la composición química en base a diversos planes de gestión del acuífero.
- Supervisar la explotación del agua y la recarga superficial.

Las observaciones, mediciones, y otras actividades se planean de acuerdo con los objetivos y propósitos para los que está diseñada la red. Las mediciones del nivel y/o cantidad (caudal) de agua son uno de los varios parámetros requeridos para desarrollar modelos predictivos de sistemas de aguas subsuperficiales y subterráneas. En términos generales se tienen en cuenta dos tipos de monitoreo.

- Monitoreo de la cantidad del recurso hídrico (A): monitoreo de los puntos de agua censados en la UF1 (naturales y antrópicos).
- Monitoreo de la calidad del recurso hídrico (B): Monitoreo de puntos de agua en general con el objeto de evidenciar su calidad antes, durante y después de

construidas las obras. En este tipo de monitoreo se incluyen los puntos de agua subsuperficial y subterránea descritos en el capítulo 5.1.8.8.4.

- **Criterios Particulares para la Vía Cúcuta-Pamplona (UF1):**

La selección de los puntos de agua subsuperficial y de agua subterránea para el monitoreo, y frecuencia de medición, obedece a los siguientes criterios particulares del proyecto:

- Puntos de agua Nivel 2 y 3 de acuerdo con el criterio de valoración del potencial de afectación de los puntos de agua por la presencia de la nueva vía a cielo abierto.
- Usos que los habitantes le dan a los puntos de agua.
- Permanencia del punto de agua.
- Puntos de agua con mayores caudales.
- Distancia del punto de agua a la obra en proyecto (se han privilegiado los puntos más cercanos a los ejes del nuevo trazado vial).
- Distribución homogénea de los puntos de agua en los litotipos más representativos.
- Cierres de cuencas y/o microcuencas para los puntos sobre cursos de aguas superficiales (AS).

La selección de los puntos sobre cursos de aguas superficiales obedece básicamente a un solo criterio:

- Todos aquellos cursos de aguas que son interceptados por el nuevo trazado vial. Los puntos de control se ubican aguas abajo del flujo superficial que se prevé será interceptado por el nuevo trazado vial.

5.1.8.13.2 Puntos de agua seleccionados para integrar la red de monitoreo propuesta

Tomando en cuenta los criterios y consideraciones mencionados anteriormente, se ha definido una red de monitoreo constituida inicialmente por 42 puntos de agua, mostrados en la Tabla 5-2.66 y Tabla 5-2.67 y Tabla 5-2.68, representada por 27 puntos de agua (PA), 8 piezómetros y 7 puntos sobre cursos de aguas superficiales (AS).

Los puntos inicialmente identificados para la red de monitoreo pueden aumentar o disminuir dependiendo del comportamiento evidenciado durante las mediciones realizadas coherentemente con el comportamiento estacional o no de los puntos seleccionados.

- **Tipo de puntos y tipo de mediciones (monitoreo tipo A):**

A continuación, se describen los tipos de puntos y de mediciones que deben llevarse a cabo en los puntos de agua seleccionados por el monitoreo de tipo A (Tabla 5-2.65).

Debido a que en el inventario realizado en la zona de influencia de la UF1 no se encontraron pozos ni aljibes, el monitoreo se plantea solamente en puntos de aguas subsuperficial y subterránea, incluyendo piezómetros y en puntos ubicados sobre cursos de aguas superficiales.

Tabla 5-2.65 Tipo de punto de control y mediciones relacionadas con el monitoreo tipo A de los puntos de agua seleccionados

Medición	Pozo/aljibe	Piezómetro	Curso de agua	Manantial	Flujo subsuperficial	Resurgencia
Caudal			X	X	X	X
Nivel de agua	X	X				
Parámetros Fisicoquímicos	X	X	X	X	X	X


Fuente: Geodata, 2018

Por otro lado, los tipos de mediciones a realizar en los puntos de control identificados en la Tabla 5-2.65 para monitoreo Tipo A, son las siguientes:

- i. **Caudal:** se debe medir en los puntos de agua y cursos de agua superficial, con el fin de controlar las oscilaciones estacionales y correlacionar las eventuales disminuciones con las actividades constructivas del proyecto.
- ii. **Nivel de la napa (eventual):** se mide en los piezómetros con el fin de controlar las oscilaciones estacionales del nivel piezométrico y correlacionar las eventuales disminuciones especialmente en correspondencia con los cortes o taludes más altos del proyecto.
- iii. **Parámetros fisicoquímicos:** Se tomarán medidas de control en todos los puntos de monitoreo relacionadas con la conductividad eléctrica del agua, la temperatura y el pH.

Tabla 5-2.66 Puntos de agua subsuperficial y subterránea que integran la red de monitoreo.

Punto de Agua (ID PA)	Tipo de Punto ID	Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá)			Obra más cercana	Distancia Horizontal al eje/perímetro	Abscisa Perímetro (Referencia)	Caudal (l/s) abr-ago-18	Nivel de Afectación	Tipo de Monitoreo	
		E	N	ELEV						A	B
UF1-PA01	Interflujo	1157726	1308915	2381	ZODME 136	48	Perímetro	0,284	2	OK	
UF1-PA02	Manantial	1158098	1308642	2420	Túnel Pamplona	419	K59+880	0,352	2	OK	OK
UF1-PA03	Manantial	1158038	1308669	2409	Túnel Pamplona	383	K59+880	0,212	2	OK	
UF1-PA04	Manantial	1158043	1308721	2421	Túnel Pamplona	332	K59+880	1,100	2	OK	
UF1-PA05	Interflujo	1158208	1308883	2442	Túnel Pamplona	218	K59+760	0,177	2	OK	OK
UF1-PA06	Manantial	1157761	1309240	2482	Túnel Pamplona	194	K60+060	0,040	2	OK	
UF1-PA07	Manantial	1158323	1309304	2568	Túnel Pamplona	108	K59+480	0,449	2	OK	OK
UF1-PA08	Interflujo	1158483	1309452	2536	Túnel Pamplona	177	K59+280	0,544	1	OK	
UF1-PA09	Resurgencia	1158987	1309630	2337	Túnel Pamplona	168	K58+780	2,116	1	OK	OK
UF1-PA10	Interflujo	1158862	1309767	2372	Túnel Pamplona	323	K58+880	0,360	1	OK	OK
UF1-PA12	Resurgencia	1159652	1308983	2257	Vía a cielo abierto	3	K57+422	0,113	3	OK	
UF1-PA13	Resurgencia	1159760	1308981	2238	Vía a cielo abierto	73	K57+354	0,053	1	OK	OK
UF1-PA14	Interflujo	1159716	1308814	2265	Vía a cielo abierto	27	K57+222	0,035	1	OK	
UF1-PA17	Resurgencia	1159404	1308450	2317	Vía a cielo abierto	262	K56+924	0,438	1		OK
UF1-PA18	Interflujo	1159478	1308071	2270	Vía a cielo abierto	171	K56+172	0,158	1		OK
UF1-PA19	Interflujo	1159096	1309390	2401	Túnel	108	K58+780	0,268	2	OK	
UF1-PA20	Interflujo	1159042	1309370	2409	Túnel	98	K58+780	0,088	2	OK	


 Unión Vial Río Pamplona <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small>	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA
Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta	

Punto de Agua (ID PA)	Tipo de Punto ID	Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá)			Obra más cercana	Distancia Horizontal al eje/perímetro	Abscisa Perímetro (Referencia)	Caudal (l/s) abr-ago-18	Nivel de Afectación	Tipo de Monitoreo	
		E	N	ELEV						A	B
UF1-PA21	Resurgencia	1159616	1308603	2250	Vía a cielo abierto	24	K56+982	0,265	1	OK	
UF1-PA22	Interflujo	1159379	1309509	2306	Vía a cielo abierto	43	K58+416	0,077	2	OK	
UF1-PA23	Interflujo	1159561	1309195	2312	Vía a cielo abierto	65	K57+620	0,219	1	OK	
UF1-PA24	Resurgencia	1159722	1309169	2225	Vía a cielo abierto	79	K57+711	0,903	1	OK	
UF1-PA25	Interflujo	1156797	1308859	2463	ZODME VER 144	≈100	Perímetro	0,624	1	OK	
UF1-PA30	Resurgencia	1156958	1308931	2421	ZODME VER 144	2	Perímetro	0,010	2	OK	
UF1-PA31	Interflujo	1156575	1309824	2432	ZODME VER 148	1	Perímetro	0,000	2	OK	
UF1-PA32	Resurgencia	1155968	1311082	2231	ZODME VER 149	0	Perímetro	0,008	3	OK	
UF1-PA33	Resurgencia	1155961	1311102	2228	ZODMEVER 156	0	Perímetro	0,007	3	OK	
UF1-PA34	Interflujo	1160146	1312162	2094	ZODMEVER 118	77	Perímetro	0,050	1	OK	

Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.67 Piezómetros que integran la red de monitoreo del túnel Pamplona.

ID FINAL	Profundidad perforación (m)	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Fecha	Nivel piezométrico (m)	Tipo de Monitoreo
		E	N	ELEV			A
UF1_PZ01_S14A	40	1159053	1309433	2383	feb-18	Seco	OK
					jun-18	obstruido	
UF1_PZ02_S15A	55	1158920	1309452	2414	may-18	13	OK
					jun-18	15	
UF1_PZ03_S15	23	1159040	1309470	2373	may-18	13	OK
					jun-18	14	
UF1_PZ04_S16	165	1158785	1309386	2522	abr-18	138	OK
					jun-18	88	
UF1_PZ05_S17	224	1158461	1309243	2600	abr-18	77	OK
					jun-18	96	

 Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small>	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA
Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta	

ID FINAL	Profundidad perforación (m)	Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá			Fecha	Nivel piezométrico (m)	Tipo de Monitoreo
		E	N	ELEV			A
UF1_PZ06_S19	115	1158060	1309065	2510	mar-18	50	OK
					may-18	54	
					jun-18	86	
UF1_PZ07_S21A	65	1157810	1309105	2443	jun-18	Seco	OK
UF1_PZ08_S21	30	1157826	1309057	2429	jun-18	Seco	

Fuente: Geodata, 2018

Tabla 5-2.68 Puntos de agua representados por puntos en cursos de aguas superficiales que integran la red de monitoreo de UF1.

ID GDB	ID Punto	Vereda	Municipio	Nombre punto de monitoreo	Nombre de la corriente de agua	Abscisa de referencia	Ubicación Obra	Distancia horizontal al eje de la nueva vía	Este	Norte	Cota m.s.n.m	Monitoreo	
												Tipo A	Tipo B
1	AS_1	Alcaparral	Pamplona	P1-UF1	NN-25	56+200	Vía a cielo abierto.	23,53	1159655	1307925	2162	OK	OK
2	AS_2	Alcaparral	Pamplona	P2-UF1	NN-25-1	56+320		6,87	1159707	1308029	2204	OK	OK
3	AS_3	Alcaparral	Pamplona	P3-UF1	NN-27	56+840		42,95	1159730	1308487	2204	OK	OK
4	AS_4	Alcaparral	Pamplona	P4-UF1	NN-27-1	56+980		76,56	1159717	1308589	2338	OK	OK
6	AS_5	El Naranjo	Pamplona	P6-Quebrada San Antonio	Quebrada San Antonio	53+340		38,74	1160759	1309843	1985	OK	OK
7	AS_6	El Naranjo	Pamplona	P7-Quebrada La Palma	Quebrada La Palma	53+140	-	3,78	1160912	1309972	1978	OK	OK
95	AS_7	Alcaparral	Pamplona	P95-Vertimiento UF2	Rio Pamplonita	56+120	Vía a cielo abierto	77,18	1159722	1307873	2152	OK	OK

Fuente: Geodata, 2018

- **Tipo de puntos y tipo de mediciones (monitoreo tipo B):**

El monitoreo tipo B se hace en afloramientos y en cursos de aguas superficiales. Los parámetros seleccionados, de hidrogeoquímico y bacteriológicos, corresponden con los indicados en la Tabla de resolución 751 de marzo del 2017, emitida por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, los cuales se presentan en la Tabla 5-2.69.

Tabla 5-2.69 Parámetros del monitoreo tipo B según las especificaciones de la Tabla 5 de la Resolución N. 0751 del 2015.

Caracterización	Componente Agua
Física	Temperatura (°C).
	Sólidos suspendidos totales (mg/L), disueltos totales (mg/L), sedimentables (ml/L-h).
	Conductividad eléctrica (uS/cm).
	Potencial de Hidrógeno - pH (unidades de pH).
	Turbiedad (UNn).
Química	Oxígeno disuelto (OD) (mo/L O ₂).
	Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L O ₂).
	Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco (5) días (DBO ₅) 'mg/L O ₂).
	Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).
	Fósforo Total (mg/L P).
	Grasas y aceites (mg/L).
	Alcalinidad Total (mg/L CaCO ₃) y Acidez Total (mg/L CaCO ₃).
	Dureza Cálrica (mg/L CaCO ₃) y Dureza Total (mg/L CaCO ₃).
	Fenoles Totales (mg/L).
	Metales y Metaloides (Arsénico, Bario, Cadmio, Zinc, Cromo, Cobre, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio) (mg/L). *
Biológica	Coliformes totales (NMP/100 ml).
	Coliformes fecales (NMP/100 ml).

Fuente: Tabla 5 Resolución N. 0751 del 2015

Los análisis de calidad de agua deben realizarse a través de laboratorios acreditados por el IDEAM, o la entidad responsable de su acreditación, tanto para la toma de muestras como para el análisis de los parámetros indicados en la Tabla 5-2.69.

5.1.8.13.3 Frecuencia de las mediciones

El monitoreo debería hacerse en el mismo periodo de tiempo para todos los puntos de agua seleccionados, con frecuencia variable de acuerdo con los parámetros a medir:


- i. Con frecuencia mensual hasta trimestral para la medición del caudal y parámetros fisicoquímicos en puntos de agua subsuperficial y subterránea, cursos de aguas superficiales y eventualmente en piezómetros (monitoreo tipo A). Para este último en el caso corresponde la medición del nivel piezométrico/freático con la misma frecuencia indicada.
- ii. Una medición antes del inicio de las obras, durante construcción y después de terminadas las obras para el análisis químico en los puntos de agua seleccionados (monitoreo tipo B). Se debe procurar incluir los dos periodos climáticos más frecuentes de la región.

En la Tabla 5-2.70 se indica para cada punto su relativa frecuencia de medición antes, durante y después de la construcción de la obra. Se aclara que el cronograma del monitoreo previsto está estrechamente ligado al cronograma de construcción de la obra, por lo que el mismo puede ser adaptado o modificado de acuerdo con los cambios que se introduzcan al programa de construcción.

Tabla 5-2.70 Frecuencia de medición red de monitoreo UF1

IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR				Obra más Próxima	Nivel afectación	Usuarios	ANTES DE CONSTRUCCIÓN		DURANTE CONSTRUCCIÓN		OPERACIÓN	
							(1 año, 6 meses o menos)		(Tiempo total construcción UF1)		1 AÑO	
CÓDIGO	TIPO DE PUNTO	E	N	(---)	(---)	(---)	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B
UF1-PA01	Interflujo	1157726	1308915	ZODME 136	2	No	Trimestral		Trimestral		Semestral	
UF1-PA02	Manantial	1158098	1308642	Túnel Pamplona	2	Si	Mensual	Una vez	Mensual	Una vez	Semestral	Una vez
UF1-PA03	Manantial	1158038	1308669	Túnel Pamplona	2	No	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA04	Manantial	1158043	1308721	Túnel Pamplona	2	Si	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA05	Interflujo	1158208	1308883	Túnel Pamplona	2	Si	Mensual	Una vez	Mensual	Una vez	Semestral	Una vez
UF1-PA06	Manantial	1157761	1309240	Túnel Pamplona	2	No	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA07	Manantial	1158323	1309304	Túnel Pamplona	2	Si	Mensual	Una vez	Mensual	Una vez	Semestral	Una vez
UF1-PA08	Interflujo	1158483	1309452	Túnel Pamplona	1	Si	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA09	Resurgencia	1158987	1309630	Túnel Pamplona	1	Si	Mensual	Una vez	Mensual	Una vez	Semestral	Una vez
UF1-PA10	Interflujo	1158862	1309767	Túnel Pamplona	1	Si	Mensual	Una vez	Mensual	Una vez	Semestral	Una vez
UF1-PA12	Resurgencia	1159652	1308983	Vía a cielo abierto	3	Si	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA13	Resurgencia	1159760	1308981	Vía a cielo abierto	1	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
UF1-PA14	Interflujo	1159699	1308813	Vía a cielo abierto	1	Si	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA17	Resurgencia	1159404	1308450	Vía a cielo abierto	1	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
UF1-PA18	Interflujo	1159478	1308071	Vía a cielo abierto	1	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
UF1-PA19	Interflujo	1159096	1309390	Túnel	2	Si	Mensual		Mensual		Semestral	

IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR				Obra más Próxima	Nivel afectación	Usuarios	ANTES DE CONSTRUCCIÓN		DURANTE CONSTRUCCIÓN		OPERACIÓN	
							(1 año, 6 meses o menos)		(Tiempo total construcción UF1)		1 AÑO	
CÓDIGO	TIPO DE PUNTO	E	N	(---)	(---)	(---)	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B
UF1-PA20	Interflujo	1159042	1309370	Túnel	2	Si	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA21	Resurgencia	1159616	1308603	Vía a cielo abierto	1	No	Trimestral		Trimestral		Semestral	
UF1-PA22	Interflujo	1159379	1309509	Vía a cielo abierto	2	S/I	Trimestral		Trimestral		Semestral	
UF1-PA23	Interflujo	1159561	1309195	Vía a cielo abierto	1	S/I	Trimestral		Trimestral		Semestral	
UF1-PA24	Resurgencia	1159722	1309169	Vía a cielo abierto	1	Si	Trimestral		Trimestral		Semestral	
UF1-PA25	Interflujo	1156797	1308859	ZODMEVER 144	1	Si	Trimestral		Trimestral		Semestral	
UF1-PA30	Resurgencia	1156958	1308931	ZODMEVER 144	2	No	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA31	Interflujo	1156575	1309824	ZODMEVER 148	2	No	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA32	Resurgencia	1155968	1311082	ZODMEVER 149	3	No	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA33	Resurgencia	1155961	1311102	ZODMEVER 156	3	No	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1-PA34	Interflujo	1160146	1312162	ZODMEVER 118	1	No	Trimestral		Trimestral		Semestral	
UF1_PZ01	Piezómetro	1159053	1309433	Túnel Pamplona	N/A	N/A	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1_PZ02	Piezómetro	1158920	1309452	Túnel Pamplona	N/A	N/A	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1_PZ03	Piezómetro	1159040	1309470	Túnel Pamplona	N/A	N/A	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1_PZ04	Piezómetro	1158785	1309386	Túnel Pamplona	N/A	N/A	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1_PZ05	Piezómetro	1158461	1309243	Túnel Pamplona	N/A	N/A	Mensual		Mensual		Semestral	

 Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small>	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 1 VARIANTE PAMPLONA CAPITULO 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta
--	--

IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR				Obra más Próxima	Nivel afectación	Usuarios	ANTES DE CONSTRUCCIÓN		DURANTE CONSTRUCCIÓN		OPERACIÓN	
							(1 año, 6 meses o menos)		(Tiempo total construcción UF1)		1 AÑO	
CÓDIGO	TIPO DE PUNTO	E	N	(---)	(---)	(---)	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B	Monitoreo Tipo A	Monitoreo Tipo B
UF1_PZ06	Piezómetro	1158060	1309065	Túnel Pamplona	N/A	N/A	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1_PZ07	Piezómetro	1157810	1309105	Túnel Pamplona	N/A	N/A	Mensual		Mensual		Semestral	
UF1_PZ08	Piezómetro	1157826	1309057	Túnel Pamplona	N/A	N/A	Mensual		Mensual		Semestral	
AS_1	Curso agua superficial	1159655	1307925	N/A	N/A	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
AS_2	Curso agua superficial	1159707	1308029	N/A	N/A	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
AS_3	Curso agua superficial	1159730	1308487	N/A	N/A	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
AS_4	Curso agua superficial	1159717	1308589	N/A	N/A	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
AS_5	Curso agua superficial	1160759	1309843	N/A	N/A	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
AS_6	Curso agua superficial	1160912	1309972	N/A	N/A	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
AS_7	Curso agua superficial	1159722	1307873	N/A	N/A	Si	Trimestral	Una vez	Trimestral	Una vez	Semestral	Una vez
Notas: Monitoreo tipo A (Caudal, parámetros físico-químicos "in situ" y/o nivel piezométrico). Se debe hacer en el período de tiempo que anteceda el inicio de la obra. Lo ideal es que este período fuera un ciclo climático de un año, pero depende de las condiciones propias del proyecto. Monitoreo tipo B (Una medición antes, durante y después de terminadas las obras en la UF1, según indicaciones dadas en la Tabla 5 de la resolución 0751 del 2015 del MADS)												

Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.14 Conclusiones

5.1.8.14.1 Resultado del inventario de puntos de agua

El inventario de puntos de agua realizado en noviembre-diciembre del 2017 con sus respectivas campañas complementarias realizadas durante los meses de abril a agosto del 2018, arrojó los siguientes resultados:

- Fueron identificados un total de 44 puntos de agua naturales en la zona de influencia de la UF1. Los cuales aportan un caudal total de 11,07 l/s (abr/ago_2018).
- Se identificaron 8 puntos de agua antrópicos correspondientes a piezómetros, todos ellos ubicados a lo largo de la traza del túnel pamplona.
- Los puntos de agua naturales inventariados se caracterizan por presentar caudales individuales bajos a muy bajos, todos ellos inferiores a 0,67 l/s. Con excepción de tres puntos que presentan caudales mayores (UF1-P04=1.1l/s, UF1-P09l/s, UF1-P24=0.90l/s).

Los bajos caudales son indicativos de una circulación poco profunda, presente generalmente en los depósitos cuaternarios y en las zonas alteradas y fracturadas del macizo rocoso.

Este hecho es corroborado por los valores de conductividad hidráulica (CE) y bajas concentraciones de sólidos totales disueltos encontrados en la mayoría de los puntos de agua censados, lo cual es un indicativo adicional de la estrecha correlación entre los puntos con la recarga directa del agua de lluvia debido a la poca residencia del agua al interior de los acuíferos.

5.1.8.14.2 Resultado de los análisis hidrogeoquímicos

El agua analizada se clasifica como poco mineralizada u oligomineral, típica de circuitos de flujo rápido, donde el tiempo de residencia del agua en el acuífero es breve, no suficiente para alcanzar el equilibrio de saturación con los minerales que componen la matriz del acuífero, como evidenciado con los índices de saturación menores a 1.

Los resultados de los análisis químicos evidencian que la circulación del agua en el subsuelo se encuentra esencialmente al interior de los depósitos coluviales y substrato rocoso más meteorizado desarrollados a lo largo de las laderas, así como a través de las fracturas que interceptan los macizos rocosos que conforman la Formación Aguardiente, Formación Tibú- Mercedes, Formación Capachos y Formación Girón, permitiendo la mezcla de diferentes flujos entre acuíferos (flujos subsuperficiales y mixtos), con una mayor incidencia de los flujos subsuperficiales alojados principalmente en los depósitos cuaternarios.

5.1.8.14.3 Modelo hidrogeológico conceptual (Túnel y vía a cielo abierto)

Los principales elementos hidrográficos de la zona de influencia de la UF1, lo constituye la Quebrada San Antonio y el Río Pamplonita. Este último representa un límite hidrogeológico

caracterizado morfológicamente por un típico valle intramontano, cuyas laderas actúan como zonas de descarga, hacia las cuales confluye la mayor parte del flujo subsuperficial y subterráneo presente en la zona de estudio.

La principal área de recarga se ubica en la parte alta de la montaña conocida como Cristo Rey; sector donde se emplaza el túnel Pamplona. Esta zona se encuentra bisectada por una falla geológica regional que corre en dirección dominante E-W y constituye el elemento estructural más importante desde el punto de vista hidrogeológico de la zona de estudio, dado que no solamente facilita la infiltración por la depresión intramontana creada, sino que además condiciona los flujos principales en la misma dirección. Este elemento estructural a la vez que controla los flujos subsuperficiales y subterráneos en dirección paralela a su rumbo, al parecer actúa como barrera hidrogeológica en dirección transversa (N-S).

La zona de la montaña Cristo Rey actúa como un área de recarga que alimenta gran parte de los flujos presentes en las laderas ubicadas en la UF1. En este sector nace la quebrada San Antonio.

En la mayor parte de la zona de influencia de la UF1 existe lo que podría llamarse un “acuífero superficial”, fracturado, discontinuo y heterogéneo de limitado interés hidrogeológico; el cual contiene una napa libre y está constituido por depósitos cuaternarios y de alteración del macizo rocoso. Infrayaciendo éste acuífero superficial se encuentran presentes formaciones geológicas de diferentes edades y composición que por sus características intrínsecas se les ha atribuido diferentes comportamientos hidrogeológicos en función de su capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea. En este sentido, la zona de estudio se caracteriza por presentar unidades hidrogeológicas con limitado a ningún interés hidrogeológico.

5.1.8.14.4 Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos presentes en la UF1

De los cinco (5) rangos de vulnerabilidad que contempla el método GOD, aplicado en la valoración realizada, resultan cuatro (4) escenarios probables:

- **Vulnerabilidad Muy baja** (0,0-0,1): Vulnerabilidad Muy Baja: Abarca el 30.68% de la zona y en general son zonas con rocas de baja permeabilidad y pendientes moderadas y altas que impiden una rápida absorción de contaminantes.
- **Vulnerabilidad baja** (0,1-0,3): 64.09% de la zona presenta esta vulnerabilidad y se halla en zonas con pendiente moderadas, terrenos con permeabilidad baja y un nivel freático profundo o moderado por encima de los 40m.
- **Vulnerabilidad Moderada** (0,3-0,5): EL 5.21% de toda la zona se halla con una vulnerabilidad alta, en general corresponde a las zonas menor pendiente además de terrenos con mayor permeabilidad y un nivel freático por encima de los 10 m.
- **Vulnerabilidad Alta** (0,5 -0,7): Esta área corresponde al 0,001 de toda la zona, es un área de solo 92.7m² que intercepta un nivel freático por encima de los 10m, una zona de depósitos con una pendiente suave.

5.1.8.14.5 Riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas.

Una vez analizado el riesgo se encontró que concordantemente con el análisis de vulnerabilidad, la mayor cantidad de la zona presenta una vulnerabilidad muy baja (96.70%) y baja (3.30%) esto se debe especialmente a la presencia de pendientes moderadas y fuertes en la zona.

5.1.8.14.6 Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua relacionados con la vía a cielo abierto y ZODMEs.

Una vez aplicados los criterios para definir el potencial de afectación de los puntos de agua por la presencia de las obras que integran la UF1, se tiene que:

- 26 de los 33 puntos de agua censados resultan con un nivel de afectación igual a 1. Lo que indica que la posibilidad de resultar afectados es muy baja a imperceptible.
- 4 de los 33 puntos de agua censados resultan con un nivel de afectación igual a 2. Lo que indica que la posibilidad de resultar afectados es baja a media.
- 3 de los 33 puntos de agua censados resultan con un nivel de afectación igual a 3. Lo que indica que la posibilidad de resultar afectados es alta a muy alta. Corresponde con puntos de agua ubicados dentro del polígono de intervención de la obra proyectada, uno en el polígono de la vía y dos dentro del polígono de ZODMEs.

5.1.8.14.7 Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua relacionados con el túnel Pamplona aplicando la metodología DHI.

Fueron valoradas mediante la metodología DHI (Draward Hazards Index) las probabilidades de impacto de la excavación del túnel Pamplona sobre los puntos de agua presentes en superficie e identificados mediante los inventarios realizados. La valoración se hizo considerando el túnel como un elemento drenante, es decir, sin tratamiento de inyección del macizo rocoso. El resultado se resume a continuación:

- 4 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 1, es decir, en ellos no se prevé afectación o ésta es despreciable desde el punto de vista probabilístico. Estos puntos representan el 33% del total de puntos relacionados con los túneles del corredor vial.
- 8 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 2, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación baja. Estos puntos representan el 67% del total.
- 0 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 3, es decir, en ningún punto de agua se prevé una probabilidad de afectación alta.

5.1.8.14.8 Medidas de mitigación y compensación.

Fueron definidas medidas específicas de mitigación y/o compensación para los puntos de agua, las cuales se encuentran desarrolladas en las correspondientes fichas de manejo compiladas en el capítulo correspondiente dentro del presente EIA.

5.1.8.14.9 Cálculo del caudal esperado en el túnel Pamplona

La previsión del caudal esperado a corto plazo en el túnel pamplona fue realizada aplicando un enfoque analítico a la sectorización hidrogeológica prevista en el modelo geológico, geomecánico e hidrogeológico de referencia (Anexo 5.1.3.8). Estos valores fueron corroborados a través de las simulaciones numéricas realizadas en el túnel.

Para las condiciones de hidráulicas previstas los caudales específicos esperados a corto plazo indica valores que oscilan entre 0.05 y 2.0 l/s/10m, estos valores pueden llegar a incrementarse en varios órdenes de magnitud si durante la construcción del túnel se interceptan discontinuidades más permeables a las previstas en el estudio.

Al largo plazo, el caudal drenado en el túnel varía en el tiempo hasta estabilizarse después de 10 años, en particular resultan los siguientes valores una vez aplicado al método analítico los resultados del modelo numérico:

- Después de 1 año de excavado el túnel pamplona el caudal total resulta del orden de 23 l/s (caudal total con túnel excavado).
- Después de 5 año de excavado el túnel pamplona el caudal total resulta del orden de 12 l/s (caudal total con túnel excavado).
- Después de 10 año de excavado el túnel pamplona el caudal total resulta del orden de 8 l/s (caudal total con túnel excavado).

5.1.8.14.10 Zonas potencialmente críticas hidrogeológicamente en el túnel Pamplona

Corresponde con los sectores de excavación del túnel Pamplona en los cuales, de acuerdo con el modelo geológico, geomecánico e hidrogeológico se prevé la presencia de zonas de fallas, zonas más fracturadas y/o zonas de mayor permeabilidad del macizo rocoso a través de las cuales se pueden conectar el túnel con la superficie. Estas zonas son las indicadas en la tabla 5-2.71.

Tabla 5-2.71 Tramos de túnel caracterizados por presentar zonas de fallas y/o zonas de mayor fracturación y/o zonas de mayor permeabilidad."

PK Inicial	PK Final	Longitud Tramo	Cobertura
(m)	(m)	(m)	(m)
K58+745,00	K58+890,00	145	<=50
K59+450,00	K59+480,00	30	>50 (210m)
K59+610,00	K59+640,00	30	>50 (201m)
K59+640,00	K59+756,00	116	>50 (176m)
K59+912,00	K59+940,00	28	<=50

Fuente: Geodata, 2018

5.1.8.14.11 Modelo numérico del flujo subsuperficial y subterráneo presente en el túnel Pamplona

Los análisis realizados a través de la modelación numérica se han llevado a cabo teniendo en cuenta una serie de modelos 2D en régimen permanente utilizando el módulo de cálculo de elementos finitos FEFLOW (versión 7.0.4) y considerando las condiciones hidrogeológicas más representativas que se prevé serán encontradas durante la excavación del túnel Pamplona.

Para todos los casos considerados, el modelo numérico muestra que la perturbación de los flujos inducidos por el túnel determina el drenaje del circuito en roca y la despresurización del sistema de equilibrio existente entre el nivel piezométrico profundo y el consecuente drenaje descendente también de los circuitos más superficiales que dada la estratificación de la permeabilidad no permanecen completamente aislados respecto a los circuitos en roca.

Por lo que la permanencia de los puntos de agua inventariados en la zona de influencia del túnel Pamplona, bajo la acción drenante de la obra subterránea, dependerá de la permeabilidad de los horizontes arcillosos y limosos que constituye el lecho confinante de los flujos subsuperficiales que los alimentan. Considerando una permeabilidad entre $1E-9$ y $1E-8$, los circuitos subsuperficiales son puestos en riesgo por la despresurización del acuífero en roca evidenciando una mínima dependencia entre los flujos profundos y aquellos subsuperficiales. Si se asume una permeabilidad menor, del orden de $1E-10$ m/s o inferior para todo el lecho arcilloso confinante, los flujos subsuperficiales no sufrirán alteraciones por el descenso de la napa profunda, indicando una sustancial independencia de los circuitos más profundos interceptados por el túnel.

5.1.8.14.12 Red de monitoreo

Se propone una red de monitoreo representativa de la **calidad y cantidad** de agua superficial, subsuperficial, y subterránea presente a lo largo de la Unidad Funcional 1 (UF1). Con los puntos de agua seleccionados se pretende monitorear las variaciones de caudal del agua superficial, subsuperficial y subterránea, así como la evolución de sus parámetros fisicoquímicos in situ (conductividad eléctrica, temperatura, pH) y de calidad (parámetros hidrogequímicos).

Fueron seleccionados un total de 42 puntos representados así:

- 27 puntos de agua (PA)
- 8 piezómetros (PZ)
- 7 puntos sobre cursos de aguas superficiales (AS).

Se propone dar inicio a este monitoreo antes del comienzo de las excavaciones de las obras, continuarlo durante su fase constructiva y como mínimo durante un año después de terminada la construcción de la UF1.

5.1.8.15 Recomendaciones

Se recomienda instrumentar los siguientes piezómetros con dispositivos tipo Divers con el propósito de obtener mediciones continuas del nivel piezométrico antes, durante y después de la construcción del túnel.

- UF1-PZ02-S15A
- UF1-PZ03-S15
- UF1-PZ04-S16
- UF1-PZ05-S17
- UF1-PZ06-S19

Del mismo modo se recomienda instalar:

- Dos piezómetros nuevos en la parte alta de la naciente Cristo Rey, entre los puntos de agua UF1-PA07 y UF1-PA08, a profundidades diferentes. Se recomienda que uno de ellos alcance máximo 30 m de profundidad (ranurado desde el fondo hasta cerca de la superficie) y el otro por lo menos 90 m de profundidad (ranurado sólo en la parte inferior, aprox. 16 m).
- Tres estaciones pluviométricas en grado de medir precipitación y temperatura, para ser localizadas 1+1 en inmediaciones a cada portal y la restante en la zona alta de Cristo Rey, cerca de la bocatoma homónima.

Durante la construcción del túnel se recomienda, por cada frente de excavación, realizar un número representativo de ensayos de permeabilidad a través de las perforaciones realizadas, medir el caudal de infiltración presente y sus parámetros físico químicos in situ (conductividad, pH, temperatura, ORP) y clasificar geomecánicamente el macizo rocoso o terreno encontrado (p.e. utilizando RMR, Q). Mientras que, en superficie, se recomienda, realizar simultáneamente el monitoreo previsto en los puntos de agua y cursos de aguas superficiales que integran la red de monitoreo.

Se recomienda que todos los datos recopilados sean analizados inicialmente cada 50 m de túnel excavado; esto con el objeto de retroalimentar las previsiones realizadas en los estudios hidrogeológicos, particularmente en lo que respecta a la actualización del caudal crítico.

5.1.8.16 Referencias bibliográficas

AFTES, 1992. Recomendations for a description of rock masses useful for examining the stability of the underground works, Working group n°1 geology-geotechnical engineering, Manager M. Panet.

AFTES GT32-2 (2012). Recommandation de l'AFTES n° GT32.R2F1 - Recommandations sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, Tunnels et espace souterrain, 274-314.

ALBERTS C. and Gustafson G. (1983). Undermarksbyggande i svagt berg- 4 Vattenproblem

och tättningsåtgärder, in BeFo.

ANAGNOSTOU, G. (1995). "The Influence of Tunnel Excavation on the hydraulic head", International Journal for numerical and analytical method in geomechanics, Vol 19, 725-746.

APPELO C.A.J. & Postma D. (2006). Geochemistry, groundwater and pollution. Second edition.

BARAZZUOLI P., Costantini A., Grassi S., Lazzarotto A., Micheluccini M., Piantelli F., Salleolini M., Sandrelli F., Squarci p., Taffi L., Veronesi G., 1987. L'energia geotermica in provincia di Siena. Amministrazione provinciale di Siena.

BAUDUCCO F., De Luca D. A., Dematteis A., Masciocco L. (1992). La valutazione delle potenzialità idriche di un bacino alpino: l'esempio della Valle Varaita, Il Conv. Naz. Giov. Ric. Geol. Appl., Viterbo.

BERESNEV, I.A., Hruby, C., Davis, C. (2002) "Exploration Geophysics". Journal of Applied Geophysics, 49. 245-254.

BIANCHI, G.W., Perello, P., Venturini, G. & Dematteis, A., 2009. Determination of reliability in geological forecasting for Túnel projects: The method of the R-index and its application on two case studies. WTC 2009, Proceedings of the ITA-AITES World Túnel Congress, Budapest. Castilla Gomez, Jorge, Herrera Herbert Juan (2012). El proceso de exploración minera mediante sondeos. E.T.S. De ingenieros de minas de Madrid. Madrid 2012.

COLOMBETTI A. & Mattioli M., 1991. Calcolo del deflusso in un bacino idrografico con metodo indiretto. Un esempio nel bacino del fiume Panaro. *Riun. Giov. Ric. Geol. Appl. Milano*.

CUSTODIO, E. (1983) Hidráulica de captaciones de agua subterránea. En: Hidrología Subterránea. Pp 969-981. Custodio, E. y M.R Llamas (Eds). Omega, 2 tomos, 2350 pp.

DE MARTONNE E., 1926. Une nouvelle function climatologique: l'indice de aridité. La meteorologie, 449-458.

DEMANET, D., Pirard, E., RenardY, F., Jongmans, D. (2001). Application and processing of geophysical images for mapping faults. Computers & Geosciences 27. 1031-1037.

DEMATTEIS A., Kalamaras G., Eusebio A., 2001. A System Approach for Evaluating Springs Drawdown Due to Túneling. AITES/ITA World Túnel Congress 2001 (Milan, 9-12 june 2001), Accepted.

EPA (1993). Suggested Operating Procedures for Aquifer Pumping Tests.

E Preziosi • G Giuliano •R Vivona, (2010) Natural background levels and threshold values derivation for naturally As, V and F rich groundwater bodies: a methodological case study in

Central Italy. Environ Earth Sci, 61:885–897 DOI 10.1007/s12665-009-0404-y

FOSTER, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. and Paris, M., 2002. Groundwater Quality Protection: a Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies. World Bank Publication, Washington D.C., USA, 103 pp.

FOSTER, S.S.D., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: W.v. Duijvenbooden and H.G.v. Waegeningh (Editors), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Noordwijk, The Netherlands, pp. 69-86.

GALLIPOLI M.R., Lapenna V., Lorenzo P., Mucciarelli M., Perrone A., Piscitelli S., Sdao F. (2000). Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy.

GOODMAN R. E., Moya D. G., Van Schalkwyk A. Y Javandel I. (1965). Ground water inflows during Túnel driving, *Eng. Geology* 2, no. 1: 39-56.

http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/wasser/Grundwasser/conference/Presentations/22_pm_11_A_Blum.pdf

IDEAM, 2011. Marco conceptual y metodológico para las evaluaciones regionales del agua. Informe final: Contrato IDEAM No 035 de 2011.

INGEOMINAS Mapa geológico Plancha 147 Medellín Oriental, escala 1: 50.000, memoria explicativa. Bogotá: Ingeominas, 2005. 314 p.

JACOB C. (1947) – Drawdown test to determine effective radius of artesian well. American Society of Civil Engineers, Transactions 112 (Paper 2321), pp 1047-1064.

JIMÉNEZ SALAS, J.A; J.L. De Justo Y A.A Serrano (1981). Geotecnia y Cimientos II: Mecánica del suelo y de las rocas. Ed Rueda, 1188 pp.

KENNESSEY B., 1930. Lefolyasi ténnyezok és retencik. *Vizugy*, Kuziemények.

MOLINERO J., Samper J., Juanes R., (2002). "Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks", *Engineering Geology* 64, 369-386, (2002).

Meybeck, M. (1987) Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River Dissolved. *American Journal of Science*, 287, 401-428.

NORWEGIAN TÚNELLING SOCIETY (2011) - Rock Mass Grouting in Norwegian Túneling. Publication No. 20, 105 pp.

Organización Meteorológica Mundial, 1994. Guía de prácticas hidrogeológicas. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. Quinta edición.

PERROCHET P., Dematteis A. "Modeling transient discharge into a tunnel drilled in a

heterogeneous formation”, ground water 45, No. 6: 786-790. (2005).

PIPER, A.M. (1953). A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis. Washington D.C.

RAYMER J. INGEO TÚNELES Libro 15 (2008). Estimación de la afluencia de agua en túneles en roca dura – el problema de la permeabilidad: Carlos López Jimeno, Madrid.

STRAHLER A. N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Geological Society of America Bulletin* 63 (11): 1117-1142.

THEIS C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 2, pp 519-524.

TORRI, R., Dematteis, A. (2007). “Drawdown hazard of springs and wells in Túneling: predictive model and verification” *Proc. XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems*, Lisbon 17-21 Sept. 2007, 10 pp.

TURC, L., 1954. Le bilan d’eau des sols. Relation entre la précipitation, l’évaporation et l’écoulement. *Ann. Agron.* 5, 491-569.