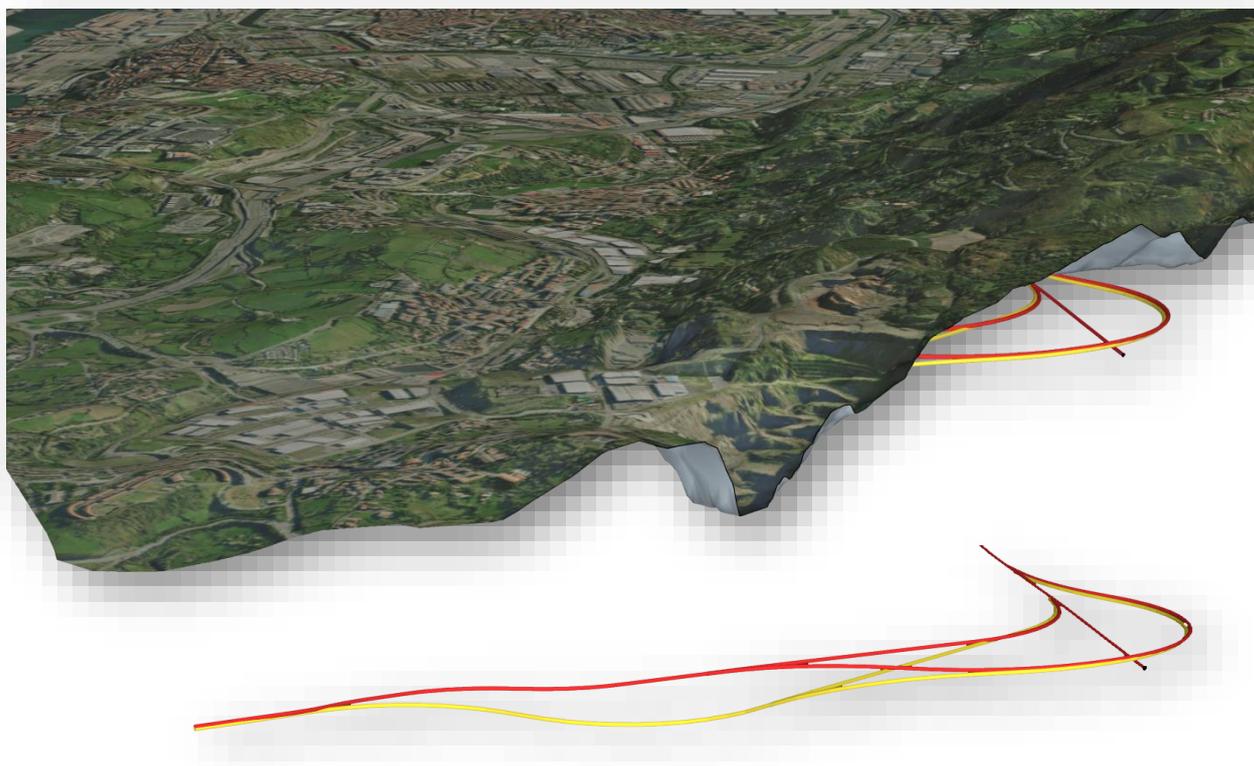


## NOTA TÉCNICA

### ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE FLUJO EN LOS TÚNELES, CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA Y ANÁLISIS DE POSIBLES AFECCIONES A APROVECHAMIENTOS DE AGUA EN LA ALTERNATIVA B DE ORTUUELLA



Enero 2021

SERVICIO DE APOYO PARA LA AMPLIACION Y SEGUIMIENTO DEL ESTUDIO HIDROGEOLOGICO  
DE LA VARIANTE SUR FERROVIARIA DE BILBAO FASE1 (Expediente nº P20019345)

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA</b> .....	<b>5</b>
<b>3. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE PERMEABILIDAD</b> .....	<b>9</b>
<b>4. PIEZOMETRÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO</b> .....	<b>33</b>
<b>5. ESTIMACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE GOODMAN (1965)</b> .....	<b>36</b>
<b>6. PARÁMETROS DEL TÚNEL</b> .....	<b>39</b>
<b>7. ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN LOS TÚNELES ALTERNATIVA A</b> .....	<b>42</b>
7.1. TÚNEL DE ARGALARIO .....	42
7.2. TRONCO DEL RAMAL SERANTES .....	43
7.3. EJE DE CONEXIÓN RAMAL SERANTES 1 (RAMAL NORTE).....	44
7.4. EJE DE CONEXIÓN RAMAL SERANTES 2 (RAMAL SUR) .....	44
<b>8. ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN LOS TÚNELES ALTERNATIVA B</b> .....	<b>46</b>
8.1. TRONCO DEL RAMAL SERANTES ALTERNATIVA B.....	46
8.2. EJE DE CONEXIÓN RAMAL SERANTES 1 (RAMAL NORTE).....	46
8.3. EJE DE CONEXIÓN RAMAL SERANTES 2 (RAMAL SUR) .....	47
<b>9. SÍNTESIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
<b>10. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA</b> .....	<b>51</b>
10.1. CARACTERIZACIÓN MEDIANTE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS IN SITU ...	51
10.2. CARACTERIZACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS QUÍMICOS EN LABORATORIO.....	56
<b>11. ANÁLISIS DE POSIBLES AFECCIONES A PROVECHAMIENTOS DE AGUA</b> .....	<b>64</b>
<b>12. CONCLUSIONES</b> .....	<b>66</b>
12.1. CONCLUSIONES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN LOS TÚNELES..	66
12.2. CONCLUSIONES SOBRE EL QUIMISMO DE LAS AGUAS.....	67
12.3. CONCLUSIONES SOBRE AFECCIONES A APROVECHAMIENTOS DE AGUA.....	68

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Alternativas 1 y 2 (traza común) en el entorno de Ortuella .....	5
<b>Figura 2:</b> Alternativa B en el entorno de Ortuella (difuminada alternativa A ).....	6
<b>Figura 3:</b> Alternativa B en el entorno de Ortuella sobre base geológica .....	7
<b>Figura 4:</b> Ramales Norte y Sur de la alternativa B sobre base geológica .....	8
<b>Figura 5:</b> Recopilación de permeabilidades según litologías .....	11
<b>Figura 6:</b> Recopilación de permeabilidades según litologías y profundidades .....	11
<b>Figura 7:</b> Ubicación de los ensayos de bombeo en la evolución piezométrica del punto PB-15 (pozo de bombeo) y marco pluviométrico (año 2019).....	12
<b>Figura 8:</b> Correlación entre permeabilidad y profundidad del Ensayo Lugeon .....	12
<b>Figura 9:</b> Permeabilidades obtenidas en ensayos realizados en zonas someras y profundas de sondeos.....	13
<b>Figura 10:</b> Puntos de control de piezometría en la Fase 1 (en rojo inoperativos) .....	15
<b>Figura 11:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo TB-2.....	16
<b>Figura 12:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo TB-2 (arriba tramo 60-65m y abajo tramo 100-105m).....	16
<b>Figura 13:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo TB-3.....	17
<b>Figura 14:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo TB-6.....	17
<b>Figura 15:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo TB-6.....	18
<b>Figura 16:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo TB-6.....	18
<b>Figura 17:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo BB-1 .....	19
<b>Figura 18:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo BB-1.....	19
<b>Figura 19:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo BB-4 .....	20
<b>Figura 20:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo BB-4.....	20
<b>Figura 21:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-4 (tramo 115-120).....	21
<b>Figura 22:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-4 (tramo 145.5-150.5).....	21
<b>Figura 23:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo TB-4 (arriba tramo 115-120m y abajo tramo 145.5-150.5m).....	22
<b>Figura 24:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-5 (tramo 125-130).....	22
<b>Figura 25:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-5 (tramo 137-142).....	23
<b>Figura 26:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo OT-5 (arriba tramo 125-130m y abajo tramo 137-142m).....	23
<b>Figura 27:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-6 (izquierda tramo 129-134m, derecha tramo 141-146m).....	24
<b>Figura 28:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo OT-6 (arriba tramo 129-134m y abajo tramo 141-146m).....	24
<b>Figura 29:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo SPZ-1 (izquierda tramo 30-34.75, derecha tramo 45-50) .....	25
<b>Figura 30:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo SPZ-1 en calizas (tramo 58-62.80) .....	25
<b>Figura 31:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo SPZ-1 (arriba tramo 30-34.75, centro tramo 45-50, abajo tramo 58-62.80) .....	26
<b>Figura 32:</b> Sondeo SPZ-2 en ejecución.....	27
<b>Figura 33:</b> Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo SPZ-2 (izquierda ensayo 10-13.75m, derecha ensayo 25-28.75m) .....	27
<b>Figura 34:</b> Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo SPZ-2 (arriba tramo 10-13.75, abajo tramo 25-28.75).....	28
<b>Figura 35:</b> Ensayo de infiltración con el sondeo a 12.50 m.....	29
<b>Figura 36:</b> Ensayo de infiltración con el sondeo a 33.30 m.....	29
<b>Figura 37:</b> Ensayo de infiltración con el sondeo a 40.80 m.....	30
<b>Figura 38:</b> Puntos de control de piezometría en la Fase 1 (en rojo inoperativos) .....	33
<b>Figura 39:</b> Isopiezas generada a partir de la piezometría considerada .....	34
<b>Figura 40:</b> Detalle de la piezometría del sector de Ortuella (alternativa B, isopiezas cada 20 m).....	35
<b>Figura 41:</b> Análisis de la influencia en el caudal resultante por la proximidad de la carga al radio del túnel .....	37

<b>Figura 42:</b> Análisis de la influencia en el caudal resultante por la proximidad de la carga al radio del túnel según dos cálculos diferentes .....	38
<b>Figura 43:</b> Cotas de rasante en puntos altos y bajos de la alternativa B .....	40
<b>Figura 44:</b> Perfil de la galería de drenaje de Bodovalle (EVE) .....	40
<b>Figura 45:</b> Puntos de mayor cota en los ramales Norte y Sur de la Alternativa A .....	41
<b>Figura 46:</b> Perfil del túnel de Argalarío .....	42
<b>Figura 47:</b> Arquetas de drenaje de los túneles de Argalarío (sentido Guipúzcoa a la izquierda y sentido Cantabria a la derecha) .....	43
<b>Figura 48:</b> Perfil del Ramal de Serantes .....	43
<b>Figura 49:</b> Perfil del eje de conexión Serantes 1 (Ramal Norte) .....	44
<b>Figura 50:</b> Perfil del eje de conexión Serantes 2 (Ramal Sur) .....	45
<b>Figura 51:</b> Perfil del Ramal de Serantes .....	46
<b>Figura 52:</b> Perfil del eje de conexión Serantes 1 (Ramal Norte) .....	47
<b>Figura 53:</b> Perfil del eje de conexión Serantes 2 (Ramal Sur) .....	48
<b>Figura 54:</b> Síntesis de caudales de drenaje obtenidos para la alternativa 3 .....	49
<b>Figura 55:</b> Comparativa de perfiles en el Ramal Sur entre la alternativa A (izquierda) y alternativa B (derecha).....	50
<b>Figura 56:</b> Medidas de conductividad realizadas in situ en la zona .....	52
<b>Figura 57:</b> Medidas de pH realizadas in situ en la zona .....	53
<b>Figura 58:</b> Evolución del pH (izquierda) y conductividad (derecha) frente a la temperatura en el sondeo OT-7.....	53
<b>Figura 55:</b> Medidas de Temperatura realizadas in situ en la zona.....	54
<b>Figura 56:</b> Medidas de Eh realizadas in situ en la zona.....	55
<b>Figura 61:</b> Diagrama de Stiff y escala representada .....	58
<b>Figura 62:</b> Diagramas de Stiff de las muestras analizadas (sobre ortofoto) .....	58
<b>Figura 59:</b> Diagramas de Stiff de las muestras analizadas (sobre base geológica) .....	59
<b>Figura 64:</b> Cauce de drenaje de Larreineta con 3.61 l/s (izquierda) y Galería Parkotxa de Peña Mora (derecha) .....	60
<b>Figura 65:</b> Diagrama de Piper-Hill-Langelier para las muestras analizadas .....	61
<b>Figura 66:</b> Contenido en Nitratos en las muestras analizadas .....	62
<b>Figura 63:</b> Contenido en Zinc, Manganeso y Hierro en las muestras analizadas .....	62
<b>Figura 68:</b> Contenido en Niquel, Cobre y Litio en las muestras analizadas .....	63
<b>Figura 69:</b> Contenido en Bario, Boro y Selenio en las muestras analizadas.....	63
<b>Figura 70:</b> Aspecto actual de la zona en la que se ubica la Fuente de la Calera .....	64
<b>Figura 71:</b> Detalle del cauce proveniente de Orconera antes de caer (detalle cascada) al río Granada .....	65
<b>Figura 72:</b> Aprovechamientos de agua en la zona .....	65

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como intención hacer una estimación preliminar de los caudales previsible en los túneles de la alternativa B de Ortuella, en base a parámetros conocidos o asimilables de otros estudios, así como las características hidroquímicas del agua, dado que estas finalmente serán evacuadas hacia cauces.

Todo ello se realiza en el marco de los trabajos que se vienen realizando dentro del "Servicio de apoyo para la ampliación y seguimiento del estudio hidrogeológico de la variante sur ferroviaria de Bilbao (Fase1)". En este estudio, se obtendrán nuevos parámetros que permitirán "afinar" los resultados preliminares obtenidos.

Es necesario tener en cuenta que ciertos parámetros que se manejan, presentan gran complejidad:

- La permeabilidad del medio es un dato clave. Generalmente se dispone de datos puntuales (sondeos) a profundidades concretas y son ensayos de escasa duración (Lugeon).
- El papel de fracturas en profundidad es un gran desconocido. Muchas de estas fracturas pueden estar selladas, pero se conocen casos de fallas que favorecen la circulación de agua y suponen caudales superiores a los previstos en túneles (Túnel de Larraskitu en la Variante Sur Metropolitana).
- Existen formaciones como las calizas, en las que la permeabilidad puede ser muy superior, pero no necesariamente se encuentran saturadas en agua, sino que producen cargas y descargas repentinas (como es el caso del Túnel de Arraiz en la Variante Sur Metropolitana). Estos materiales pueden generar problemas puntuales importantes y por lo tanto se debe prestar especial atención en ellos.
- La piezometría es variable, por lo que las cargas sobre los túneles también lo son, y finalmente los caudales de drenaje.
- Finalmente, la ejecución de un túnel genera un caudal de drenaje que evoluciona con el tiempo hasta llegar a una estabilización final, por lo que previsiblemente los caudales durante la ejecución del túnel serán muy superiores a los finales (régimen permanente). Es objeto de el Estudio Hidrogeológico determinar estos caudales, los tiempos necesarios para la estabilización y los caudales finales en régimen permanente.

Se describen a continuación los resultados obtenidos para los cuales ha sido necesario realizar una campaña de piezometría y una campaña de muestreo hidroquímico con análisis en laboratorio.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA

El presente trabajo se centra en una variante a los tramos próximos a Ortuella de las alternativas 1 y 2 (Figura 1):

- Ramal Serantes (Tronco). Tras la salida del túnel de Serantes, la traza discurre en trinchera hasta embocar en túnel en el barrio de Bañales.
- Eje conexión Serantes 1 (ó Ramal Norte). Ramal en sentido Bilbao que discurre bajo Orconera para conectar con el ramal Serantes-Olabeaga.
- Eje conexión Serantes 2 (ó Ramal Sur). Ramal de vuelta desde el ramal Serantes-Olabeaga que rodea Orconera para conectar con el Ramal Serantes, junto con el Ramal Norte.

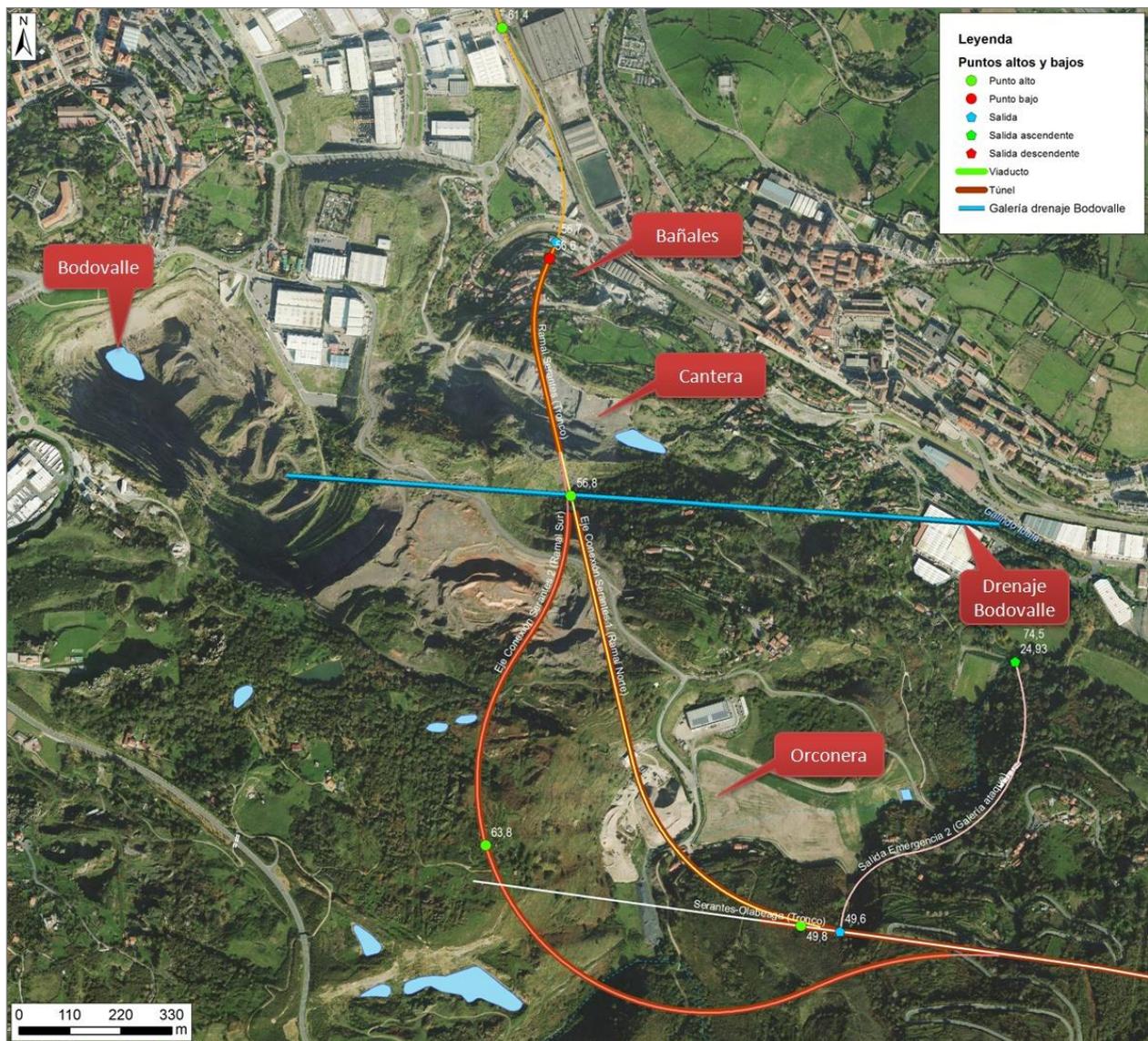


Figura 1: Alternativas 1 y 2 (traza común) en el entorno de Ortuella

Estos ramales son comunes en la alternativa 1 y 2, hasta conectar con el ramal de Serantes-Olabeaga.

Dado que la traza atraviesa bajo la cantera de Saugal, se ha planteado una alternativa que evite la cantera y sus futuros proyectos. Para ello ha sido necesario desviar la traza rodeando la cantera por el Oeste y evitando la corta de Bodovalle, incluyendo un cambio de emboquille del túnel, que se desplaza hacia el Oeste (Figura 2).

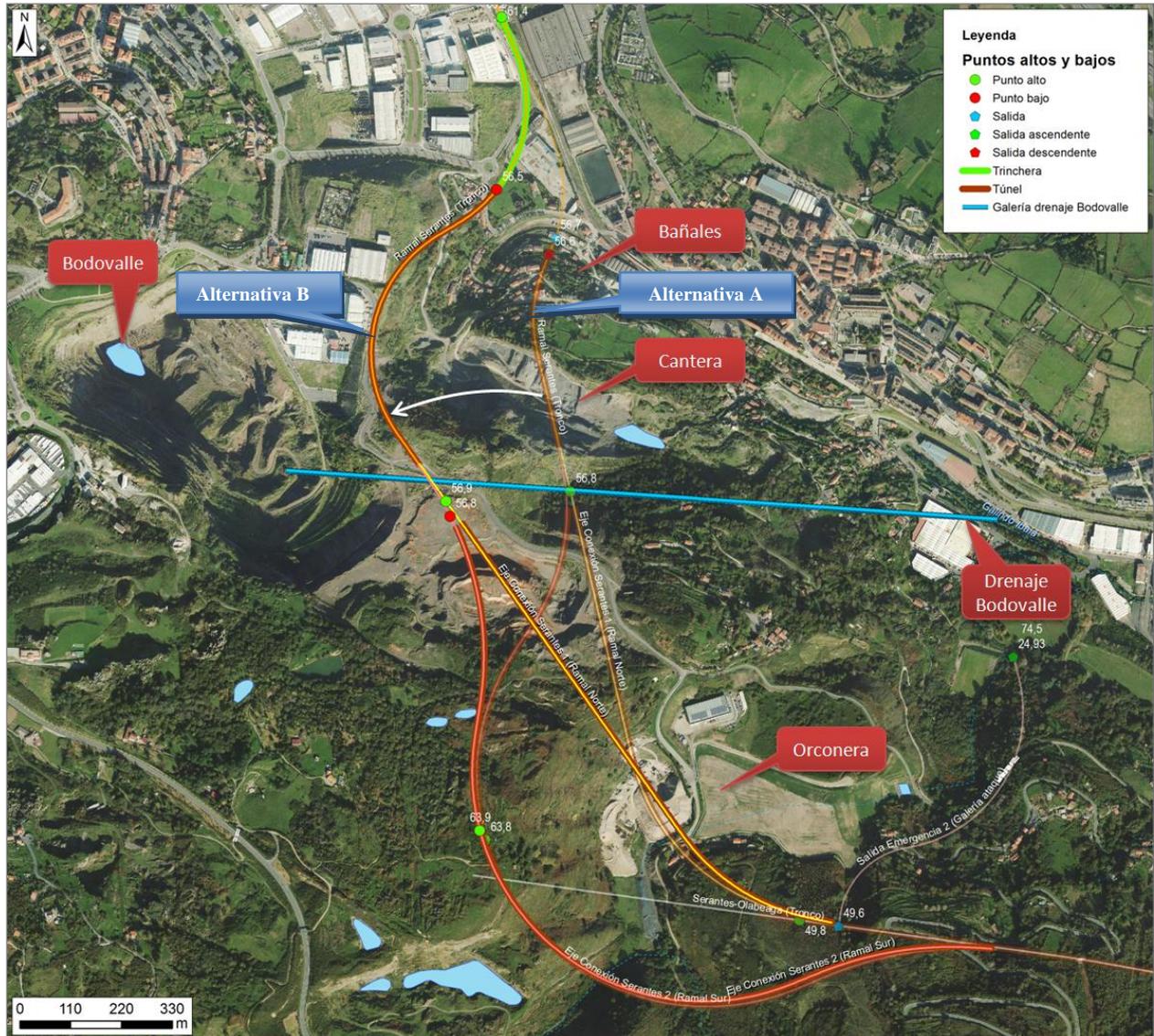


Figura 2: Alternativa B en el entorno de Ortuella (difuminada alternativa A)

Desde el punto de vista geológico, la nueva alternativa no difiere excesivamente dado que las formaciones y estructuras se prolongan hacia el NO (Figura 3).

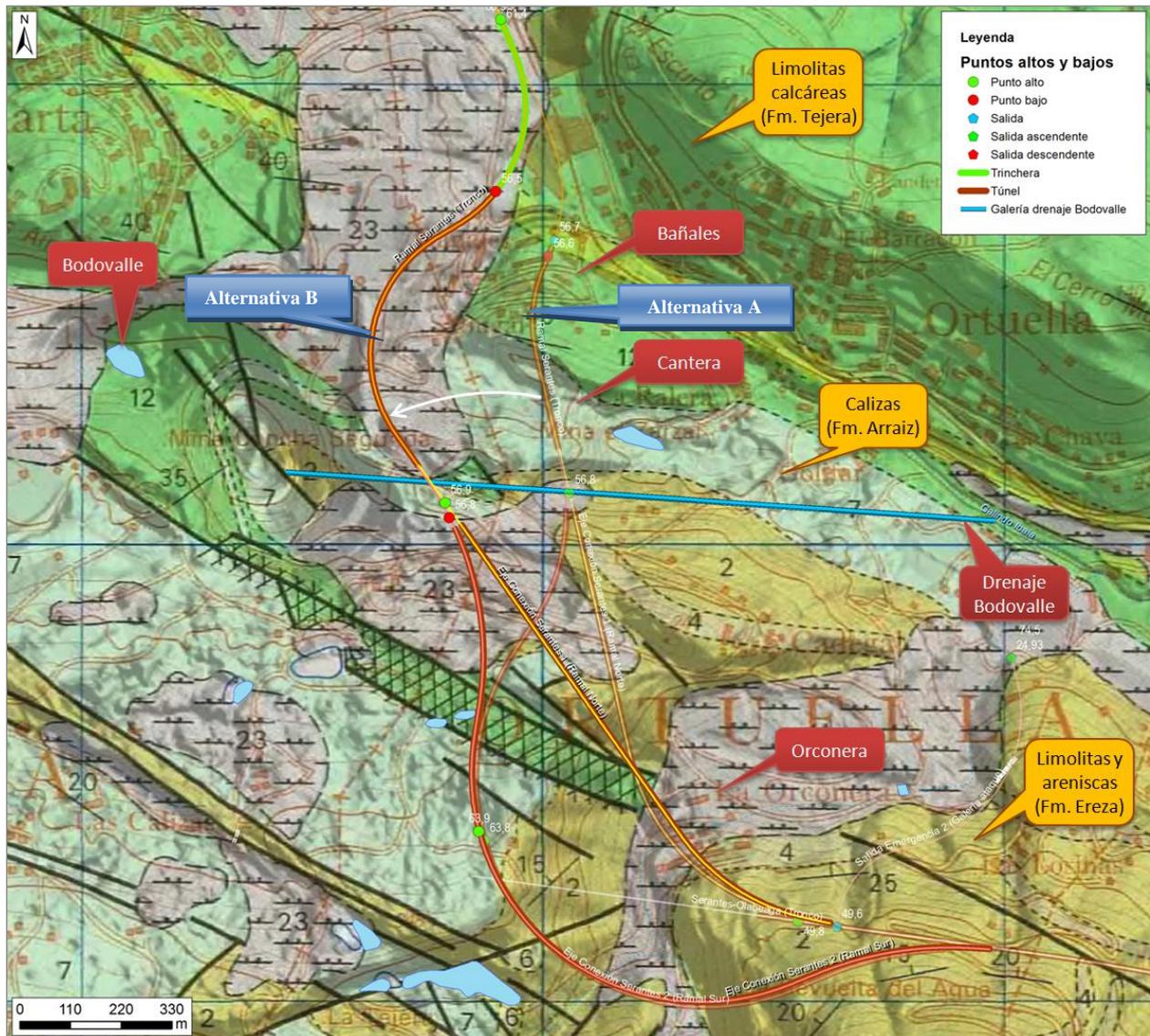


Figura 3: Alternativa B en el entorno de Ortuella sobre base geológica

Las principales características de los tramos de la alternativa B son las siguientes:

- Ramal Serantes (Tronco). Se inicia en trinchera hasta el emboquille en el barrio de Bañales. El punto de menor cota es el propio emboquille, por lo que el agua de drenaje saldrá por esta boca a cota 56.5 msnm. Desde este punto se inicia un ascenso en el que se atravesarán calizas, llegando a cota 56.9 msnm, en donde se conecta con los ramales Norte y Sur.
- Eje conexión Serantes 1 (ó Ramal Norte). Se prolonga a partir del Ramal Serantes manteniendo pendiente durante 100 m hasta la cota 56,93 msnm. A partir de aquí desciende hasta conectar con el ramal Serantes-Olabeara a cota 49,6 msnm, punto al cual se dirigirá el flujo de drenaje.
- Eje conexión Serantes 2 (ó Ramal Sur). Se prolonga a partir del Ramal Serantes con pendiente ascendente hasta el PK 1+300 (sentido inverso) a cota 63,9 msnm, en calizas, que actúa como divisoria de drenaje (zona de mayor cota de rasante). A partir de este punto comienza pendiente

descendente hasta conectar con el ramal Serantes-Olabeaga a cota 48,4 msnm. En el primer tramo ascendente se atraviesa una zona tectonizada en la que el caudal de drenaje se encaminará hacia Ortuella (Figura 4).

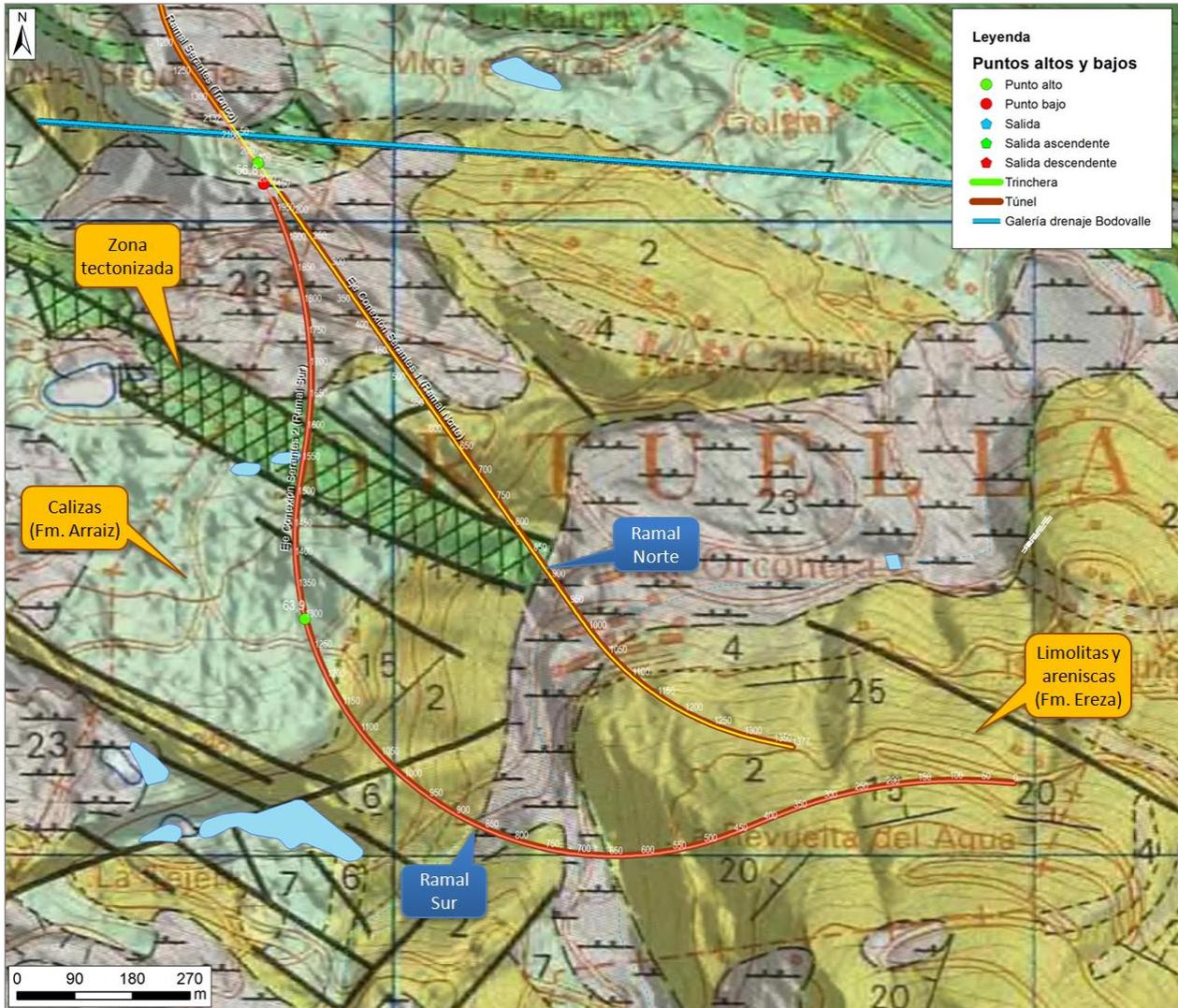


Figura 4: Ramales Norte y Sur de la alternativa B sobre base geológica

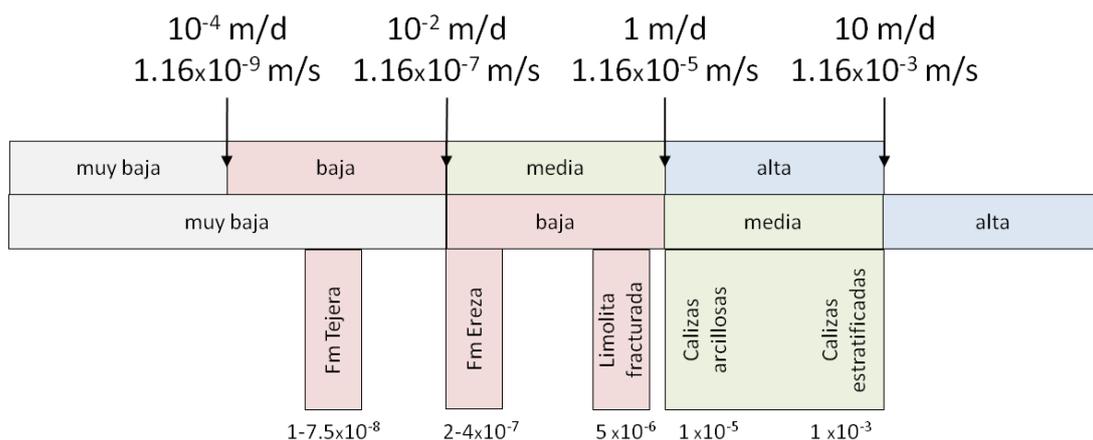
### 3. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE PERMEABILIDAD

Son numerosos los datos existentes en bibliografía y estudios previos, pero la inmensa mayoría de ellos se basan en ensayos puntuales (Lugeon).

El EVE (Ente Vasco de Energía) lleva a cabo una asignación de permeabilidades para los materiales del Dominio de la Plataforma Alavesa-Anticlinorio de Bilbao, marco en el que se encuadra la Variante Sur Ferroviaria:

Permeabilidad relativa	Rango valores		Litología	Observaciones
	m/día	m/s		
Alta	$K \geq 1$	$K \geq 1.16 \times 10^{-5}$	Calizas arrecifales, calcarenitas y brechas.	Las calizas arrecifales son las que presentan una mayor extensión de afloramiento.
Media	$1 > K \geq 10^{-2}$	$1.16 \times 10^{-5} > K \geq 1.16 \times 10^{-7}$	Calcarenitas y margocalizas.	Materiales carbonatados y detríticos asociados a las calizas arrecifales.
Baja	$10^{-2} > K \geq 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-7} > K \geq 1.16 \times 10^{-9}$	Materiales de tipo arenoso - lutítico, materiales margosos y materiales volcánicos	Las areniscas y lutitas del Albiense son las que presentan una mayor extensión de afloramiento
Muy baja	$K < 10^{-4}$	$K < 1.16 \times 10^{-9}$	Materiales de tipo lutítico	Ocupan una amplia extensión del dominio

Esta clasificación difiere levemente de clasificaciones clásicas, si bien depende mucho de las características de los materiales:



Existen numerosos datos de permeabilidad procedentes de ensayos puntuales realizados en sondeos (Lugeon). Algunos ejemplos son los siguientes:

Proyecto	Litología	Permeabilidad (cm/s)
Proyecto de Construcción de la Infraestructura de la Fase I de la Variante Sur Metropolitana. Tramo 4: Trapagarán-Gorostiza (DAIR, FULCRUM GEOCONSULT IDOM, 2006)	Areniscas carbonatadas	Entre $1.90 \times 10^{-7}$ y $6.60 \times 10^{-6}$ con un caso de $1.31 \times 10^{-5}$
	Limolitas negras	Entre $6.60 \times 10^{-6}$ y $4.10 \times 10^{-5}$
	Limolitas negras muy fracturadas	$5.50 \times 10^{-4}$
ESTUDIO INFORMATIVO VARIANTE SUR FERROVIARIA FASE I. TRAMO: BARAKALDO-BILBAO (TEAM 2017-2018)	Areniscas	$8.37 \times 10^{-5}$ (BB-4)*
	Limolitas	$7.43 \times 10^{-6}$ (BB-1)
ESTUDIO INFORMATIVO VARIANTE SUR FERROVIARIA FASE I. TRAMO: TRAPAGARAN-BARAKALDO (TEAM 2017-2018)	Limolitas	$6.95 \times 10^{-6}$ (TB-2) $1.11 \times 10^{-4}$ (TB-3)**
	Areniscas	$4.26 \times 10^{-6}$ (TB-2) - $2.72 \times 10^{-5}$ (TB-6)* - $1.69 \times 10^{-5}$ (TB-4)***
ESTUDIO INFORMATIVO VARIANTE SUR FERROVIARIA FASE I. TRAMO: ORTUELLA-TRAPAGARAN (LKS 2017-2018)	Areniscas calcáreas	$1.89 \times 10^{-6}$ (OT-6) - $6.55 \times 10^{-5}$ (OT-5)*
	Brecha dolomítica	$5.45 \times 10^{-6}$ (OT-5)*

\*Dato corregido en tabla de Estudio Hidrogeológico (figura como cm/s y son m/s)

\*\*Dato aparentemente anómalo

\*\*\* Dato no localizado en informes (solo figura en una tabla resumen del Estudio Hidrogeológico)

Se trata de sondeos en la zona de estudio, y se puede observar que existen algunos valores aparentemente anómalos, probablemente por cuestiones locales de la zona y errores. Es el caso de:

- Problemas con las unidades, confusiones entre cm/s y m/s.
- Una brecha dolomítica con una permeabilidad media-baja en el tramo de Ortuella-Trapagarán, lo que indica que debe estar muy cementada.

Si se representan datos de permeabilidad recogidos de diferentes Estudios y Proyectos (Figura 5) se puede observar que los valores registrados se encuentran en un abanico muy amplio de permeabilidades, destacando la abundancia de ensayos en limolitas y calcarenitas, como es lógico.

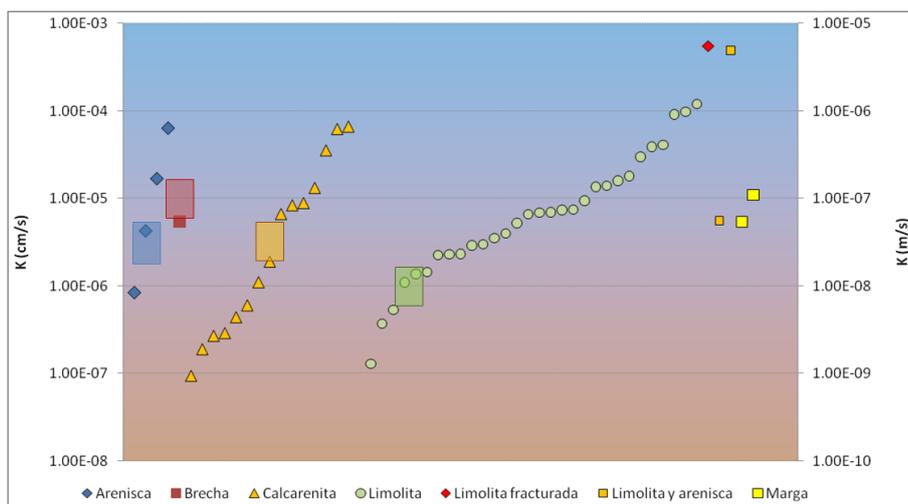


Figura 5: Recopilación de permeabilidades según litologías

Seleccionando estos valores por profundidades se comprueba que a grandes profundidades es posible obtener valores inferiores de permeabilidad, especialmente en el caso de las limolitas (Figura 6).

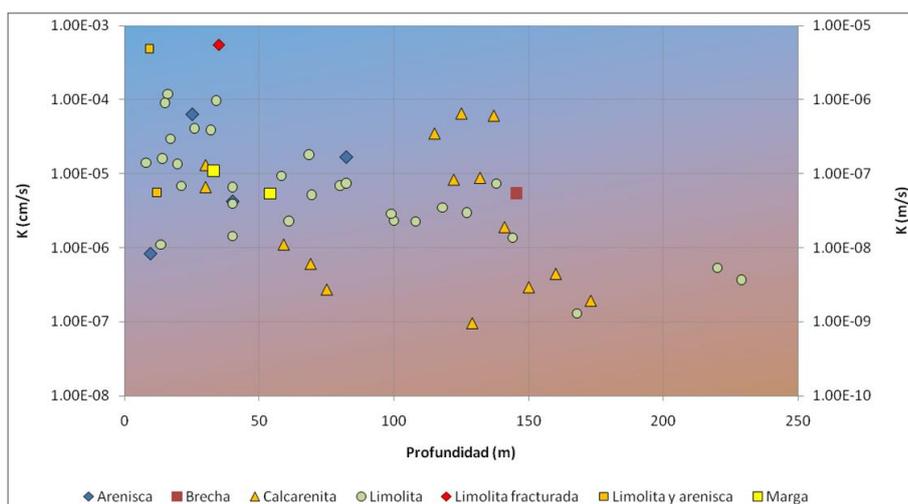
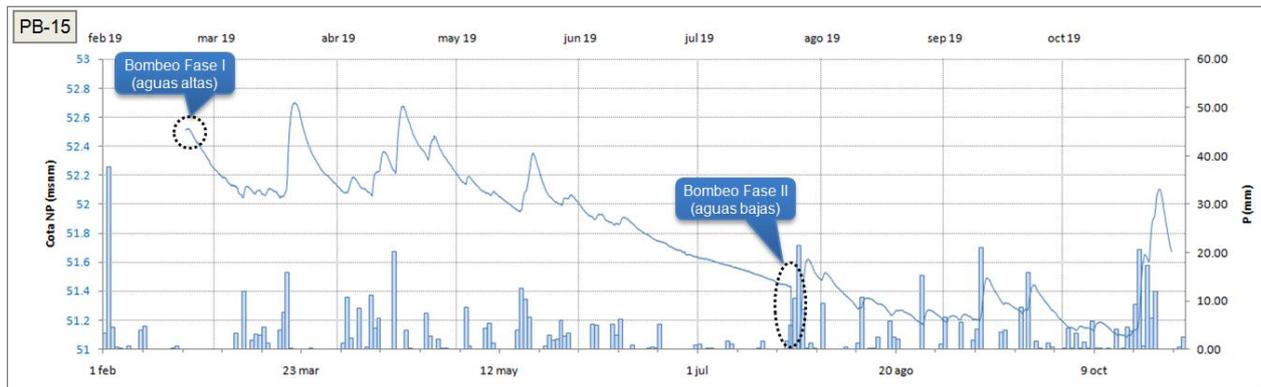


Figura 6: Recopilación de permeabilidades según litologías y profundidades

Además de estos datos procedentes de ensayos Lugeon, se cuenta con datos de permeabilidad procedentes de ensayos de bombeo realizados en la Formación Tejera en el entorno del río Bolintxu (Fase 2), en dos periodos, aguas altas y aguas bajas (Figura 7):

- Ensayo realizado en aguas altas con caudal constante de 1 l/s. La permeabilidad resultante es de  $3.06 \times 10^{-7}$  -  $3.22 \times 10^{-7}$  m/s.
- Ensayo realizado en aguas bajas con caudal constante de 0.83 l/s durante 1035' (17.25 h). La permeabilidad resultante es de  $5.54 \times 10^{-7}$  -  $9.05 \times 10^{-7}$  m/s. Además de estos datos, se obtiene un valor de Coeficiente de almacenamiento S entre  $6.53 \times 10^{-5}$  -  $1.82 \times 10^{-4}$ .

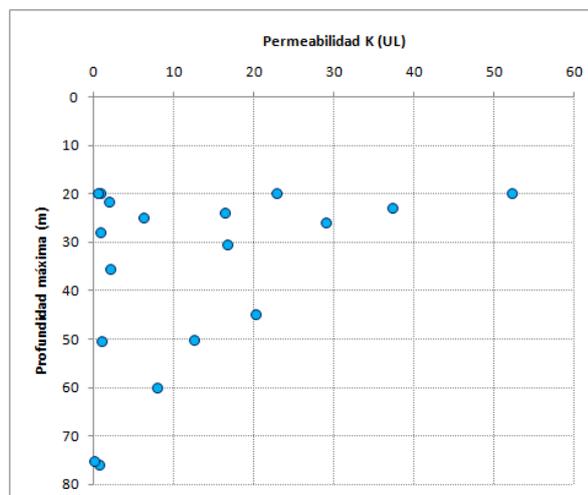


**Figura 7:** Ubicación de los ensayos de bombeo en la evolución piezométrica del punto PB-15 (pozo de bombeo) y marco pluviométrico (año 2019)

Los valores de permeabilidad obtenidos en estos ensayos indican una mayor permeabilidad del medio en la formación Tejera (limolitas) en aquel lugar. Esta situación puede justificarse por la proximidad a una zona de cauce (generalmente los cauces se desarrollan a partir de zonas con mayor grado de fracturación) y a un aspecto de gran importancia:

- Generalmente y como ya se ha adelantado anteriormente, en medios rocosos de media-baja permeabilidad (porosidad secundaria, medios fracturados) se detecta que con la profundidad la permeabilidad desciende, debido a un proceso natural de cierre de fracturas por presión y falta de circulación de agua que permita el lavado. En superficie, tal y como podría ser el caso del arroyo Bolintxu, las fracturas y/o diaclasas están más "relajadas" y lavadas, lo que favorece la circulación de agua, especialmente en el entorno próximo de cauces, que suelen constituir la zona de descarga final del acuífero.

En el caso de la Fase 2, se ha realizado una correlación entre las permeabilidades obtenidas a partir de ensayos Lugeon y la profundidad, y se observa claramente que con la profundidad se reduce notablemente la permeabilidad (**Figura 8**):



**Figura 8:** Correlación entre permeabilidad y profundidad del Ensayo Lugeon

Asimismo, este fenómeno se detecta en cada sondeo, como muestra el ejemplo siguiente (**Figura 9**),

en el que se muestran resultados de ensayos realizados en un mismo sondeo a diferentes profundidades:

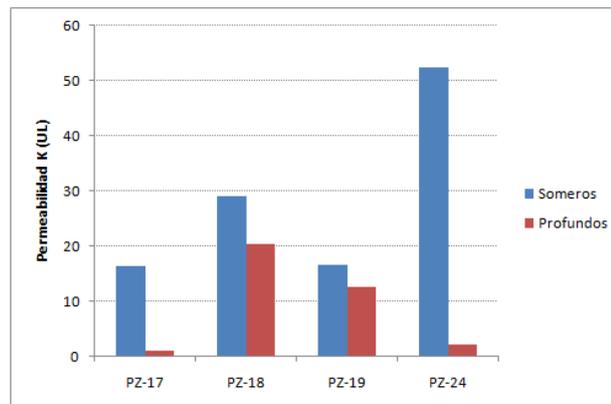


Figura 9: Permeabilidades obtenidas en ensayos realizados en zonas someras y profundas de sondeos

Por este motivo, debe considerarse el valor mínimo o promedio-mínimo en los rangos de permeabilidad para los casos de las limolitas y areniscas.

Esta situación no es aplicable a casos como los de las calizas o zonas fracturadas, en las cuales la permeabilidad puede ser elevada y mantenerse con la profundidad, por lo que se debe prestar especial atención a este tipo de materiales y estructuras.

En la zona existe además, un tipo de material especial que son los diques de cuarzo, cuyo papel hidrogeológico no está nada claro. Generalmente estos diques se asocian a fracturas y por lo tanto pueden favorecer la circulación preferente, por lo que se debe de ser conservador en la asignación de valores de permeabilidad.

En base a todos estos datos, y dada la disparidad de datos, se ha llevado a cabo una homogeneización, que incluye la reinterpretación de los ensayos Lugeon en los sondeos de la zona de estudio. La primera cuestión, es la propia definición de la Unidad Lugeon (UL):

- Una unidad Lugeon es la admisión de 1 litro por metro de sondeo en un intervalo de tiempo de 1 minuto a una presión de 10 kp/cm<sup>2</sup> mantenida durante 10 minutos. Teóricamente:

- Un medio permeable presenta una permeabilidad entre 3 y 10 UL, es decir, hay un caudal de admisión entre 150 y 500 litros (entre 0.05 y 0.17 l/s por cada metro) en un intervalo de 10 minutos, en un tramo de sondeo de 5 m y a una presión de 10 kp/cm<sup>2</sup>.
- Un medio poco permeable presenta una permeabilidad entre 1 y 3 UL, es decir, hay un caudal de admisión entre 50 y 150 litros (entre 0.017 y 0.05 l/s por cada metro) en un intervalo de 10 minutos, en un tramo de sondeo de 5 m y a una presión de 10 kp/cm<sup>2</sup>.
- Evidentemente medios muy permeables presentan valores superiores a 10 UL y medios muy poco permeables, valores inferiores a 1 UL.

En términos de admisión de caudal a 10 kp/cm<sup>2</sup> se podría establecer para un intervalo de 10' y un tramo de 5 m de sondeo que:

Permeabilidad K	Admisión (l/10'/5m)	Permeabilidad cualitativa
<1 UL	<50 litros	Prácticamente impermeable
1-3 UL	50-150 litros	Poco permeable
3-10 UL	150-500 litros	Permeable
>10 UL	>500 litros	Muy permeable

Evidentemente, hay que tener en cuenta que en muchos ensayos el nivel piezométrico se sitúa por encima del tramo ensayado y la presión efectiva es superior incluso a 10 kp/cm<sup>2</sup>.

Existe mucha información, pero siempre asociada a sondeos ejecutados para investigación geotécnica y cortos periodos de control realizados en los mismos. La única información que comprende periodos amplios es la que corresponde a puntos de control ejecutados en el marco de los estudios de la Variante Sur Ferroviaria, fases 1 y 2. Los puntos de control de la fase 1 se distribuyen a lo largo de la traza proyectada desde Ortuella hasta el río Cadagua, definiéndose 3 tramos:

- Tramo Ortuella-Trapagarán (de forma abreviada OT)
- Tramo Trapagarán-Barakaldo (de forma abreviada TB)
- Tramo Barakaldo-Bilbao (de forma abreviada BB)

Haciendo un repaso de los ensayos realizados en la zona, se observa lo siguiente (**Figura 10**):



Figura 10: Puntos de control de piezometría en la Fase 1 (en rojo inoperativos)

**Sondeo TB-2**

Se han realizado dos ensayos Lugeon, uno entre los 60 y 65 m de profundidad y otro entre los 100 y 105 m de profundidad. Se trata de limolitas arenosas sanas de la formación Ereza:



Figura 11: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo TB-2

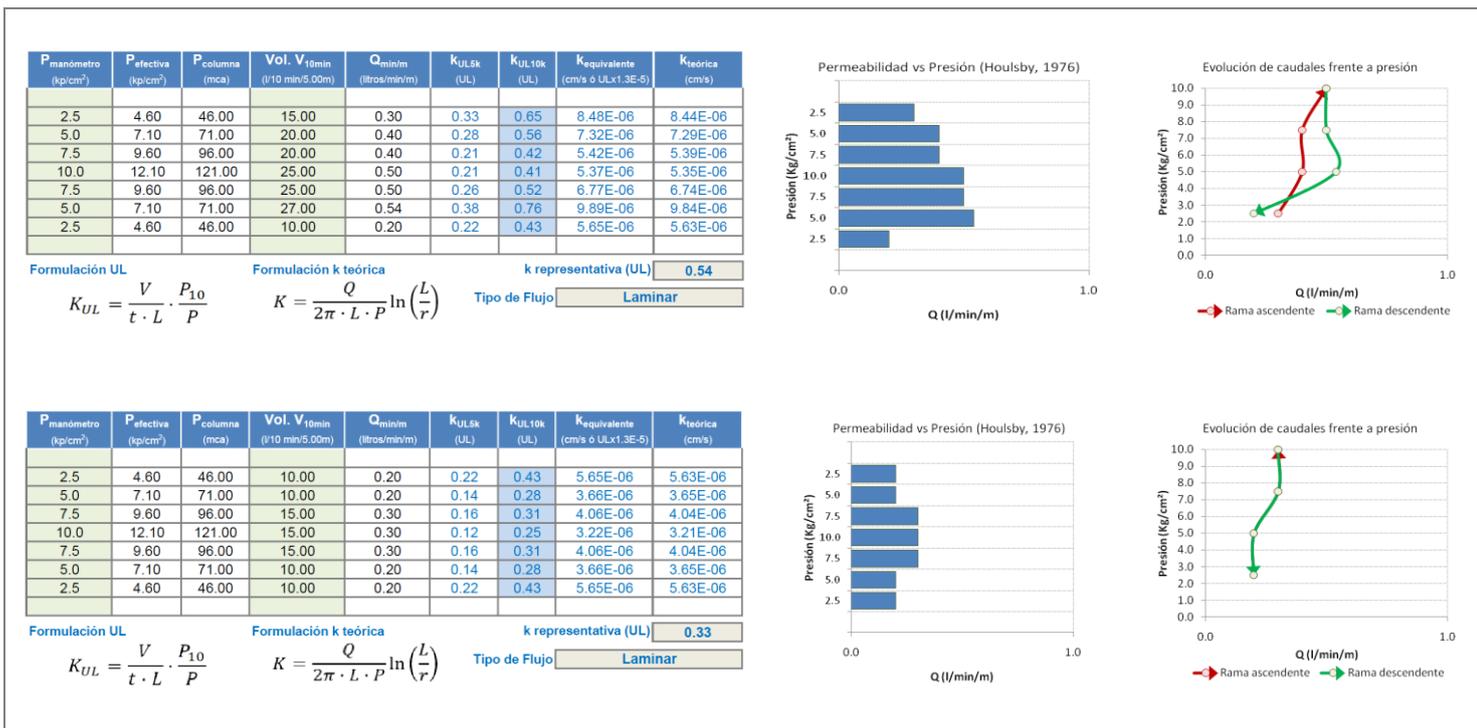


Figura 12: Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo TB-2 (arriba tramo 60-65m y abajo tramo 100-105m)

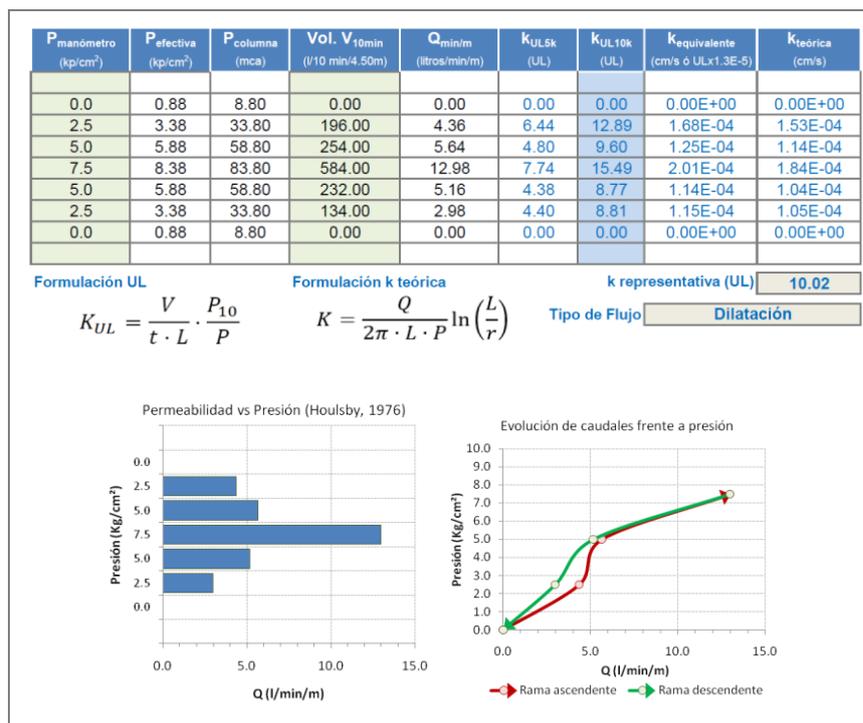
Como se puede observar en la Figura 12, la admisión es baja y se reduce con la profundidad pasando de 0.54 UL (6.99 x 10<sup>-6</sup> cm/s) a 0.33 UL (4.28 x 10<sup>-6</sup> cm/s).

**Sondeo TB-3**

Se ha realizado un ensayo Lugeon superficial, entre los 9.5 y 14 m de profundidad. Se trata de limolitas carbonatadas masivas, altamente fracturadas con abundante arcilla de la Formación Ereza, lo cual se puede observar claramente en los testigos:



**Figura 13:** Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo TB-3



**Figura 14:** Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo TB-6

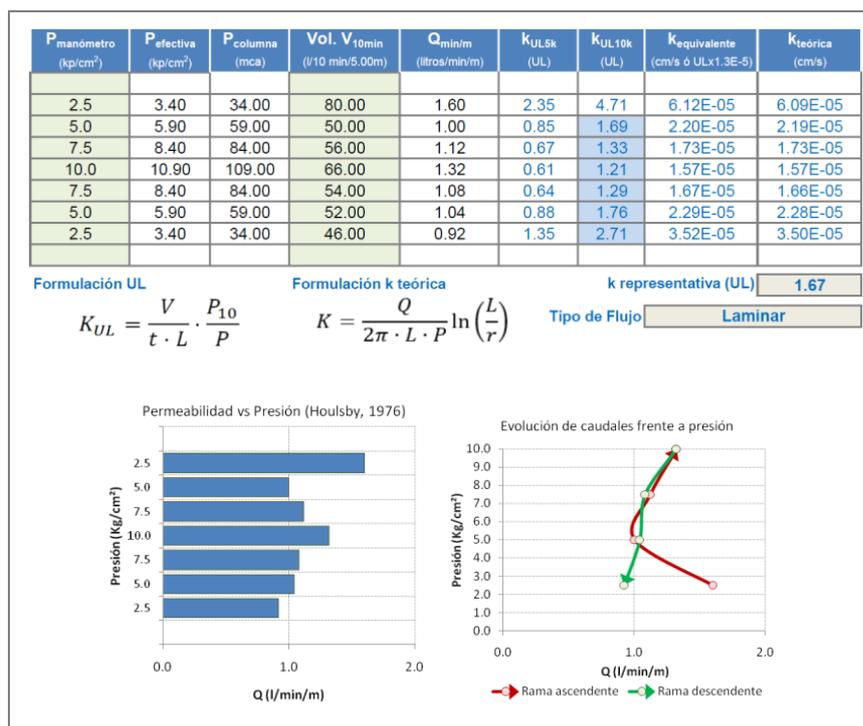
Como se puede observar en la **Figura 14** la admisión es alta hecho que se relaciona con la fracturación del macizo y la ubicación superficial. En el gráfico se observa que existe cierta dilatación de fracturas. La permeabilidad que se obtiene es de 10.02 UL ( $1.30 \times 10^{-4}$  cm/s), valor que resulta elevado y representativo de zonas puntuales y superficiales.

**Sondeo TB-6**

Se ha realizado un ensayo Lugeon realizado entre los 47.80 y 52.80 m de profundidad. Se trata de Areniscas de grano fino, finamente laminadas y con porcentaje reducido de carbonatos de la Formación Ereza. En los testigos se observan pocas fracturas (**Figura 15**):



**Figura 15:** Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo TB-6



**Figura 16:** Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo TB-6

Como se puede observar en la **Figura 16** la admisión es media a baja dado que el macizo se presenta bastante cerrado. La permeabilidad que se obtiene es de 1.67 UL ( $2.17 \times 10^{-5}$  cm/s), valor que puede resultar representativo para una zona areniscosa a profundidad media. En el ensayo se observa una irregularidad en el comienzo, en donde se registra la mayor admisión con la presión más baja.

### Sondeo BB-1

Se ha realizado un ensayo Lugeon realizado entre los 78.80 y 83.80 m de profundidad. Se trata de Limolitas calcáreas de aspecto masivo con laminación milimétrica de la Formación Ereza. En los testigos apenas se observan fracturas (Figura 17):



Figura 17: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo BB-1

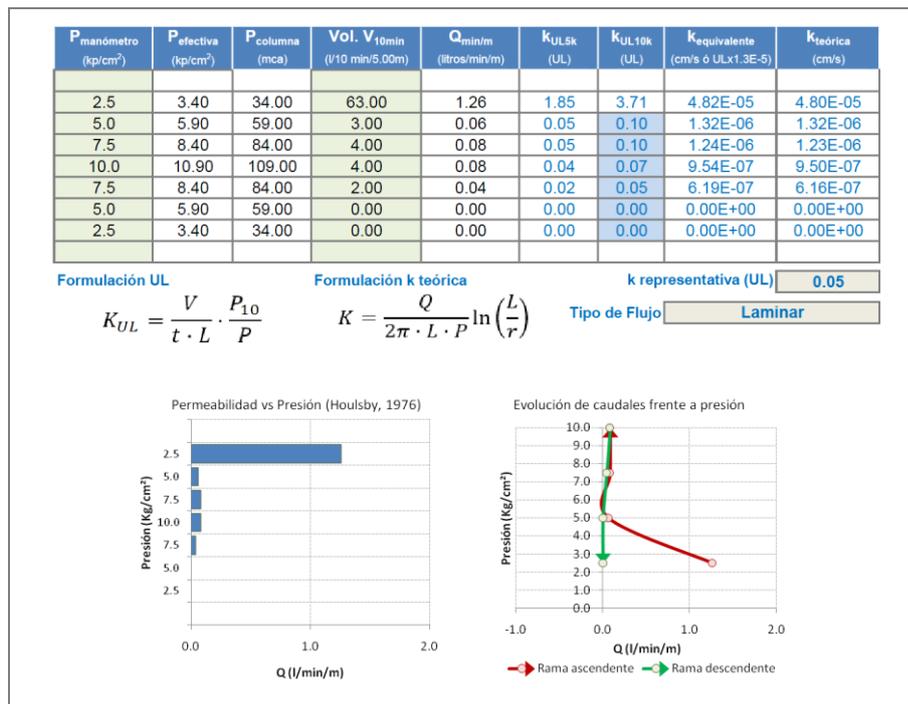


Figura 18: Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo BB-1

Como se puede observar en la Figura 16 la admisión es extraña con el mayor valor a la menor presión y en el inicio del ensayo, para pasar a caudales prácticamente nulos en el resto del ensayo. No se considerará este ensayo como representativo.

### Sondeo BB-4

Se ha realizado un ensayo Lugeon realizado entre los 15.50 y 18.20 m de profundidad. Se trata de Arenisca masiva de grano fino moderadamente fracturada de la Formación Ereza. En los testigos se puede apreciar una importante fracturación (Figura 19):



Figura 19: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo BB-4

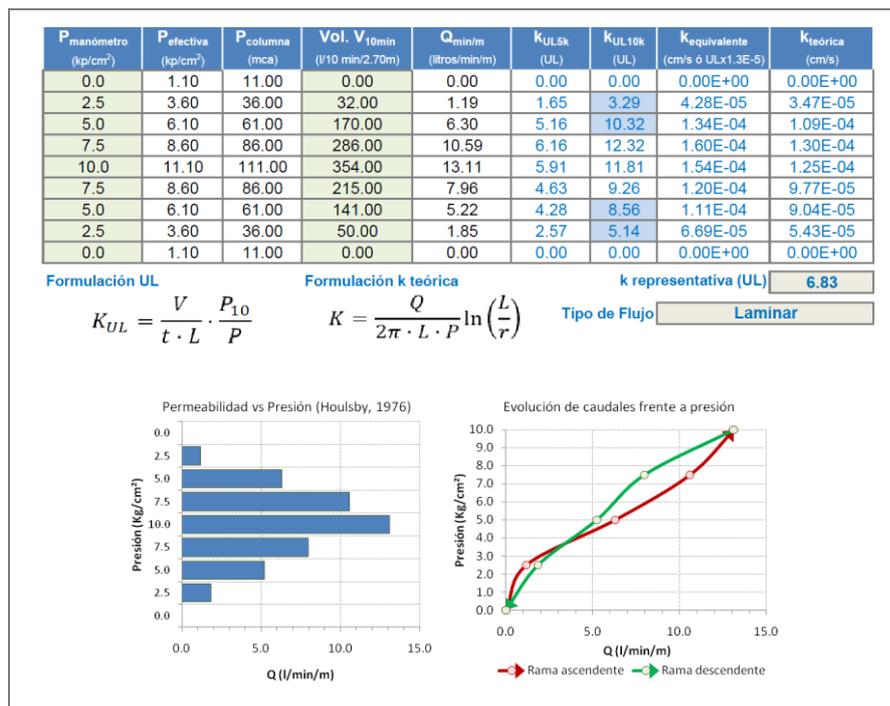


Figura 20: Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo BB-4

Como se puede observar en la Figura 20 la admisión es importante, probablemente pueda existir dilatación. La permeabilidad que se obtiene es de 6.83 UL ( $8.88 \times 10^{-5}$  cm/s), es decir muy permeable. Estos valores se relacionan con el importante grado de fracturación y proximidad a la superficie.

### Sondeo OT-4

Se han realizado dos ensayos Lugeon profundos, uno entre los 115 y 120 m de profundidad y otro entre los 145.5 y 150.5 m de profundidad. Se trata de Areniscas y limolitas sanas de la Formación Ereza con poca fracturación aparente, tal y como muestran los testigos (Figura 21):



Figura 21: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-4 (tramo 115-120)

En el tramo entre los 145.5 y los 150.5 m de profundidad aparecen calcarenitas dolomitizadas de la formación Ereza (Figura 22) con mayor fracturación aparentemente:



Figura 22: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-4 (tramo 145.5-150.5)

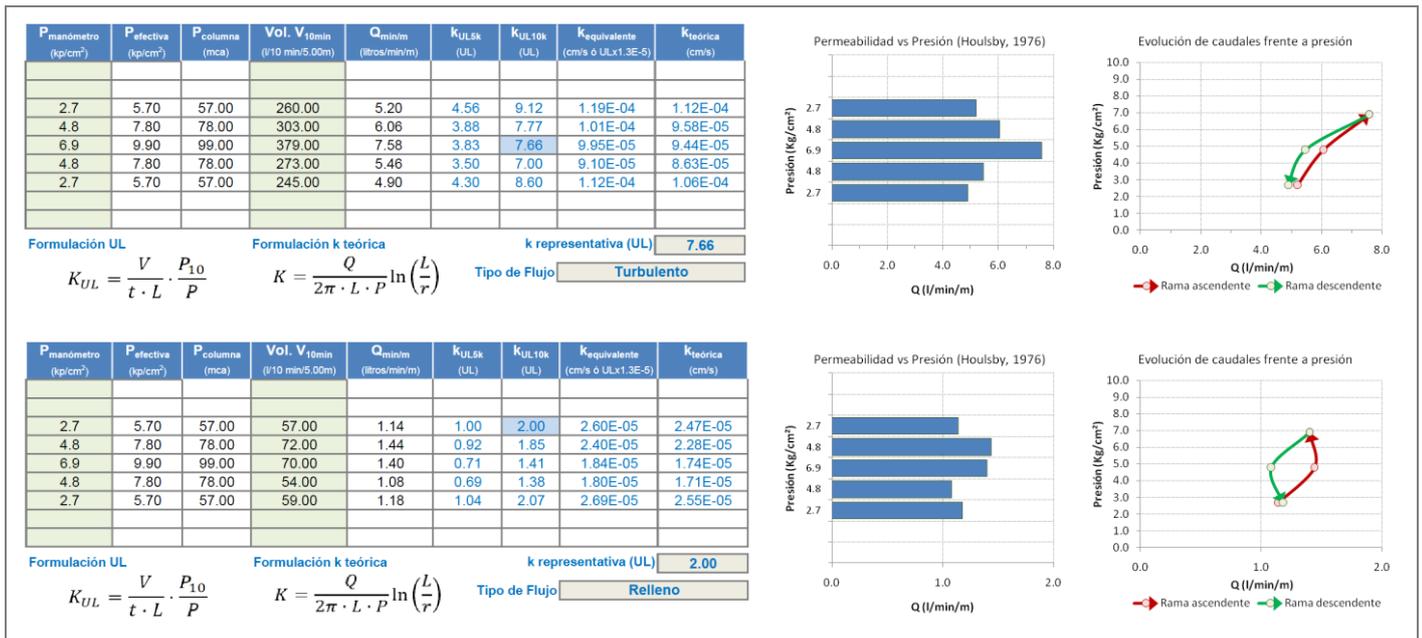


Figura 23: Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo TB-4 (arriba tramo 115-120m y abajo tramo 145.5-150.5m)

Como se puede observar en la Figura 23, a pesar de que los testigos parecen presentar mayor fracturación en el tramo inferior, existe una notable diferencia en la permeabilidad, de forma que se reduce con la profundidad pasando de 7.66 UL ( $9.95 \times 10^{-5}$  cm/s) a 2.00 UL ( $2.60 \times 10^{-5}$  cm/s).

### Sondeo OT-5

Se han realizado dos ensayos Lugeon profundos, uno entre los 125 y 130 m de profundidad y otro entre los 137 y 142 m de profundidad. Se trata de areniscas con limolita de la Formación Ereza relativamente fracturadas en el tramo superior (Figura 24):



Figura 24: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-5 (tramo 125-130)

En el tramo entre los 137 y los 142 m de profundidad la fracturación se incrementa notablemente (Figura 25) lo que probablemente se relacione con una zona de fractura (falla):



Figura 25: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-5 (tramo 137-142)

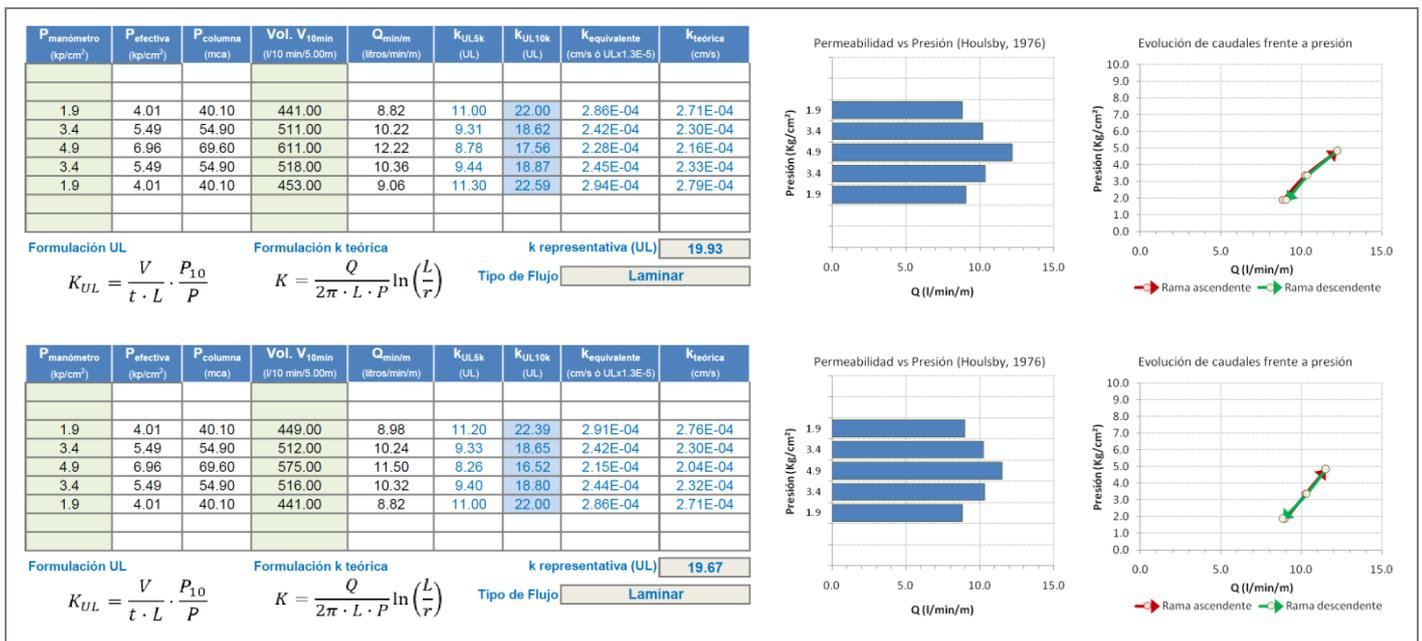


Figura 26: Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo OT-5 (arriba tramo 125-130m y abajo tramo 137-142m)

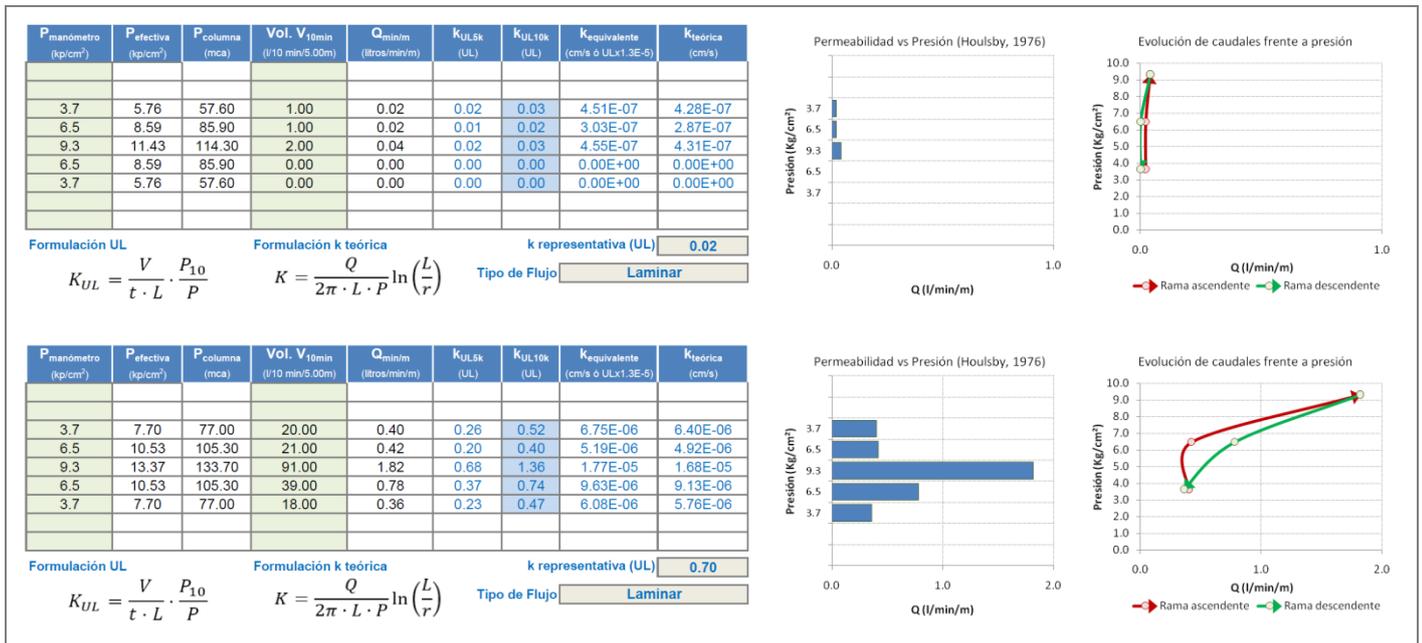
Como se puede observar en la Figura 26, a pesar de que los testigos parecen presentar diferente grado de fracturación, el resultado de los ensayos es muy similar, indicando una importante admisión con valores de permeabilidad entre 19.93 UL ( $2.59 \times 10^{-4}$  cm/s) a 19.67 UL ( $2.56 \times 10^{-4}$  cm/s). Se trata de un buen ejemplo de una zona de fractura profunda.

**Sondeo OT-6**

Se han realizado dos ensayos Lugeon profundos, uno entre los 129 y 134 m de profundidad y otro entre los 141 y 146 m de profundidad. Se trata de areniscas de grano fino con pasadas de limolita en Formación Ereza. Los testigos muestran una roca muy sana (Figura 27):



**Figura 27:** Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo OT-6 (izquierda tramo 129-134m, derecha tramo 141-146m)



**Figura 28:** Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo OT-6 (arriba tramo 129-134m y abajo tramo 141-146m)

Como se puede observar en la Figura 28, se confirma la baja permeabilidad que se preveía en los testigos, si bien el primer ensayo no ha tenido admisión (impermeable) y en cambio el segundo ensayo muestra mayores admisiones. Se considerará el segundo ensayo con una permeabilidad de 0.70 UL (9.07 x 10<sup>-6</sup> cm/s).

### Sondeo SPZ-1

Recientemente se ha ejecutado un sondeo en la zona del abra industrial de Ortuella con objeto de controlar la piezometría en esta zona y determinar la posible influencia del drenaje de la Mina de Bodovalle. Este sondeo tiene la particularidad de que ha atravesado calizas, las cuales han sido objeto de ensayo de caracterización.

En este sondeo, que presenta un nivel muy elevado, se han realizado tres ensayos Lugeon. Dos en limolitas calcáreas muy sanas de la formación Tejera, entre los metros 30-34.75 y 45-50. Los testigos muestran gran integridad con escasa fracturación (Figura 29):



Figura 29: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo SPZ-1 (izquierda tramo 30-34.75, derecha tramo 45-50)

El otro ensayo se ha realizado en calizas en bancos decimétricos a métricos con corales rudistas, entre los 58 y 62.80 m de profundidad, con testigos también muy sanos, tal y como muestra la siguiente figura (Figura 30):



Figura 30: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo SPZ-1 en calizas (tramo 58-62.80)

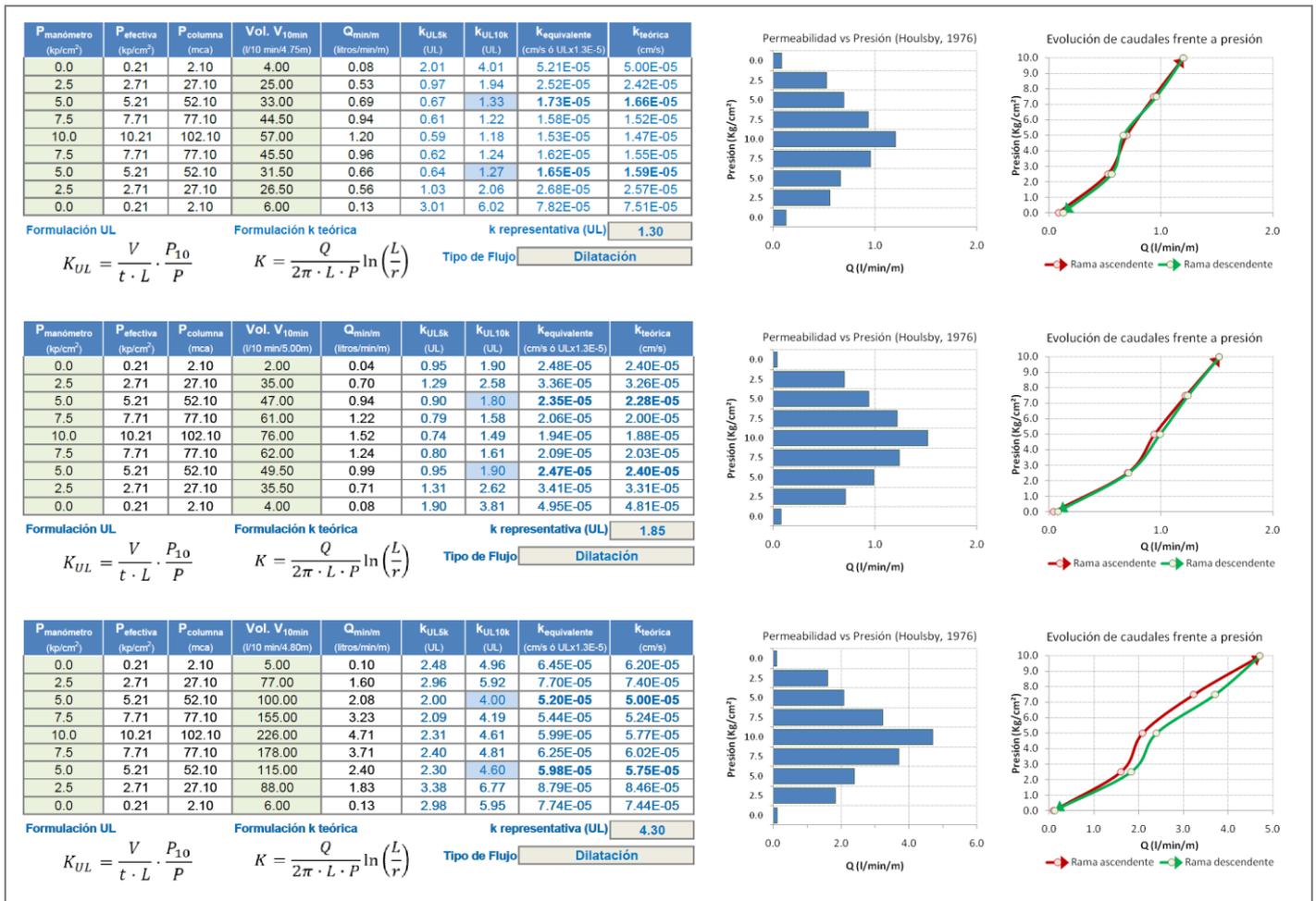


Figura 31: Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo SPZ-1 (arriba tramo 30-34.75, centro tramo 45-50, abajo tramo 58-62.80)

Como se puede observar en la Figura 31, el medio limolítico es poco permeable entre los 30 y los 50 m de profundidad, aunque existe admisión de hasta 76 l/10'/5m cuando la apariencia de los testigos es muy sana y con poca fracturación. Las permeabilidades que se derivan para las limolitas calcáreas es de 1.30 UL (1.69 x 10<sup>-5</sup> cm/s) y 1.85 UL (2.41 x 10<sup>-5</sup> cm/s). Las calizas presentan mayor permeabilidad, 4.30 UL (5.59 x 10<sup>-5</sup> cm/s), pero se trata de valores que indican que no es un material tan permeable como cabría esperar, probablemente por no existir karstificación y por encontrarse las fracturas cerradas.

En la siguiente tabla se sintetizan los valores de permeabilidad específicos de sondeos en la zona de estudio, incluyéndose a modo comparativo los correspondientes a dos ensayos de bombeo. Las litologías se clasifican según la profundidad del ensayo.

### Sondeo SPZ-2

Tras la ejecución del sondeo SPZ-1, se ha ejecutado un nuevo sondeo situado próximo al emboquille de la alternativa 3, con una profundidad de 40,8 m.



Figura 32: Sondeo SPZ-2 en ejecución

Al igual que el caso del sondeo SPZ-1, el nivel se halla muy próximo a la superficie (0.20 y 0.00 m durante la ejecución de ensayos). Se han realizado dos ensayos Lugeon, uno entre los 10 y 13.75 m y otro entre los 25 y 28.75 m. No ha sido posible obturar un tramo de 5 m debido a un problema con un manguito. Las litologías corresponden a limolitas calcáreas muy sanas de la formación Tejera, con testigos que muestran gran integridad con escasa fracturación (Figura 33):



Figura 33: Detalle de los testigos en los tramos ensayados en el sondeo SPZ-2 (izquierda ensayo 10-13.75m, derecha ensayo 25-28.75m)

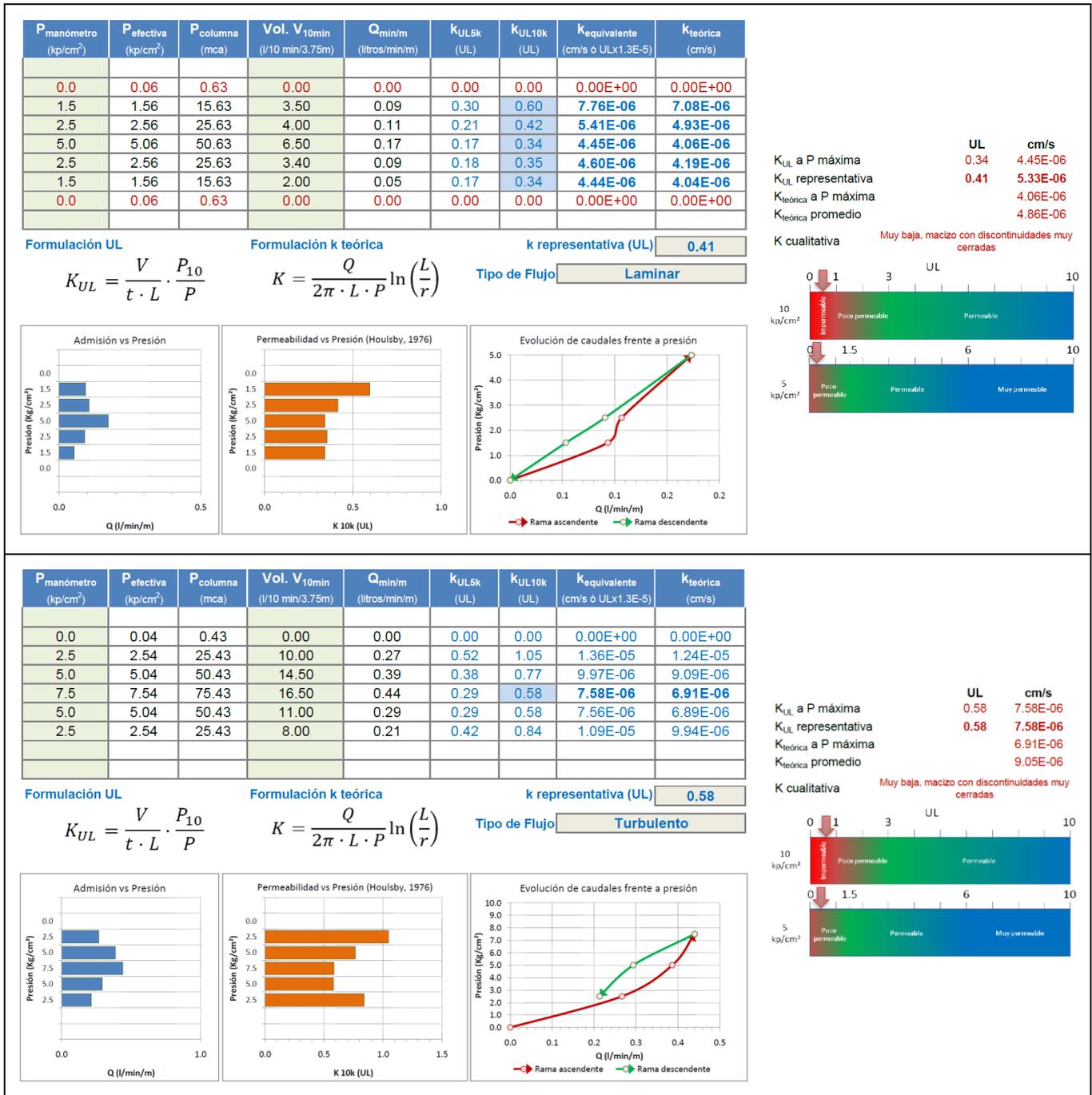


Figura 34: Reinterpretación de los ensayos realizados en el sondeo SPZ-2 (arriba tramo 10-13.75, abajo tramo 25-28.75)

Como se puede observar en la Figura 34, los resultados indican una permeabilidad muy baja, con admisiones especialmente bajas en el tramo superior (6.5 l/10'/3.75m a presión máxima). A la vista de los testigos, los resultados son coherentes, dado que apenas presentan fracturación o diaclasado.

Paralelamente, se han realizado 3 ensayos de infiltración cuando la perforación se encontraba a 12.50 m (Figura 35), 33.30 m (Figura 36) y una vez finalizado el sondeo, a 40.80 m (Figura 37).

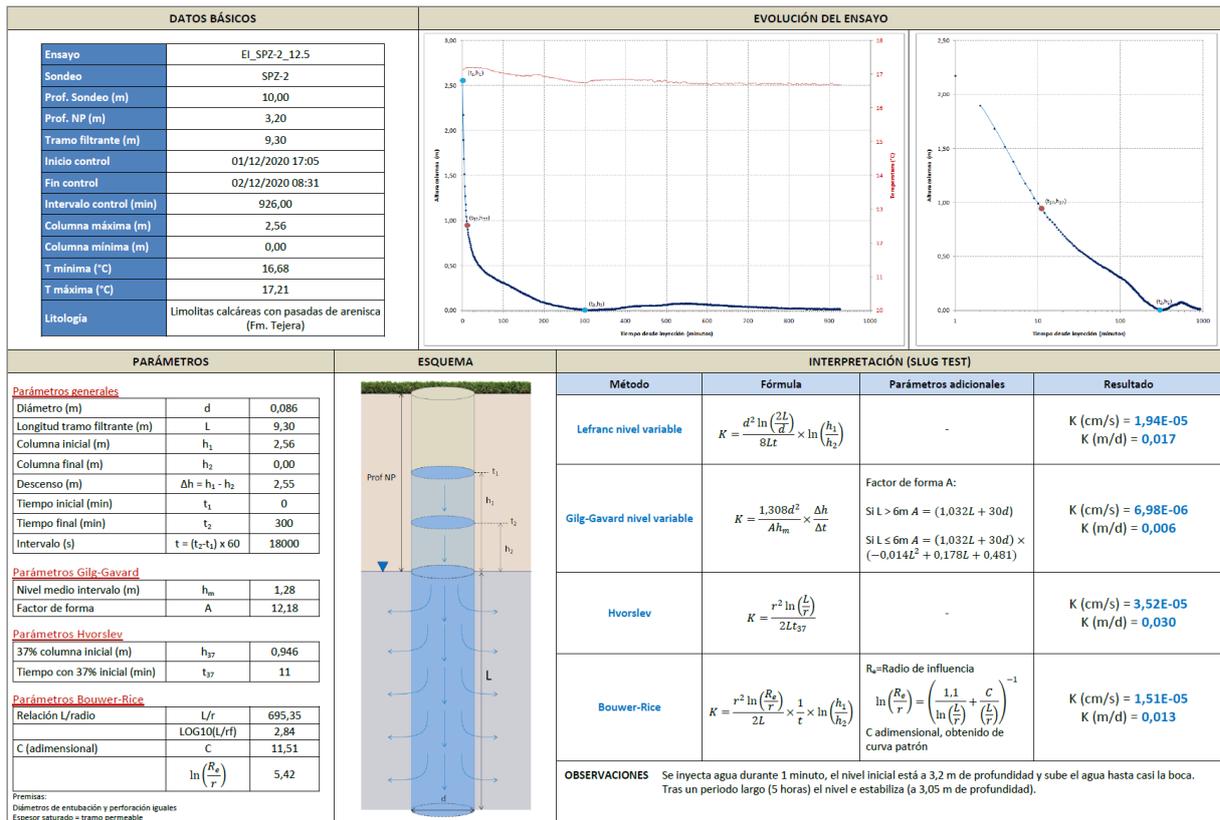


Figura 35: Ensayo de infiltración con el sondeo a 12.50 m

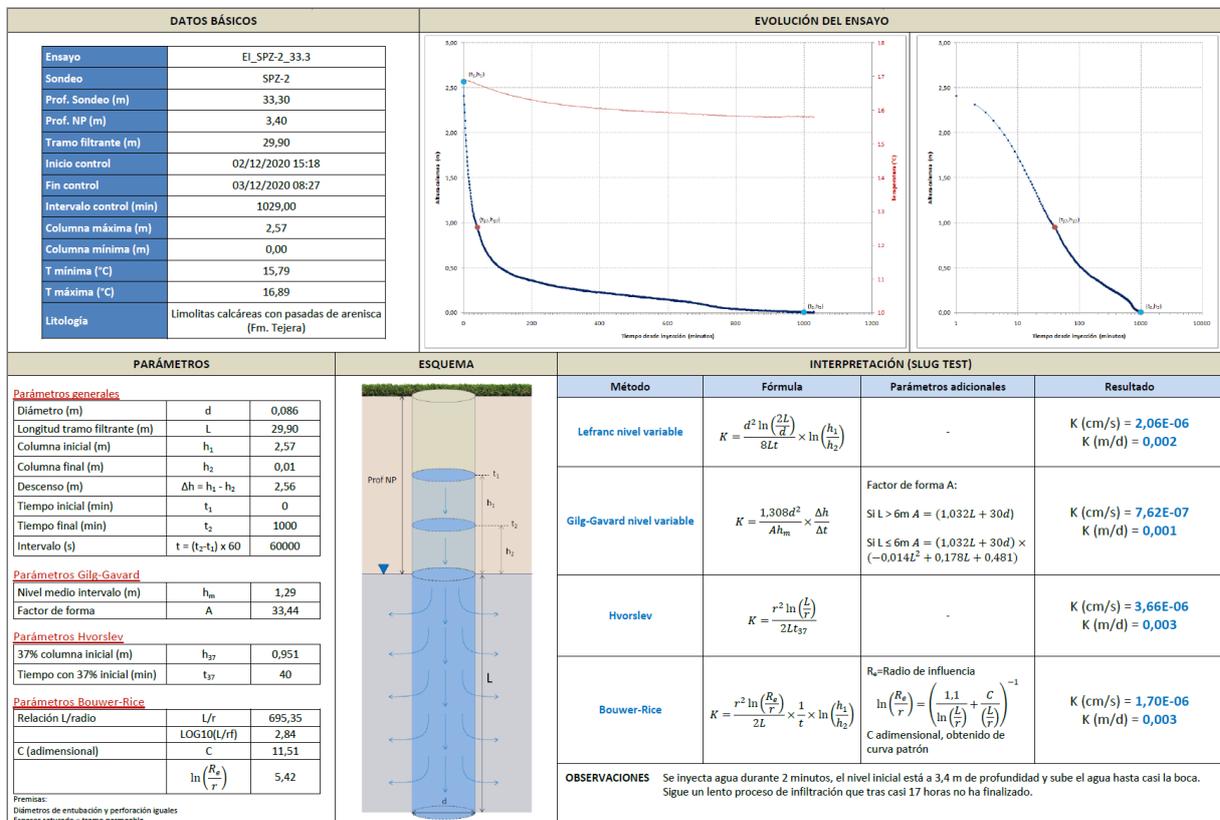


Figura 36: Ensayo de infiltración con el sondeo a 33.30 m

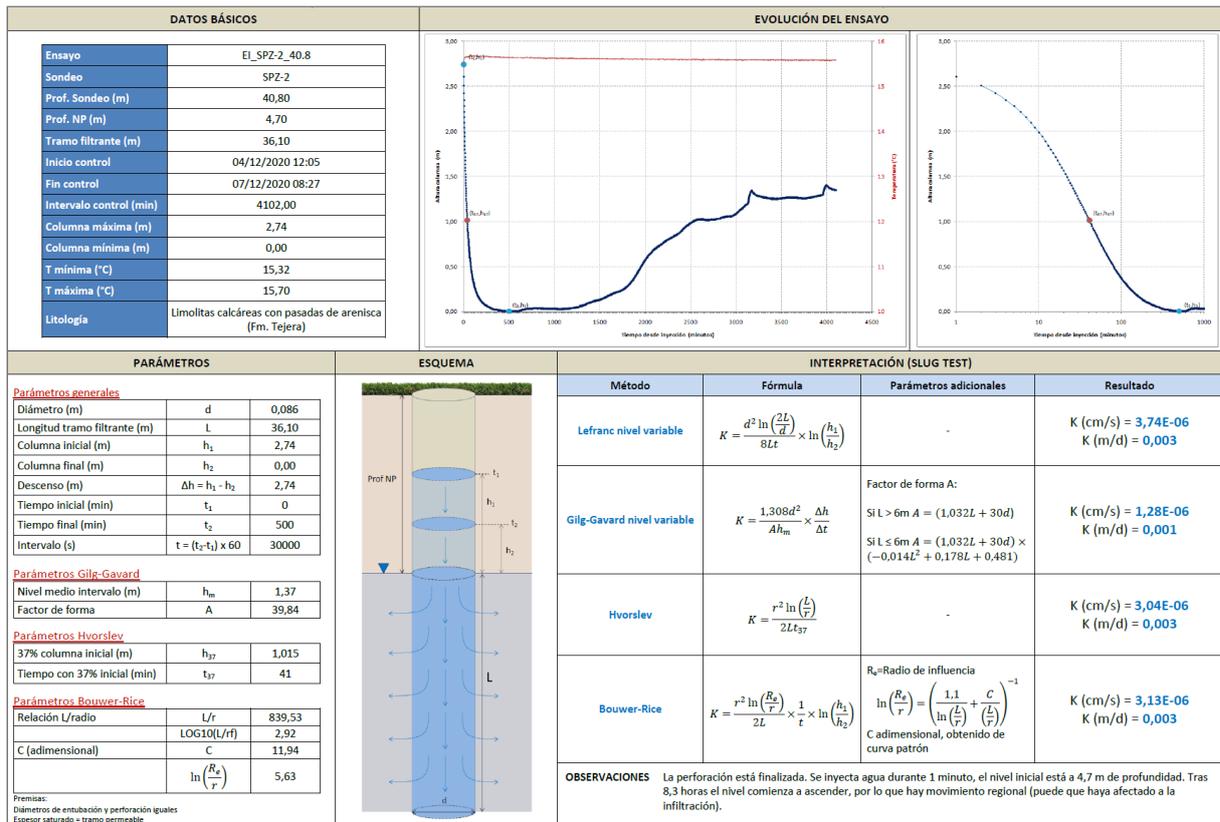


Figura 37: Ensayo de infiltración con el sondeo a 40.80 m

Estos ensayos corroboran la baja permeabilidad del medio, con tiempos de infiltración muy prolongados con pequeños caudales de infiltración. A la vista de estos ensayos, se corrobora que la permeabilidad se reduce con la profundidad:

Tipo ensayo	12.50 m		33.30 m		40.80 m	
	K (cm/s)	K (m/d)	K (cm/s)	K (m/d)	K (cm/s)	K (m/d)
Lefranc NV	1.94 x 10 <sup>-5</sup>	0.017	2.06 x 10 <sup>-6</sup>	0.002	3.74 x 10 <sup>-6</sup>	0.003
Gilg-Gavard NV	6.98 x 10 <sup>-6</sup>	0.006	7.62 x 10 <sup>-7</sup>	0.001	1.28 x 10 <sup>-6</sup>	0.001
Hvorslev	3.52 x 10 <sup>-5</sup>	0.030	3.66 x 10 <sup>-6</sup>	0.003	3.04 x 10 <sup>-6</sup>	0.003
Bower-Rice	1.51 x 10 <sup>-5</sup>	0.013	1.70 x 10 <sup>-6</sup>	0.001	3.13 x 10 <sup>-6</sup>	0.003
<b>Media</b>	<b>1.92 x 10<sup>-5</sup></b>	<b>0.017</b>	<b>2.05 x 10<sup>-6</sup></b>	<b>0.002</b>	<b>2.80 x 10<sup>-6</sup></b>	<b>0.002</b>

En la siguiente tabla se sintetizan los valores de permeabilidad específicos de sondeos en la zona de estudio, incluyéndose a modo comparativo los correspondientes a dos ensayos de bombeo. Las litologías se clasifican según la profundidad del ensayo.

Grupo	Tipo ensayo	Litología	K (cm/s)	Otro parámetro
Limolitas	Ensayo Lugeon TB-3	Limolita fracturada superficial	$1.30 \times 10^{-4}$	
	Ensayo de bombeo Q=1 l/s	Limolita superficial	$3.06 \times 10^{-5} - 3.22 \times 10^{-5}$	
	Ensayo de bombeo Q=0.83 l/s	Limolita superficial	$5.54 \times 10^{-5} - 9.05 \times 10^{-5}$	$S=6.53 \times 10^{-5} - 1.82 \times 10^{-4}$
	Ensayo Lugeon SPZ-1	Limolita medio profunda	$1.69 \times 10^{-5} - 2.41 \times 10^{-5}$	
	Ensayos Lugeon SPZ-2	Limolita superficial y medio profunda	$5.33 \times 10^{-6} \text{ a } 7.58 \times 10^{-6}$	
	Ensayos Infiltración SPZ-2	Limolita superficial y medio profunda	$1.92 \times 10^{-5} \text{ a } 2.80 \times 10^{-6}$	
	Ensayo Lugeon TB-2	Limolita profunda	$6.99 \times 10^{-6} - 4.28 \times 10^{-6}$	
Areniscas	Ensayo Lugeon BB-4	Arenisca fracturada superficial	$8.88 \times 10^{-5}$	
	Ensayo Lugeon TB-6	Arenisca medio profunda	$2.17 \times 10^{-5}$	
	Ensayo Lugeon TB-4	Arenisca fracturada profunda	$9.95 \times 10^{-5}$	
	Ensayo Lugeon TB-6	Arenisca profunda	$9.07 \times 10^{-6}$	
Calcarenita	Ensayo Lugeon TB-4	Calcarenita profunda	$2.60 \times 10^{-5}$	
Calizas	Ensayo Lugeon SPZ-1	Caliza medio profunda	$5.59 \times 10^{-5}$	
Fractura	Ensayo Lugeon TB-5	Fractura profunda en arenisca	$2.56 \times 10^{-4}$	

A la vista de estos datos y de la influencia de la profundidad, el modelo de permeabilidad del medio quedaría como sigue:

Limolitas	Sanas (K en cm/s)	Fracturadas (K en cm/s)
Superficie	$5.54 \times 10^{-5}$	$1.30 \times 10^{-4}$
Medio	$2.41 \times 10^{-5}$	
Profunda	$4.28 \times 10^{-6}$	

Areniscas	Sanas (K en cm/s)	Fracturadas (K en cm/s)
Superficie	$8.88 \times 10^{-5}$	
Medio	$2.17 \times 10^{-5}$	
Profunda	$9.07 \times 10^{-6}$	$9.95 \times 10^{-5}$

Calcarenitas	Sanas (K en cm/s)	Fracturadas (K en cm/s)
Superficie	?	
Medio	?	
Profunda	$2.60 \times 10^{-5}$	

Calizas	Sanas (K en cm/s)	Fracturadas (K en cm/s)
Superficie	?	
Medio	$5.59 \times 10^{-5}$	
Profunda	$2.60 \times 10^{-5}$ (asignado de calcarenita)	

Fracturas (y diques de cuarzo)	(K en cm/s)
Superficie	?
Medio	?
Profunda	$2.56 \times 10^{-4}$

En base a todos estos datos y a la reducción de la permeabilidad con la profundidad, se asumirán los valores de permeabilidad profundos de la siguiente manera (serán objeto de revisión y ajuste en fases posteriores):

- Areniscas (Fm. Ereza):  $9.07 \times 10^{-6}$  cm/s.
- Limolitas (Fm. Tejera):  $4.28 \times 10^{-6}$  cm/s.
- Calizas:  $2.60 \times 10^{-5}$  cm/s.

Respecto a las fracturas profundas y diques de cuarzo, no hay mucha información. En general, en las observaciones en el terreno se aprecia que las fracturas siempre están cerradas, por lo que se utilizará un valor conservador. Además se considerará un ancho de fractura del orden de 1 metro.

- Fallas y diques de cuarzo:  $3.00 \times 10^{-5}$  cm/s.

#### 4. PIEZOMETRÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Existe mucha información, pero siempre asociada a sondeos ejecutados para investigación geotécnica y cortos periodos de control realizados en los mismos. La única información que comprende periodos amplios es la que corresponde a puntos de control ejecutados en el marco de los estudios de la Variante Sur Ferroviaria, fases 1 y 2. Los puntos de control de la fase 1 se distribuyen a lo largo de la traza proyectada desde Ortuella hasta el río Cadagua, definiéndose 3 tramos:

- Tramo Ortuella-Trapagarán (de forma abreviada OT)
- Tramo Trapagarán-Barakaldo (de forma abreviada TB)
- Tramo Barakaldo-Bilbao (de forma abreviada BB)



Figura 38: Puntos de control de piezometría en la Fase 1 (en rojo inoperativos)

En total se trata de un conjunto de 19 puntos (Figura 38), pero 2 de ellos han quedado inoperativos (OT-3 en la cantera de Ortuella y TB-3 en Gorostiza).

Aparte de estos puntos, es necesario disponer de puntos de apoyo. Para ello se ha llevado a cabo un Inventario de Puntos de Agua en el que se extrae un conjunto de puntos con valor piezométrico (manantiales y cauces). Adicionalmente se han incluido otros puntos de apoyo para facilitar la interpolación. El resultado final se muestra en la siguiente figura (Figura 39), y será la base para el cálculo de la carga piezométrica sobre el futuro túnel.

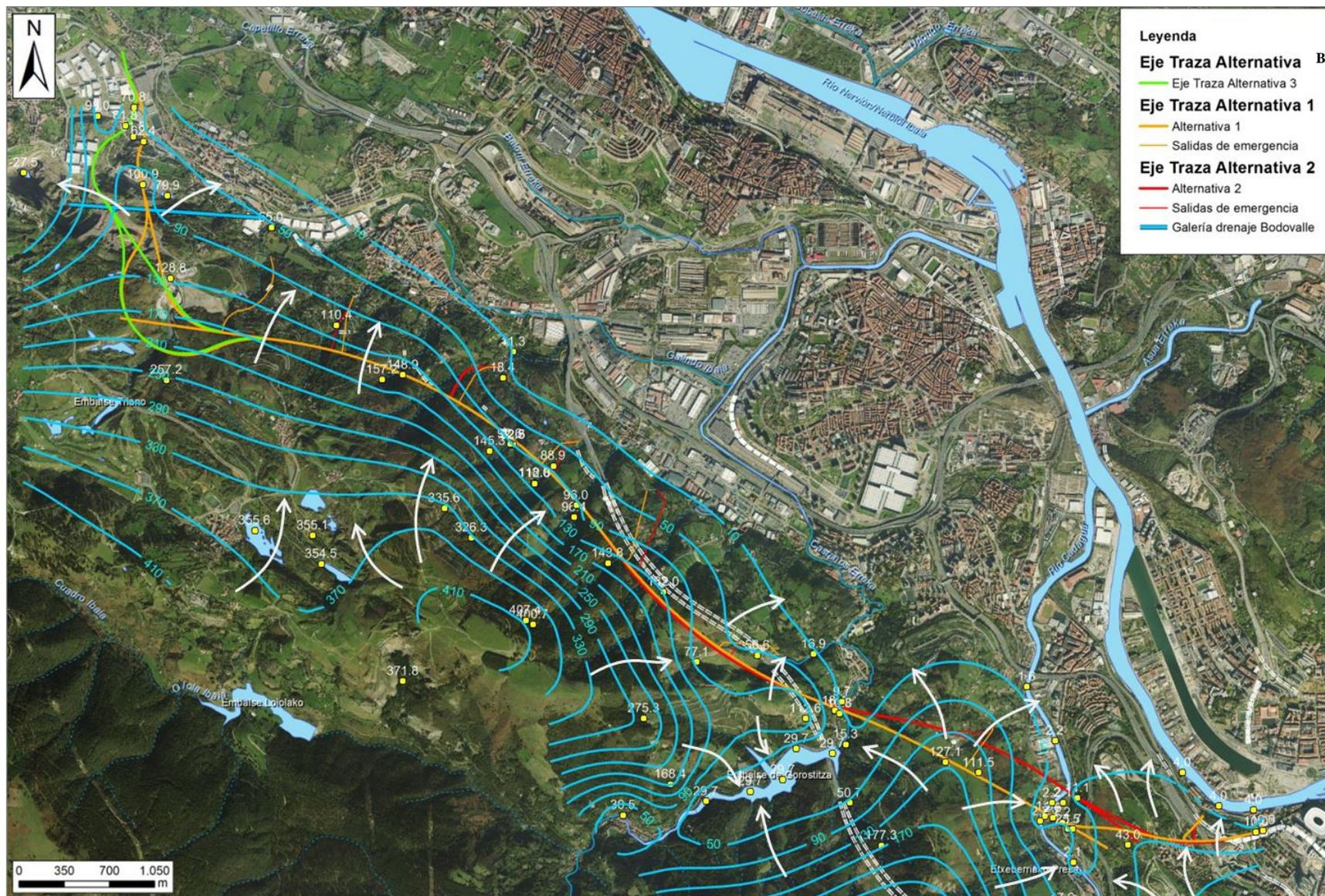


Figura 39: Isopiezométricas generadas a partir de la piezometría considerada

Esta piezometría da una visión general de la traza. Si se ajusta al sector de Ortuella, y se centra en el sector de la alternativa 3, se observa lo siguiente (Figura 40):

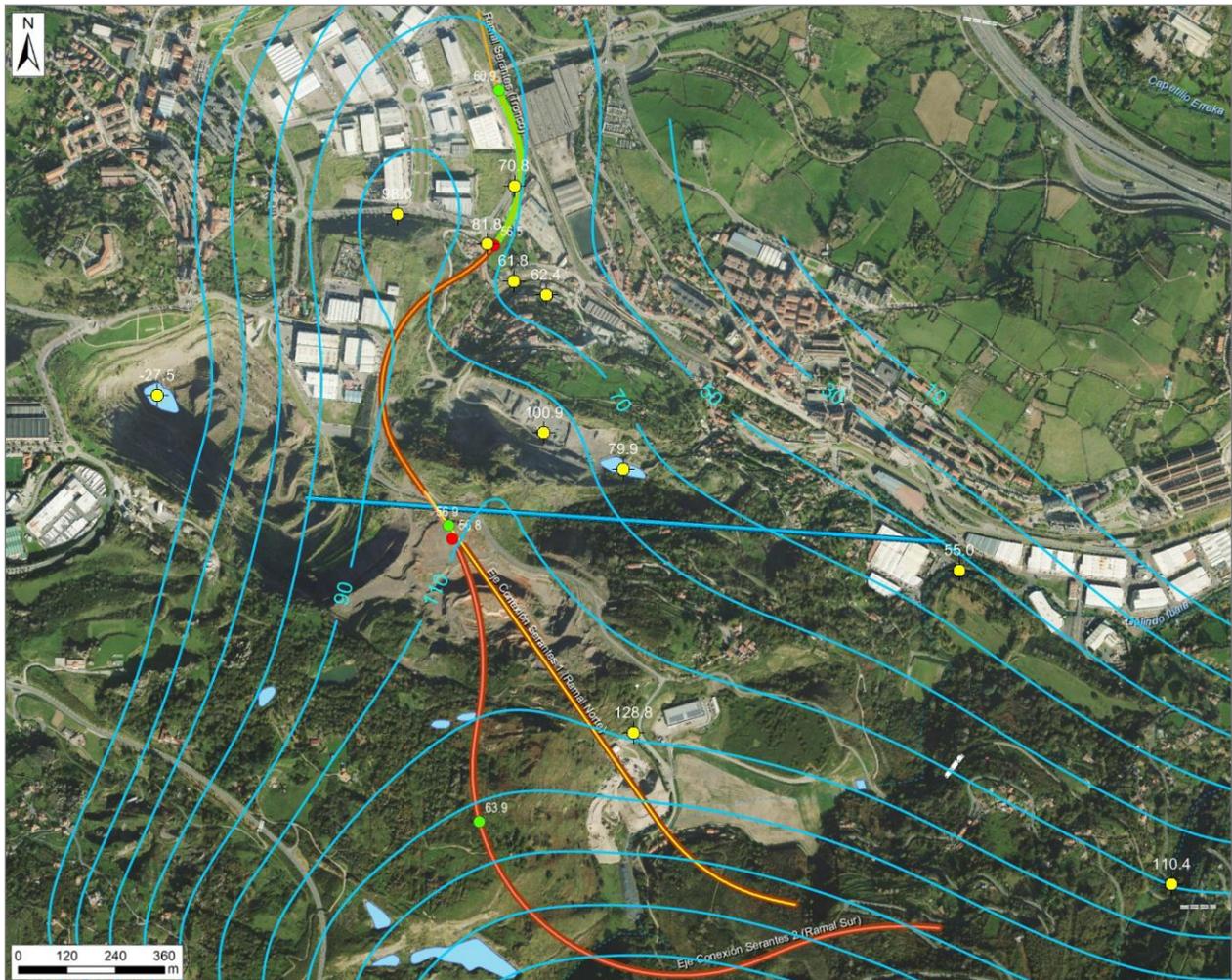


Figura 40: Detalle de la piezometría del sector de Ortuella (alternativa B, isopiezas cada 20 m)

- De acuerdo con la información de los últimos sondeos ejecutados (SPZ-1 y SPZ-2) la piezometría presenta un umbral que actúa como divisoria de aguas subterráneas impuesta por la cota de Bodovalle (-27.5 msnm).
- La traza, en su ascenso a los ramales Norte y Sur, asciende por la divisoria hasta girar y orientarse de forma paralela a la piezometría, la cual muestra cotas 180-200 msnm mientras que el punto de mayor cota de la traza es 63,9 msnm.

En los siguientes apartados se hace una estimación de los caudales de flujo en este tramo, en base a esta piezometría.

## 5. ESTIMACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE GOODMAN (1965)

Se trata de un método clásico para la estimación de los caudales de flujo hacia túneles en base a la permeabilidad, carga hidráulica y radio del túnel. Existen algunos casos aplicados previamente en la zona, como por ejemplo la estimación en los túneles de Argalarío y Mesperuza<sup>1</sup> de la Variante Sur Metropolitana:

Túnel	Litología	K (cm/s)	H <sub>0</sub> (m)	Q unitario	
				m <sup>3</sup> /s/m	l/s/m
Argalarío (1815m)	Areniscas (Fm 1A) - Fm Ereza, Areniscas limolíticas (Fm 1B)	3.15 x 10 <sup>-5</sup>	33.7	3.43 x 10 <sup>-5</sup>	0.034
	Areniscas (Fm 1A) Fm Ereza	3.15 x 10 <sup>-5</sup>	36	3.54 x 10 <sup>-5</sup>	0.035
	Areniscas limolíticas (Fm 1A) Fm Ereza	4.3 x 10 <sup>-5</sup>	5.0	3.31 x 10 <sup>-4</sup>	0.331
			10.0	3.68 x 10 <sup>-5</sup>	0.037
Mesperuza (655m)	Areniscas limolíticas (Fm 1A) Fm Ereza	7.9 x 10 <sup>-5</sup>	49.6	1.06 x 10 <sup>-4</sup>	0.106
		6.3 x 10 <sup>-7</sup>	49.6	9.08 x 10 <sup>-7</sup>	0.001

En el caso del túnel de Argalarío, los cálculos se basan en un sondeo (ST-2). Como se puede observar en la tabla, todos los materiales existentes en Argalarío corresponden a la formación Ereza (limolitas y areniscas), a la cual se ha asignado una permeabilidad entre 3.15 y 4.3 x 10<sup>-5</sup> cm/s (K media-baja).

A partir de esta tabla se pueden hacer dos apreciaciones relevantes:

- Si se aplican los valores unitarios obtenidos (0.034-0.035 l/s) a toda la longitud del túnel, se obtienen valores excesivos (61-63 l/s).
- En el caso de la medida con menor carga (H<sub>0</sub>=5m), se puede observar que el caudal unitario obtenido es muy superior al obtenido con permeabilidades similares y cargas muy superiores. Esto se explica porque en el cálculo mediante Goodman, cuando la carga sobre el túnel se aproxima al radio de influencia (H<sub>0</sub>=r) comienzan a dispararse los valores de caudal debido a que el logaritmo se aproxima a 0 (es decir la relación  $\frac{2 \cdot H_0}{r}$  se aproxima a 1, o lo que es lo mismo, 2H<sub>0</sub>=r). De acuerdo con Goodman:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot H_0}{2.3 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot H_0}{r}\right)}$$

<sup>1</sup> Aunque no se cita en el documento, se deduce a partir del cálculo mediante Goodman y los resultados obtenidos, que el radio de influencia aplicado es de 9.6 m, el cual parece excesivo.

Donde,

- K es la permeabilidad (m/s)
- $H_0$  es la carga o columna de agua (m)
- r es el radio del túnel

En la siguiente figura (Figura 41), se muestra lo que ocurre cuando los valores de carga se aproximan al valor del radio del túnel<sup>2</sup>. Como se puede ver, especialmente a partir de valores de carga iguales o inferiores al radio del túnel, los valores de caudal crecen exponencialmente hasta que  $2H_0=r$  momento en el que se anula el denominador. Por debajo de estos valores, los caudales obtenidos son negativos.

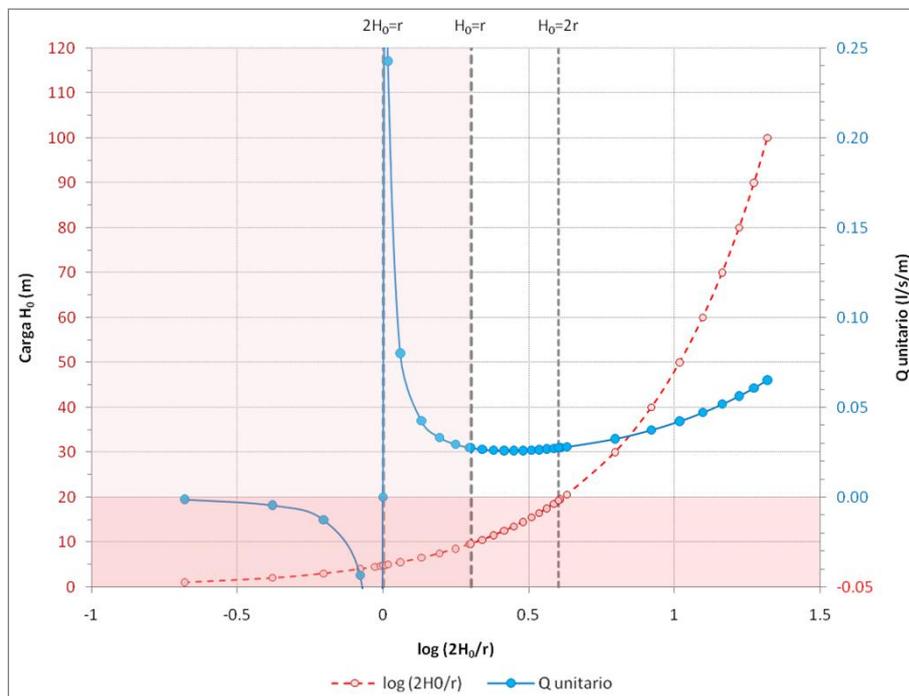


Figura 41: Análisis de la influencia en el caudal resultante por la proximidad de la carga al radio del túnel

En otros casos, se aplica una fórmula similar cuyos resultados son similares en cargas elevadas, pero difieren notablemente en cargas bajas:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot H_0}{\ln\left(\frac{2 \cdot H_0 - r}{r}\right)}$$

<sup>2</sup> Se han asumido para el cálculo los valores reflejados para Argalarío, es decir,  $K=3.5 \times 10^{-7}$  m/s y radio de túnel  $r=9.6$  m.

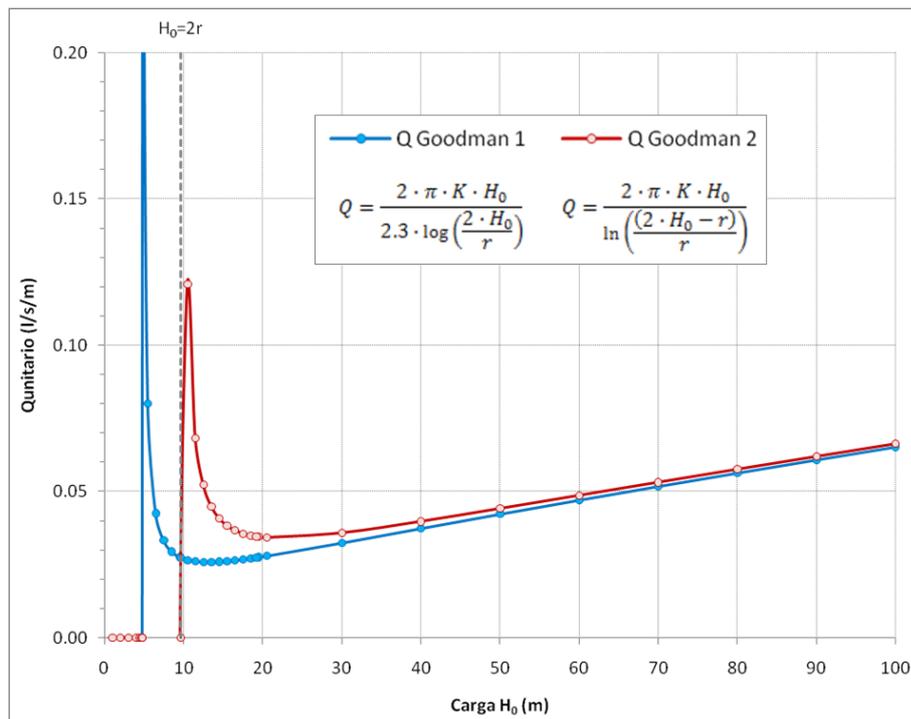


Figura 42: Análisis de la influencia en el caudal resultante por la proximidad de la carga al radio del túnel según dos cálculos diferentes

Por lo tanto, deben despreciarse los valores bajos de carga por la incidencia que ello tiene en los caudales obtenidos (recomendado  $H_0 > r$ ).

Finalmente, es importante tener en cuenta que desde que se ejecuta el túnel comienza un proceso de drenaje que evoluciona en el tiempo hasta alcanzar una estabilización. La duración de este periodo va a depender múltiples factores, uno de los cuales es el Coeficiente de Almacenamiento (S) y otro, por supuesto, es el propio tiempo transcurrido hasta que se alcanza el régimen permanente. Adicionalmente, el propio diseño constructivo del túnel facilita la reducción de caudales en el mismo.

Generalmente se suele aplicar un porcentaje basado en funciones de agotamiento. Goodman propone la aplicación del siguiente método:

$$Q = \sqrt{\frac{8 \cdot C}{3} \cdot K \cdot H_0^3 \cdot S \cdot t}$$

Donde,

- S es el coeficiente de almacenamiento
- t es el tiempo
- C es un coeficiente con valor 0.75 (para Goodman)

## 6. PARÁMETROS DEL TÚNEL

De acuerdo con los datos de proyecto, se plantea un tronco susceptible de recibir a futuro circulaciones en alta velocidad de hasta 250 km/h (en cumplimiento de las Recomendaciones del Ministerio de Fomento para “dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos de presión sobre viajeros”). Esto implica que para una velocidad de 250 km/h y un túnel en vía doble, la sección mínima de túnel (m<sup>2</sup>) para una variación máxima de presión durante el periodo de tránsito del tren en el túnel,  $D_p(t)$ , de 10 kPa es de 75m<sup>2</sup>.

A pesar de ello, para la definición de la sección libre del túnel se ha tenido en cuenta tanto cuestiones geométricas como de espacio para otros elementos e instalaciones. Se toma la recomendación de la IGP 4.1 (2011), que dice que la sección libre mínima recomendada para una longitud de túnel de vía doble mayor de 4 km es de 85 m<sup>2</sup>. Suponiendo una sección circular de sección  $S=85$  m<sup>2</sup>, se obtiene un radio de túnel de:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{85}{\pi}} = 5.2 \text{ m}$$

En cuanto a las salidas de emergencia, que también suponen excavación de túnel y por lo tanto posible zona de fluencia de agua, de acuerdo con especificaciones de proyecto la anchura es de 4 m, por lo que se asigna un radio de 2 m.

Un aspecto importante sobre los túneles son las pendientes que favorecen la concentración de aguas de drenaje y su conducción a zonas de salida por gravedad.

Si se analizan la alternativa 3, se comprueba que:

- El emboquille (Ramal Serantes) actúa como punto de drenaje (punto bajo en PK 0+600, a cota 56.5 msnm). A este punto llegarán las aguas de drenaje de una parte del Ramal Sur.
- El Ramal Norte presenta pendiente descendente hacia el ramal de Serantes-Olabeaga, por lo que prácticamente todo el drenaje se dirigirá hacia ese tramo.
- El Ramal Sur tiene un umbral a cota 63.8 msnm (PK 1+300), por lo que una parte del drenaje se dirige hacia el emboquille y otra hacia el ramal Serantes-Olabeaga.

Las siguiente figura sintetizan los puntos altos y bajos de esta alternativa (**Figura 43**):

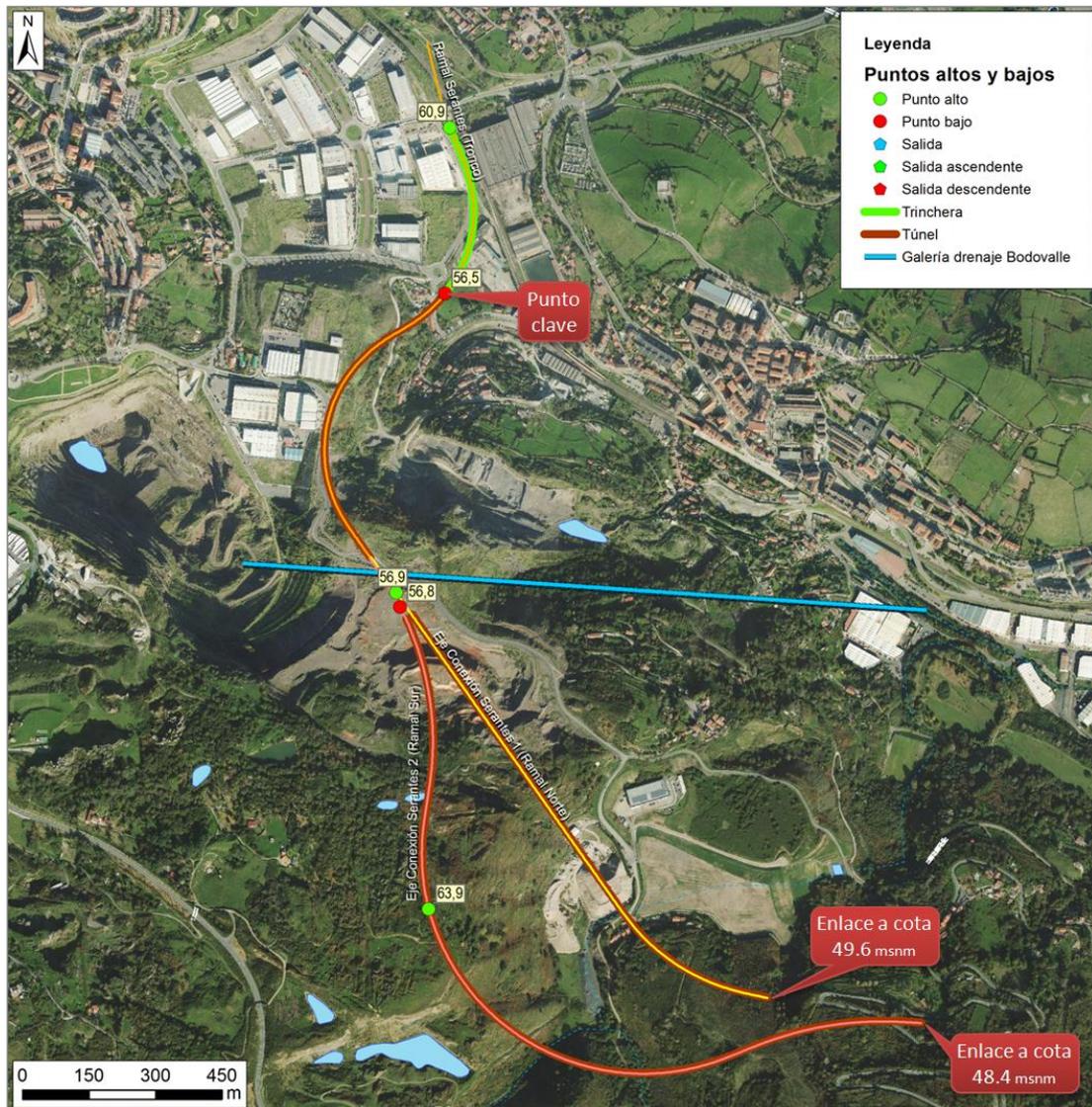


Figura 43: Cotas de rasante en puntos altos y bajos de la alternativa B

Como se puede observar en la figura, la rasante del Ramal Serantes pasa por encima de la galería de drenaje de Bodovalle (prácticamente en la conexión con los ramales Norte y Sur), la cual se halla a cota 44.5 msnm, desembocando en el río Granada a cota 38.20 msnm (Figura 44):

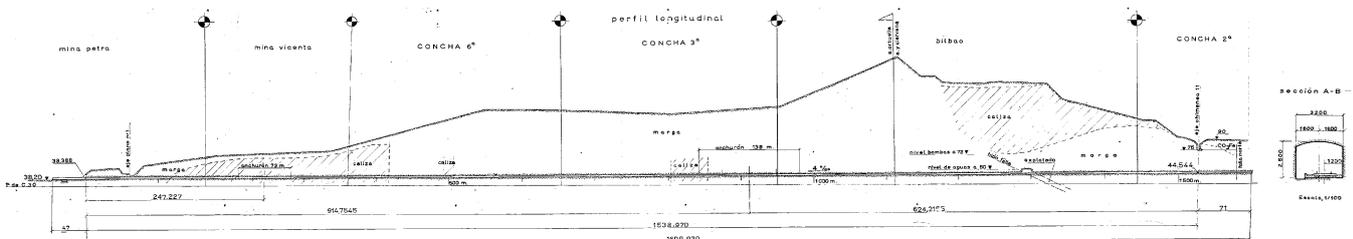


Figura 44: Perfil de la galería de drenaje de Bodovalle (EVE)

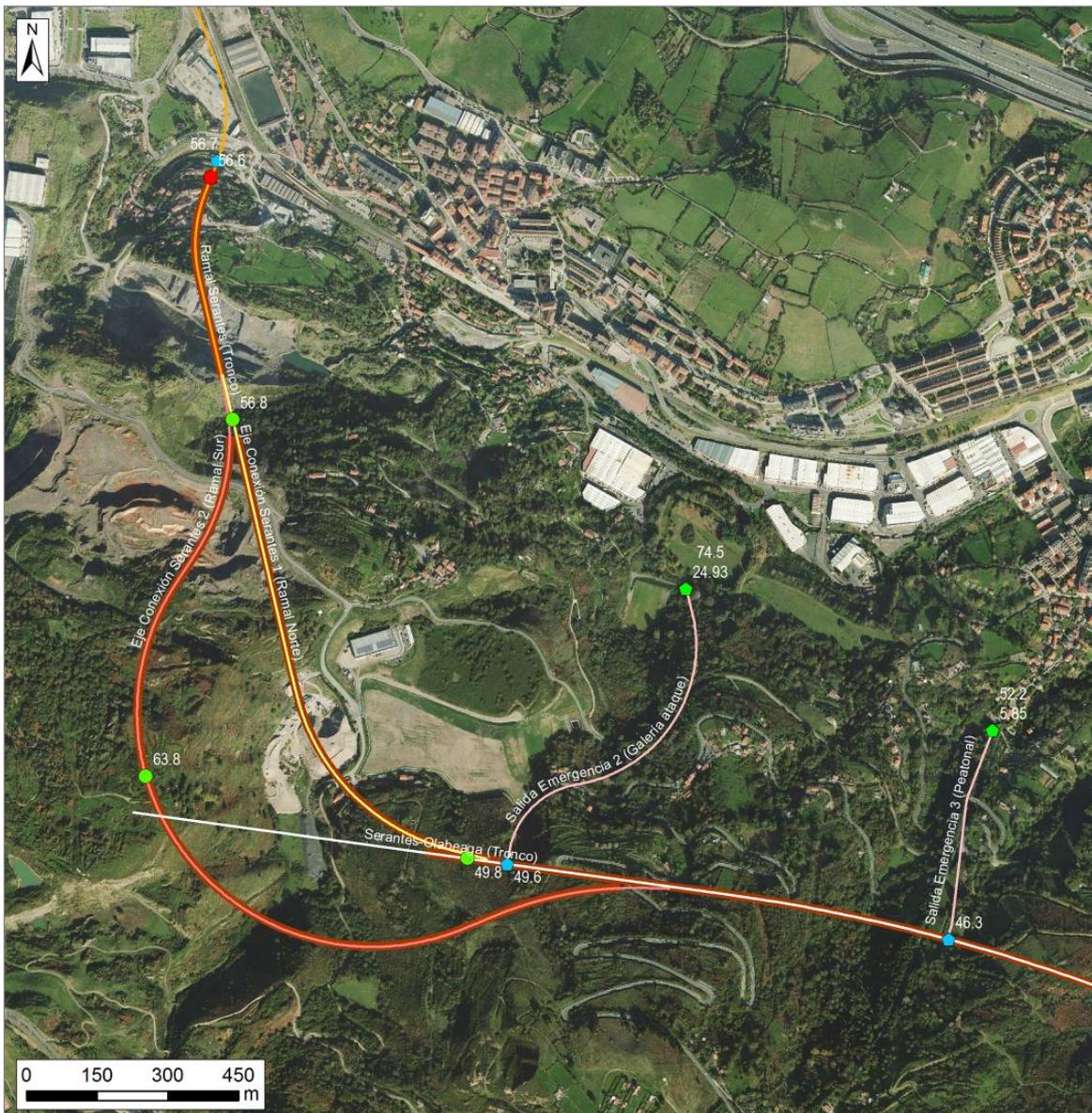


Figura 45: Puntos de mayor cota en los ramales Norte y Sur de la Alternativa A

## 7. ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN LOS TÚNELES ALTERNATIVA A

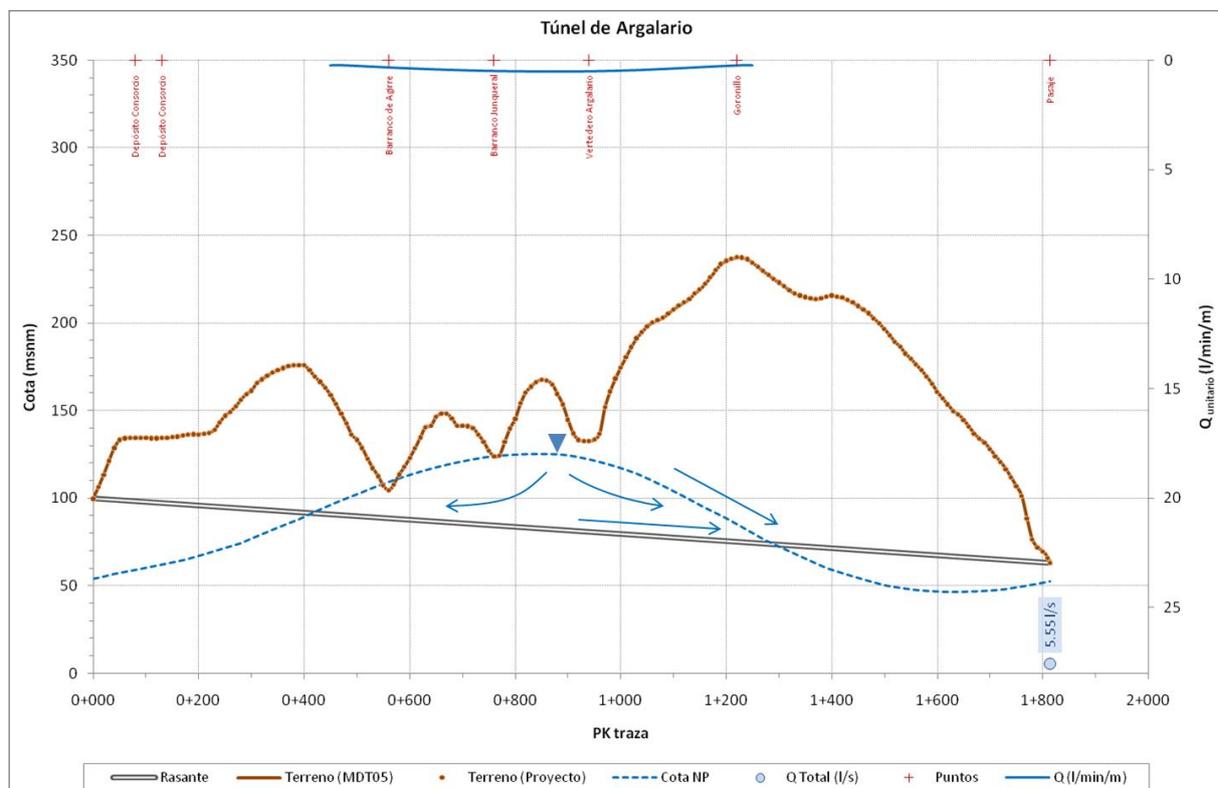
En base a todo lo visto anteriormente, se realiza una estimación preliminar de los caudales previsibles por tramos, teniendo presente que serán necesarios ajustes futuros en:

- Permeabilidad de los tramos. Podrían llegar a establecerse valores de permeabilidad según carga existente (se podría establecer una función que relacione permeabilidad y profundidad), disposición estructural de las capas, grado de alteración de las formaciones.
- Carga piezométrica sobre la rasante. Aunque se dispone de numerosos puntos de control (sondeos, cauces y manantiales) existen zonas en las que es necesario realizar un "ajuste fino", con el fin de que el algoritmo de interpolación (mínima curvatura) se adapte mejor a la morfología del relieve. Para ello es necesario eliminar algunos puntos que realmente no correspondan a aguas subterráneas, e introducir puntos de apoyo para mejora de la piezometría.

Se analizan a continuación los caudales de fluencia por tramos. En primer lugar, se ha realizado un análisis de calibración en el túnel de Argalarío, dado que los caudales de drenaje se conocen de forma aproximada.

### 7.1. TÚNEL DE ARGALARIO

Este túnel atraviesa materiales de la formación Ereza y tiene una pendiente constante hacia el Este (arroyo Pasaje). De acuerdo con los datos de campo, el nivel piezométrico se haya muy próximo a los fondos de valle (Aguirre, Junqueral y vertedero de Argalarío) (**Figura 46**).



**Figura 46:** Perfil del túnel de Argalarío

De acuerdo con las estimaciones realizadas, el caudal de drenaje es de 5.55 l/s. En visitas realizadas al

túnel este dato parece ser coherente (Figura 47).

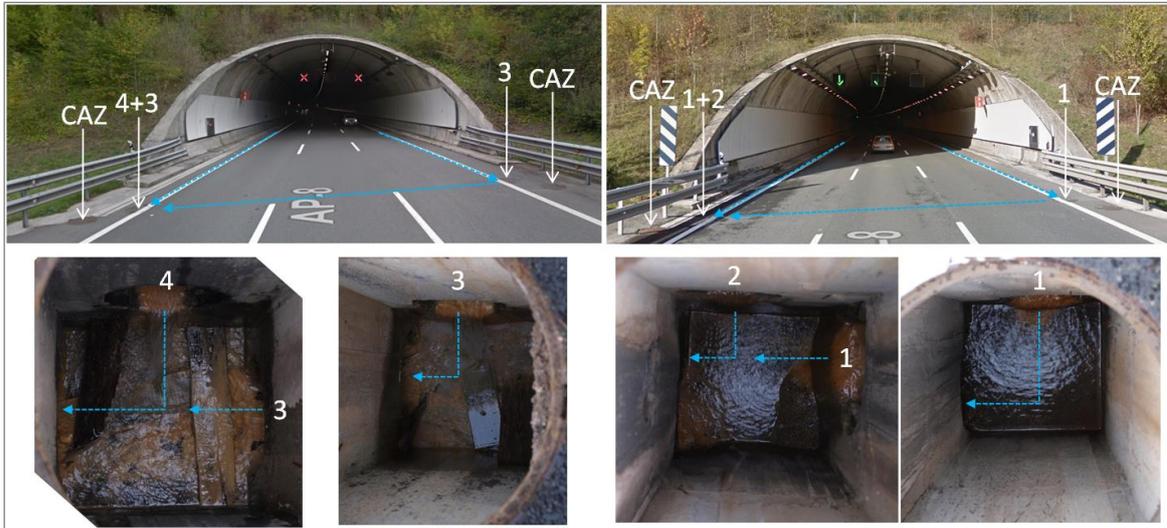


Figura 47: Arquetas de drenaje de los túneles de Argalarío (sentido Guipúzcoa a la izquierda y sentido Cantabria a la derecha)

## 7.2. TRONCO DEL RAMAL SERANTES

En este tramo tiene lugar el paso de falso túnel a túnel en mina, por lo que en el punto bajo tendrá lugar la llegada de agua de drenaje desde los puntos altos de los ramales Norte y Sur. Debido a la presencia de calizas, se prevé elevada permeabilidad muy cerca de la boca del túnel en mina, estimándose el caudal en 5.03 l/s (Figura 51).

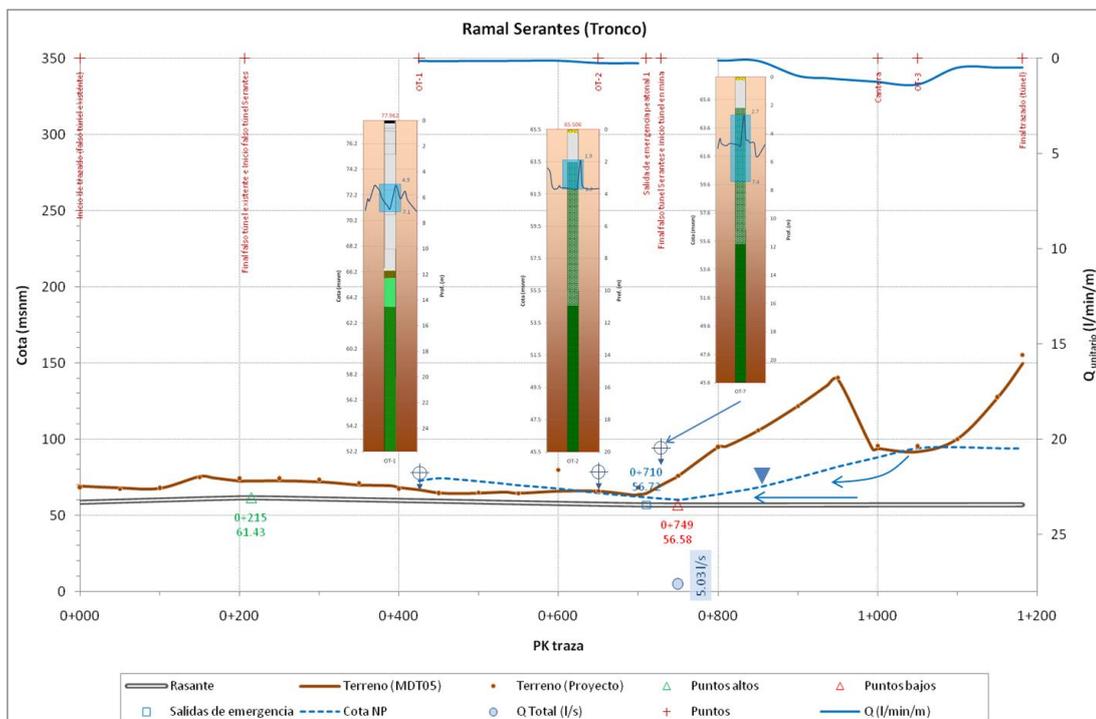


Figura 48: Perfil del Ramal de Serantes

Como se puede observar en el perfil, existe una cierta disparidad en la carga piezométrica en la zona de

falso túnel, por lo que no se ha realizado el cálculo en ese lugar, hasta disponer de más información piezométrica.

Este perfil es común a las alternativas 1 y 2.

### 7.3. EJE DE CONEXIÓN RAMAL SERANTES 1 (RAMAL NORTE)

Aunque la piezometría se orienta hacia la boca de salida del tronco del ramal de Serantes, a partir del PK 0+098 la pendiente del túnel descende hacia el tronco principal del tramo Serantes Olabeaga (Figura 52). La mayor parte del túnel discurre por materiales de la formación Ereza. Se obtiene un caudal de drenaje de 0.77 l/s hacia el Ramal Serantes y 15.95 l/s hacia el tronco principal del tramo Serantes-Olabeaga.

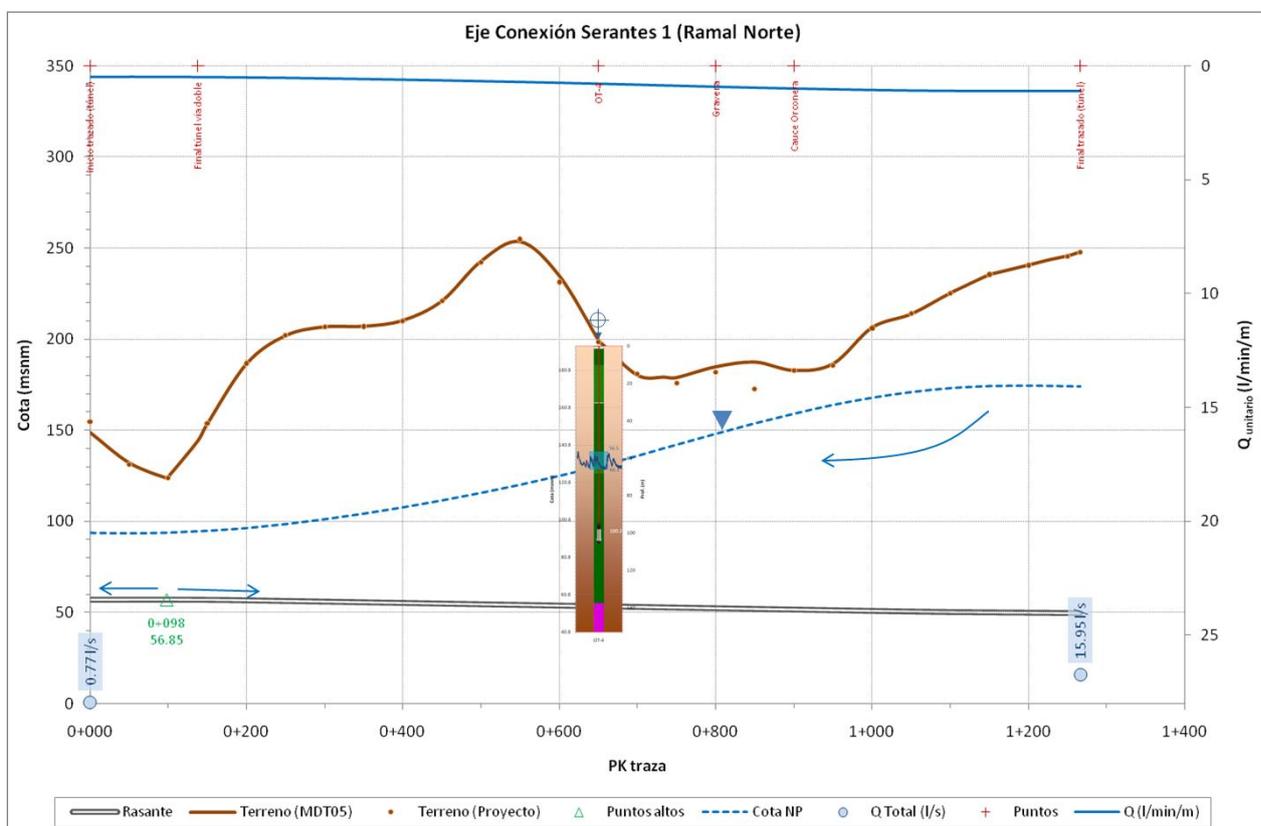


Figura 49: Perfil del eje de conexión Serantes 1 (Ramal Norte)

### 7.4. EJE DE CONEXIÓN RAMAL SERANTES 2 (RAMAL SUR)

Este eje de conexión discurre a cota elevada (la más alta de la traza, a 63.82 msnm) y atraviesa una zona extremadamente compleja:

- Presencia de abundante caliza (formación Arraiz) estratificada en bancos métricos a decamétricos.
- Además tiene lugar el contacto tectónico entre la formación Ereza y Tejera.

- Existe una zona de intensa tectonización con importante silicificación.
- Importante presencia de zonas de fractura.

Es previsible que la permeabilidad de este sector sea elevada, lo cual afecta notablemente a los caudales de fluencia del futuro túnel. La primera estimación apunta a caudales muy importantes (Figura 53), por lo que esta zona debe estudiarse con especial cuidado. En principio se obtienen 27.11 l/s que se dirigen hacia el tronco de Serantes y 20.03 que se dirigen hacia el tronco principal.

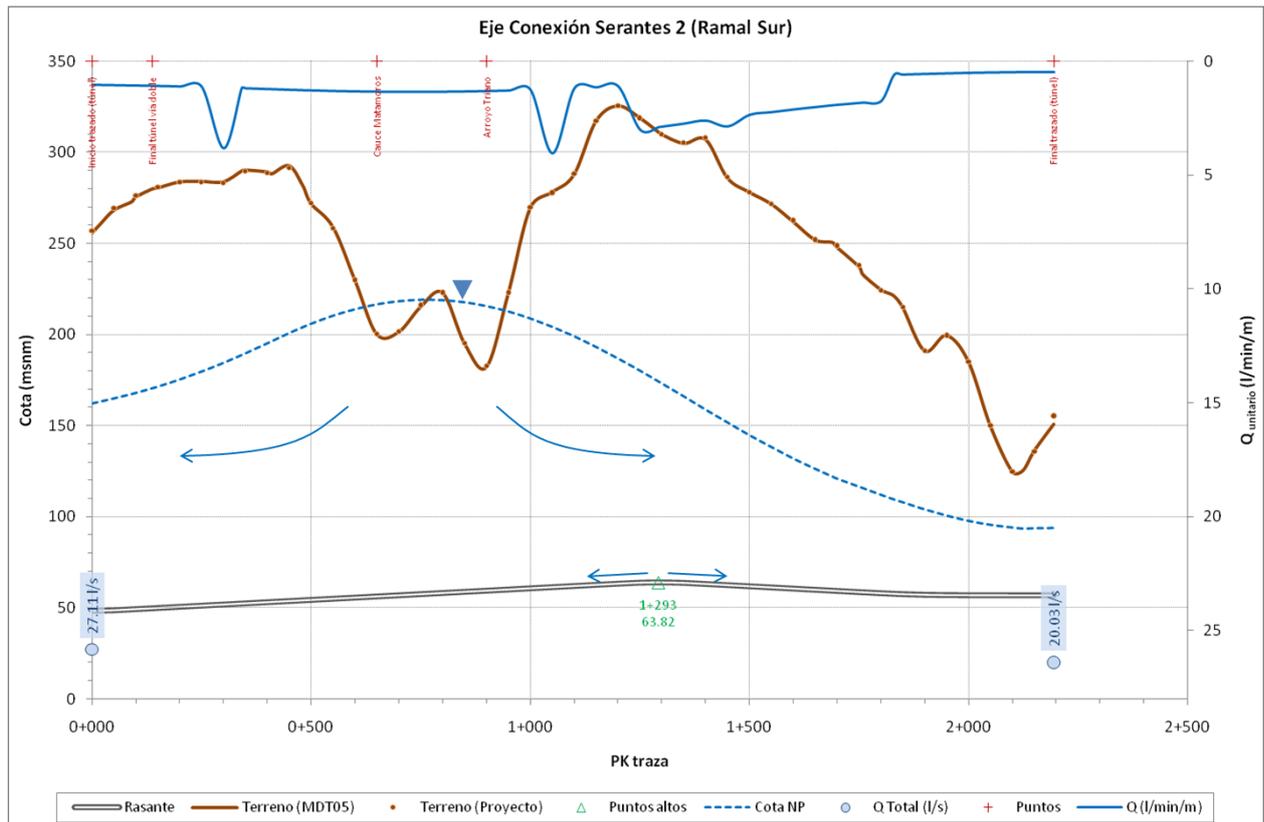


Figura 50: Perfil del eje de conexión Serantes 2 (Ramal Sur)

## 8. ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN LOS TÚNELES ALTERNATIVA B

### 8.1. TRONCO DEL RAMAL SERANTES ALTERNATIVA B

En este tramo tiene lugar el paso de trinchera a túnel en mina, por lo que en el punto bajo tendrá lugar la llegada de agua de drenaje desde los puntos altos de los ramales Norte y Sur. Debido a la presencia de calizas, se prevé elevada permeabilidad muy cerca de la boca del túnel en mina, estimándose el caudal en 5.51 l/s (Figura 51).

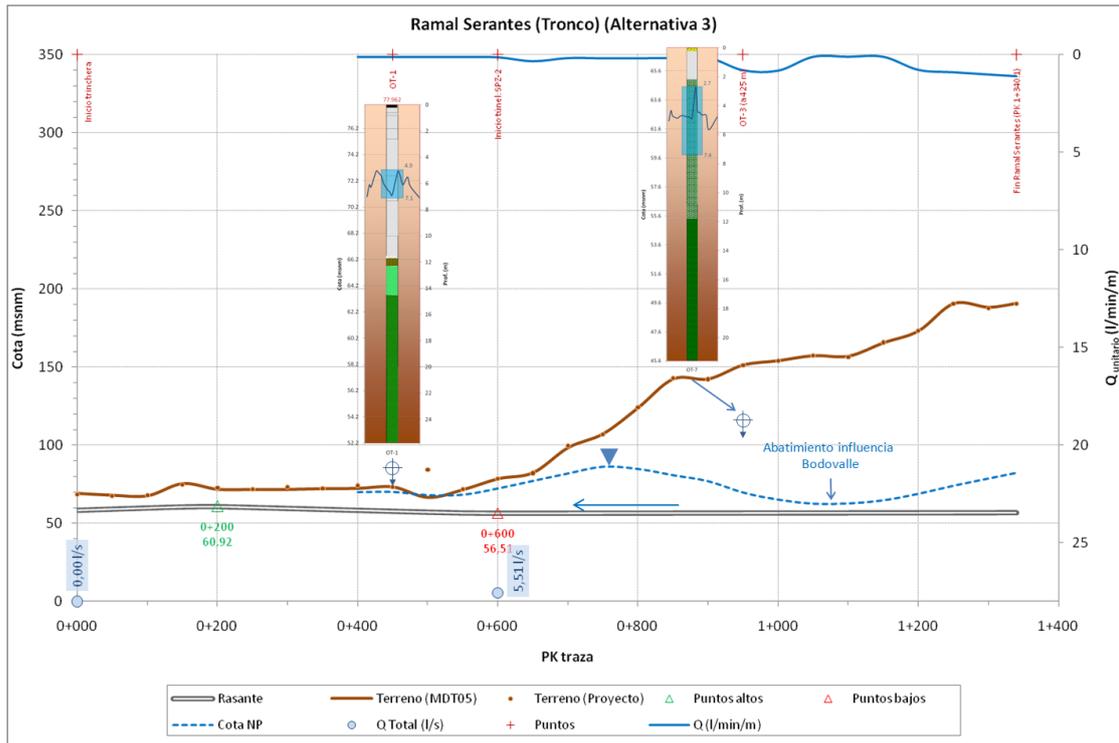


Figura 51: Perfil del Ramal de Serantes

Como se puede observar en el perfil, el nivel piezométrico en la zona de trinchera se halla muy próximo a la superficie del terreno, como así se ha detectado en los piezómetros OT-1, SPZ-1 y SPZ-2. Se ha extrapolado la medida del piezómetro OT-3 ya desaparecido (cantera de Saugal).

También se ha reflejado la influencia del bombeo que se realiza en Bodovalle.

### 8.2. EJE DE CONEXIÓN RAMAL SERANTES 1 (RAMAL NORTE)

Aunque la piezometría se orienta hacia la boca de salida del tronco del ramal de Serantes, a partir del PK 0+100 la pendiente del túnel desciende hacia el tronco principal del tramo Serantes Olabeaga (Figura 52). La mayor parte del túnel discurre por materiales de la formación Ereza, pero se atraviesa una zona con caliza entre los PP.KK. 0+500 y 0+600. Posteriormente se atraviesa una zona tectonizada entre los PP.KK. 0+800 y 0+950.

Se obtiene un caudal de drenaje de 0.72 l/s hacia el Ramal Serantes y 16.08 l/s hacia el tronco principal

del tramo Serantes-Olabeaga.

En la figura también se observa la ubicación de la galería de drenaje de Bodovalle, muy próxima a la conexión con el Ramal Serantes.

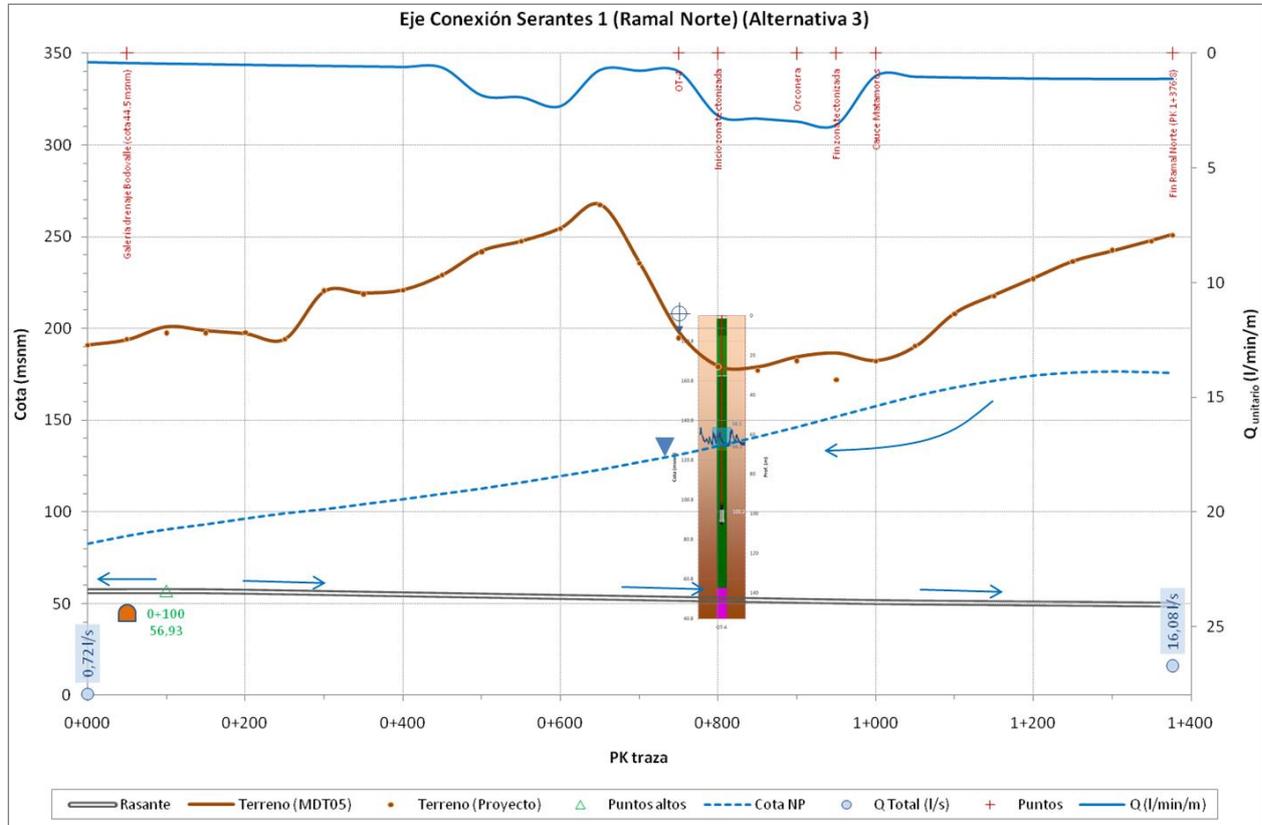


Figura 52: Perfil del eje de conexión Serantes 1 (Ramal Norte)

### 8.3. EJE DE CONEXIÓN RAMAL SERANTES 2 (RAMAL SUR)

Este eje de conexión discurre a cota elevada (la más alta de la traza, a 63.86 msnm) y atraviesa una zona extremadamente compleja desde el punto de vista geológico:

- Presencia de abundante caliza (formación Arraiz) estratificada en bancos métricos a decamétricos.
- Además tiene lugar el contacto tectonizado entre la formación Ereza y Tejera.
- Existe una zona de intensa tectonización con importante silicificación.
- Importante presencia de zonas de fractura.

Es previsible que la permeabilidad de este sector sea elevada, lo cual afecta notablemente a los caudales de fluencia del futuro túnel. La primera estimación apunta a caudales muy importantes (Figura 53), por lo que esta zona debe estudiarse con especial cuidado. En principio se obtienen 10.62 l/s que se dirigen hacia el tronco de Serantes y 25.89 l/s que se dirigen hacia el tronco principal.

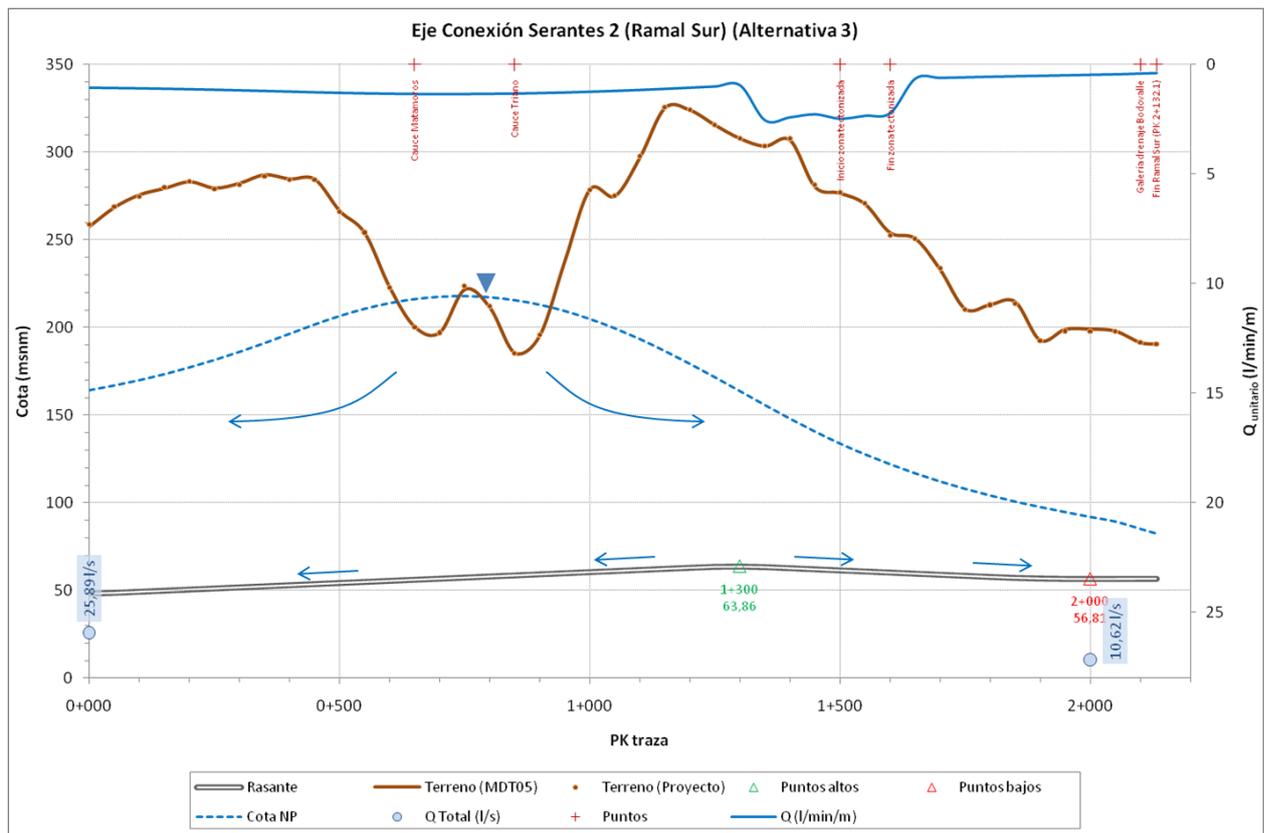


Figura 53: Perfil del eje de conexión Serantes 2 (Ramal Sur)

## 9. SÍNTESIS DE RESULTADOS

En la siguiente figura (Figura 54) se sintetizan los resultados obtenidos:

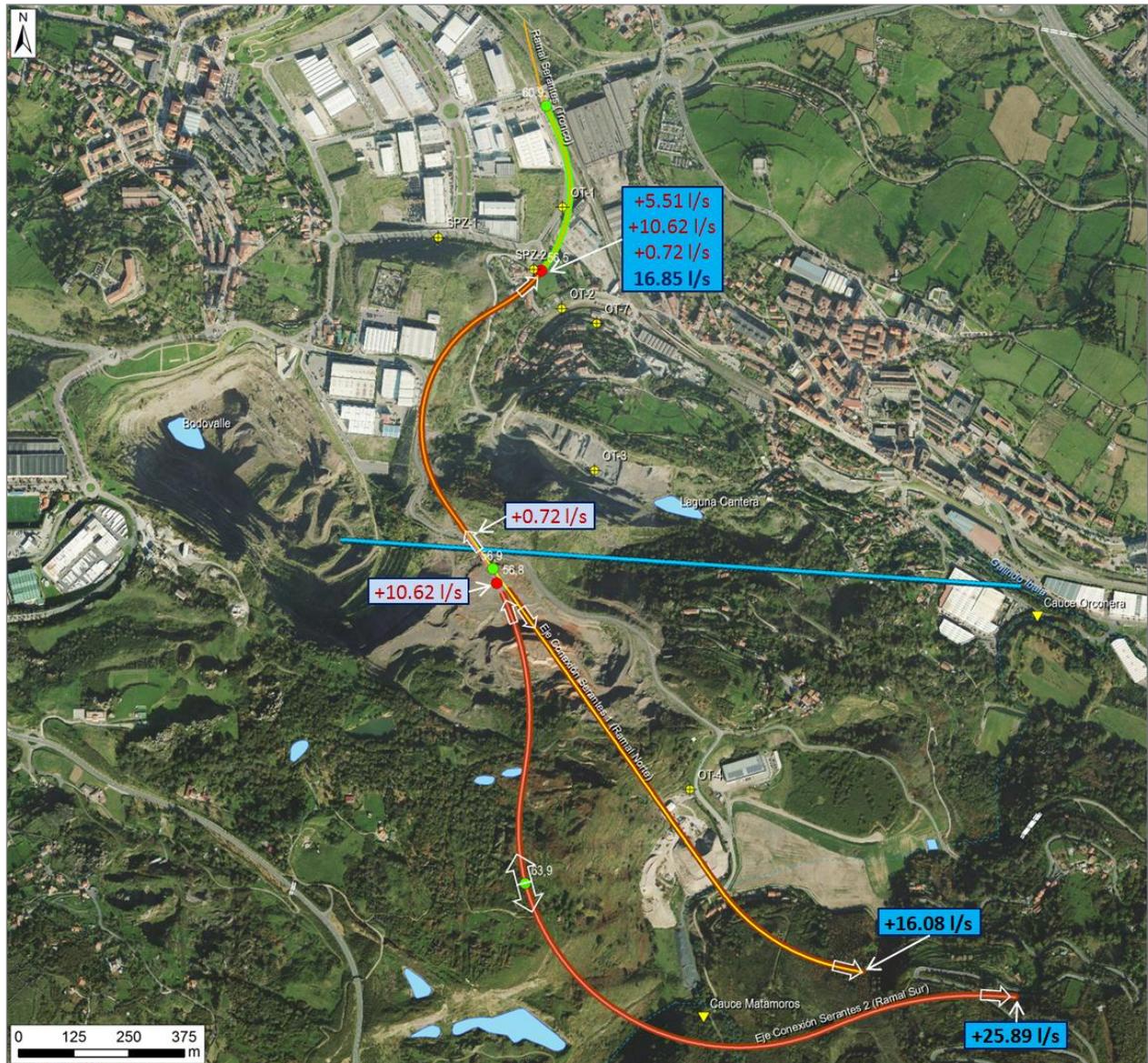


Figura 54: Síntesis de caudales de drenaje obtenidos para la alternativa 3

- 16.85 l/s hacia Ortuella, hacia el Ramal Serantes.
- 25.89 l/s hacia el inicio del tronco de Serantes-Olabeaga procedentes del Ramal Sur.
- 16.08 l/s hacia el inicio del tronco de Serantes-Olabeaga procedentes del Ramal Norte.

Si se comparan los resultados obtenidos con los obtenidos en los mismos tramos para las alternativas 1 y 2:

- En la Alternativa A en el Ramal Sur se generan 20.03 l/s hacia el Norte (Ramal Serantes) y 27,11 l/s hacia el Sureste (Ramal Serantes-Olabeaga), frente a los 10.62 y 25.89 l/s de la Alternativa B. La diferencia radica en la cantidad de calizas y fracturas atravesadas en la alternativa A, sensiblemente superiores a las atravesadas en la alternativa B.
- En las alternativas A en el Ramal Norte se generan 0.77 l/s hacia el Norte (Ramal Serantes) y 15,95 l/s hacia el Sureste (Ramal Serantes-Olabeaga). Estas cifras son muy similares a las generadas en la alternativa B (0.72 y 16.08 l/s).
- En el Ramal Norte se genera un drenaje similar en todas las alternativas, con 5.03 l/s en la alternativa A, y 5.51 l/s en la alternativa B.

A la vista de estos datos, los caudales de drenaje generados hacia el tronco principal (Ramal Serantes-Olabeaga) son similares en todas las alternativas, con 41.97 l/s (16.08+25.89 l/s) en la alternativa B y 43.06 l/s (15.95+27.11 l/s) en la alternativa A.

La diferencia principal se halla en el drenaje acumulado hacia la boca del Ramal Serantes, donde se acumulan 16.85 l/s (10.62+0.72+5.51 l/s) en la alternativa B, frente a 25.83 l/s (20.03+0.77+5.03 l/s) en el caso de la alternativa A.

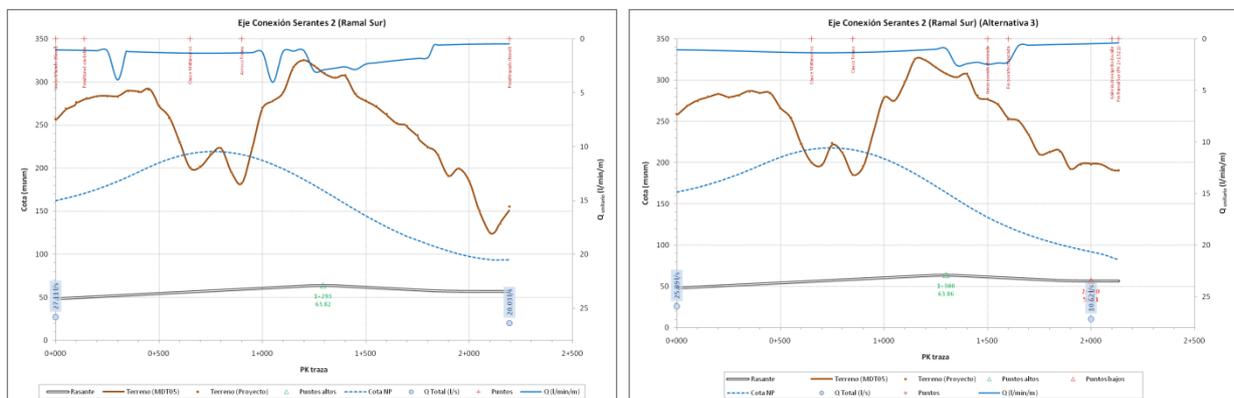


Figura 55: Comparativa de perfiles en el Ramal Sur entre la alternativa A (izquierda) y alternativa B (derecha)

## 10. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

Un aspecto importante de las aguas de drenaje es el quimismo de las mismas, impuesto por la circulación de agua a través del macizo rocoso. Si bien resulta muy complejo estimar el quimismo final de las aguas de drenaje, es posible estimar unas características en base a los datos obtenidos en campo.

Para la realización de este trabajo, se han realizado las siguientes actividades:

- Caracterización mediante la realización de parámetros físico-químicos in situ en cualquier punto de la zona. El objetivo es diferenciar posibles orígenes de agua, relaciones por mezcla, contaminación, etc. Se han medido los siguientes parámetros:
  - Conductividad: orienta sobre el contenido salino del agua, la cantidad total de iones disueltos. Las aguas más relacionadas con la recarga por infiltración de agua de lluvia son las que presentan menor contenido salino. Es un parámetro importante.
  - pH: acidez del agua. En general las aguas más superficiales presentan pH básico (por encima de 8) mientras que aguas que circulan por macizos areniscosos y formaciones con metales, pueden presentar una acidez notable. Es otro parámetro importante.
  - Eh: condiciones de oxidación-reducción del agua. Determina si el agua se halla en condiciones reductoras (ausencia de oxígeno, aguas estancadas) u oxidantes. Es un parámetro de menor relevancia hidrogeológica.
  - Temperatura: dependiendo de las características de los acuíferos es un parámetro importante. En circulaciones superficiales está muy influida por la situación meteorológica (se puede evaluar a partir de información de datalogger), mientras que en circulaciones profundas su variación es pequeña.
  - Oxígeno disuelto: en medios agitados (arroyos) los valores son elevados. Generalmente en sondeos y aguas de baja circulación los valores son muy bajos.
- Caracterización mediante la realización de análisis químicos en laboratorio. Se han seleccionado puntos que se han considerado representativos y/o útiles para el estudio, y en ellos se han analizado múltiples parámetros en laboratorio.

### 10.1. CARACTERIZACIÓN MEDIANTE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS IN SITU

Se dispone de multitud de medidas, todas ellas monitorizadas durante minutos hasta conseguir una estabilización multiparamétrica.

#### Conductividad

En la [Figura 56](#) se muestra la conductividad medida in situ en multitud de zonas. Se han clasificado los valores en 4 grupos:

- Valores inferiores a 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Entrarían en este grupo puntos que en principio parecen tener relación con aguas superficiales o de recarga por infiltración de agua de lluvia.
- Valores entre 250 y 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se trata de valores normales para aguas que circulan por este tipo de materiales.
- Valores entre 500 y 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se trata de aguas que empiezan a tener valores elevados por influencia del medio (escombreras, minería, contaminación, etc.).
- Valores superiores a 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se trata de aguas muy influidas por el medio, y se ha de determinar de donde proviene esa influencia.

Como se puede ver en la figura, la zona muestra una elevada conductividad probablemente en relación con estructuras y depósitos mineros. El valor más elevado se ha obtenido en el piezómetro OT-4 (1143  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

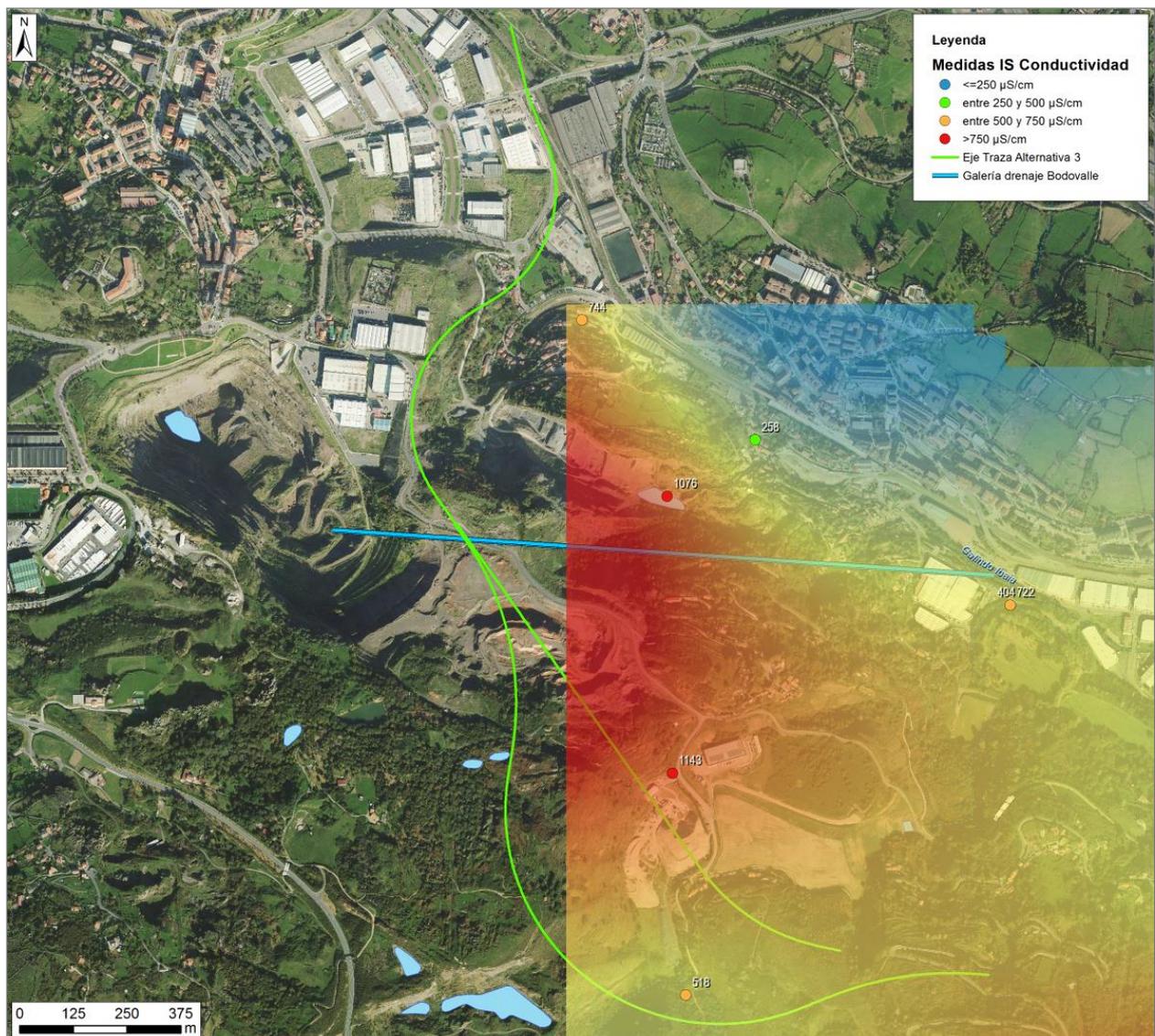
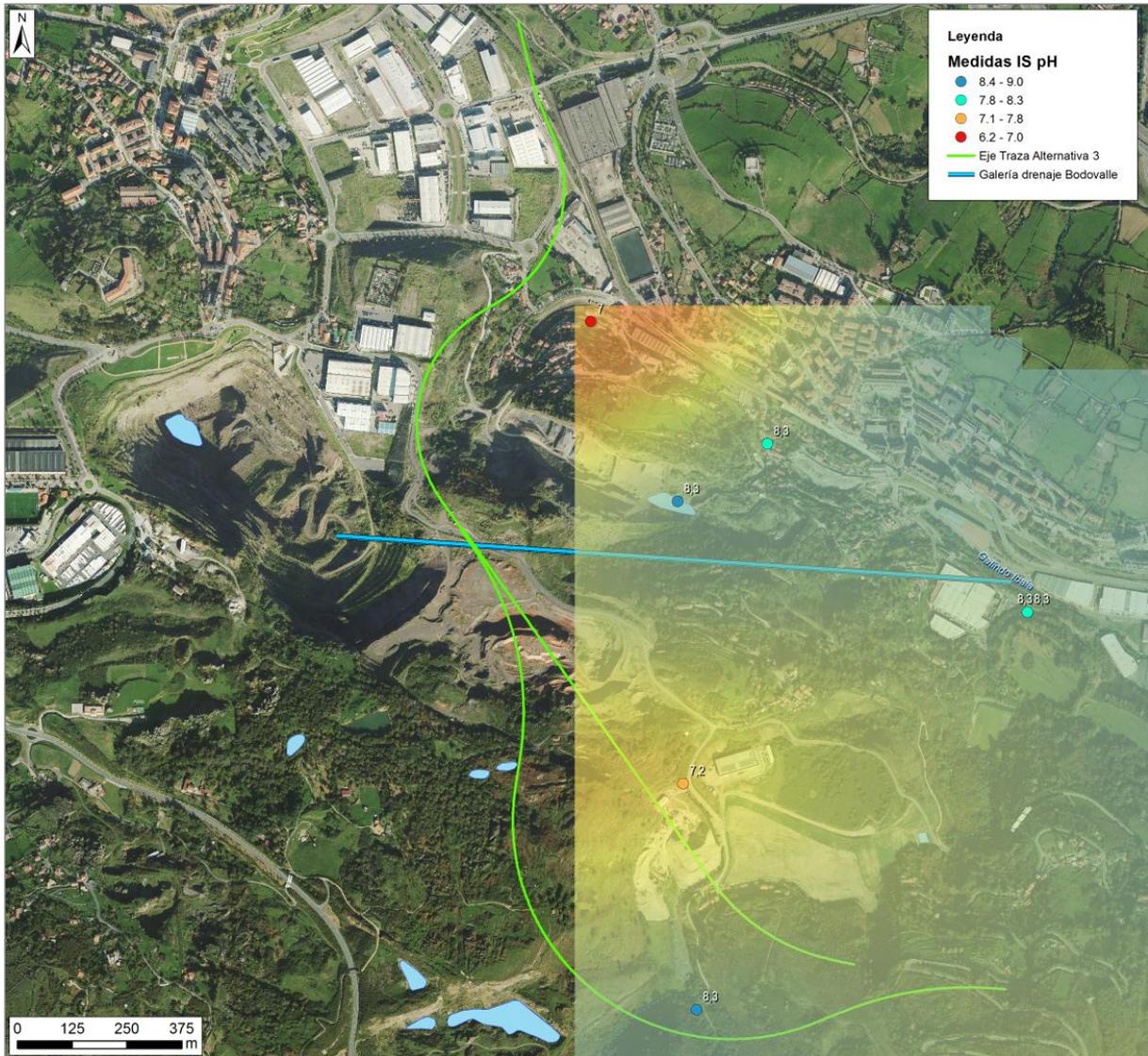


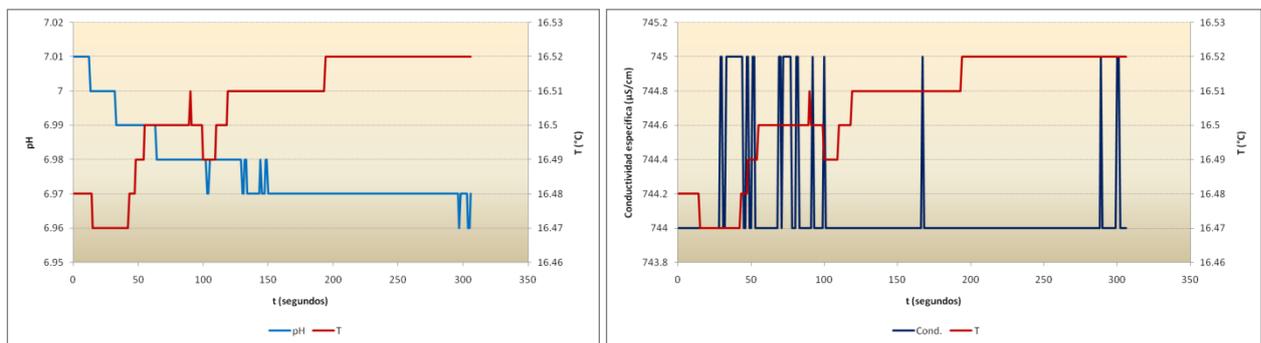
Figura 56: Medidas de conductividad realizadas in situ en la zona

**pH**

En la **Figura 57** se muestra la distribución de pH y se puede observar que el piezómetro OT-7, situado en el comienzo de la traza influye notablemente (**Figura 58**), presentando cierta acidez.



**Figura 57:** Medidas de pH realizadas in situ en la zona

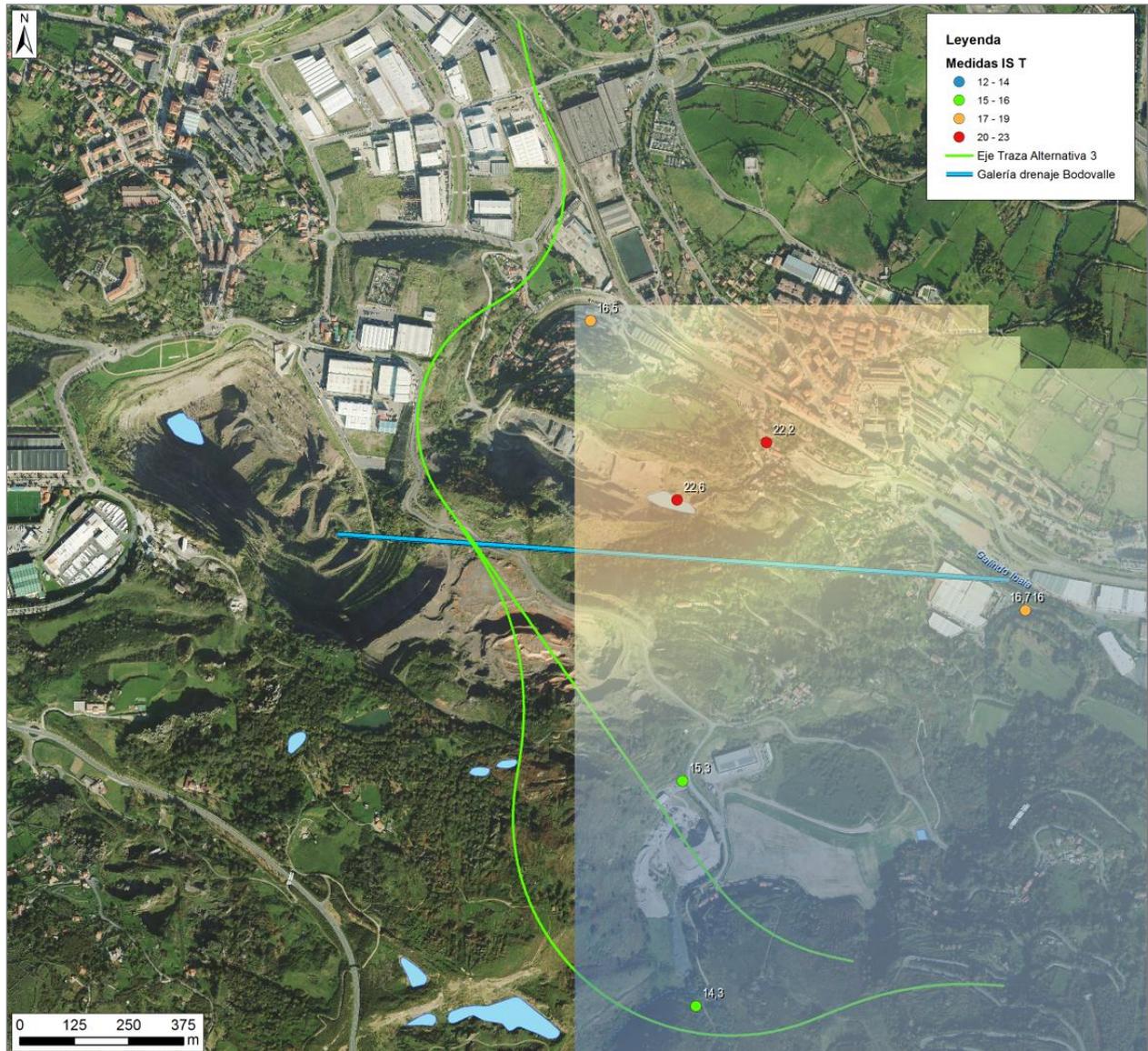


**Figura 58:** Evolución del pH (izquierda) y conductividad (derecha) frente a la temperatura en el sondeo OT-7

### Temperatura

En la **Figura 59** se muestra la distribución de Temperatura. El aspecto más llamativo es el papel que juegan las lagunas y embalses en la temperatura, tal y como se puede ver en la laguna de la cantera de Ortuella.

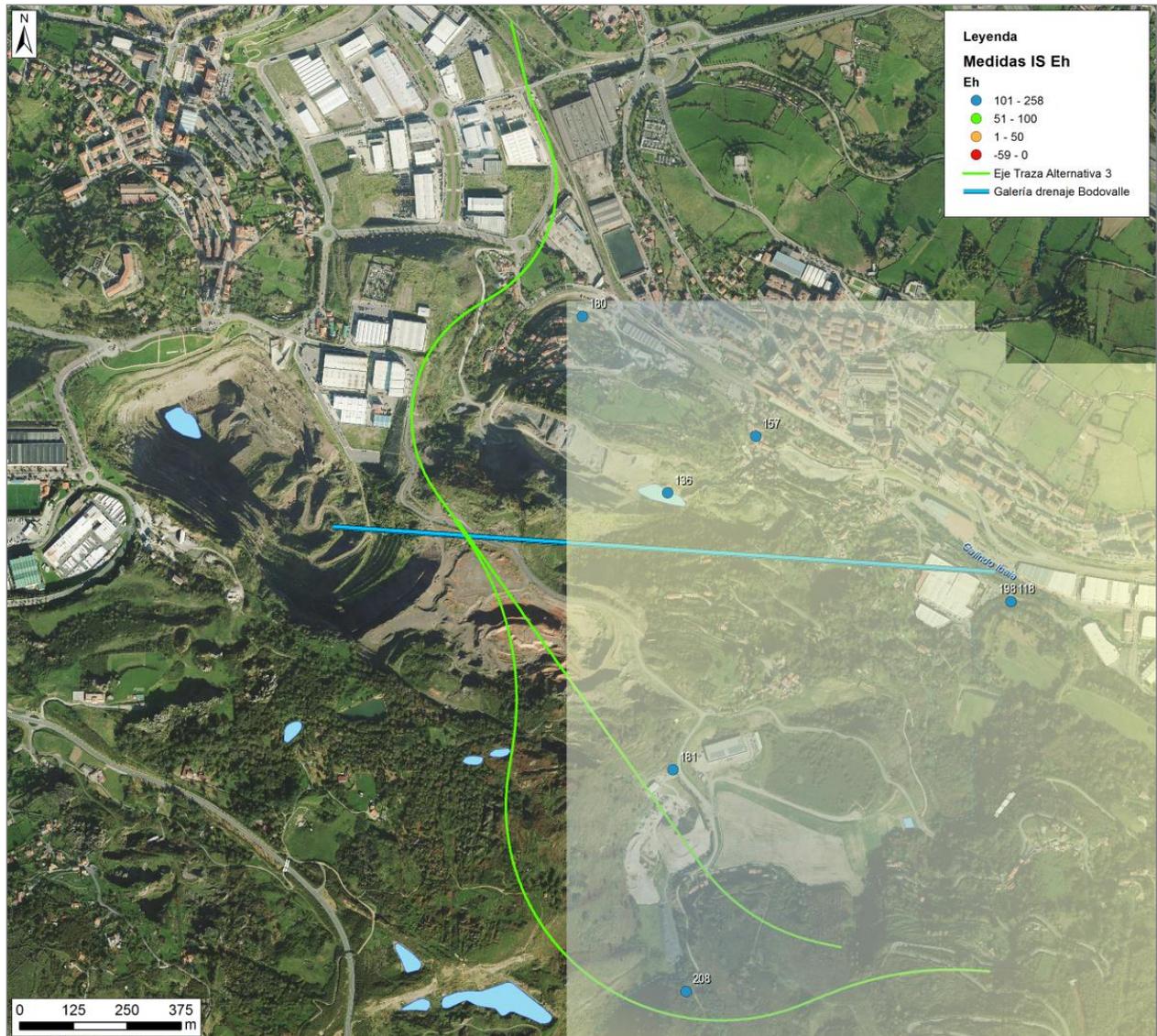
La zona con menores temperaturas se encuentran en sondeos y el cauce de Matamoros. Las temperaturas detectadas en los sondeos pueden considerarse como representativas del medio subterráneo.



**Figura 59:** Medidas de Temperatura realizadas in situ en la zona

Potencial REDOX

Tal y como se puede observar en la **Figura 60**, todas las aguas se encuentran en condiciones oxidantes.



**Figura 60:** Medidas de Eh realizadas in situ en la zona

## 10.2. CARACTERIZACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS QUÍMICOS EN LABORATORIO

Se ha realizado un muestreo para la realización de análisis químicos de agua en laboratorio. Los puntos son los siguientes:

Sector	Nombre	Naturaleza
Ortuella-Bodovalle	OT-7	Sondeo
Matamoros-Orconera	OT-4	Sondeo
Matamoros-Orconera	Cauce Matamoros	Río
Matamoros-Orconera	Cauce Orconera	Río

Con objeto de contrastar resultados, se incluyen otros análisis próximos realizados en el entorno de la zona (tramo Serantes-Olabega):

Sector	Nombre	Naturaleza
Arboleada	Laguna Parkotxa	Galería
Larreineta	Cauce Larreineta	Galería
Larreineta	OT-5	Sondeo
Larreineta	Manantial Alto de Zaballa (Arqueta)	Depósito

En cada muestra se han analizado los siguientes parámetros:

### Parámetros físico-químicos medidos en laboratorio

Parámetro	Límite detección	Unidad
Conductividad a 25°C	0.1	mS/m
pH	1	mmol/L

### Parámetros agregados

Parámetro	Límite detección	Unidad
Dureza	0.0015	mmol/L
Dureza (Calcio)	0.0013	mmol/L
Dureza (Magnesio)	0.0002	mmol/L
Dureza (Carbonato de Calcio)	0.15	mg CaCO <sub>3</sub> /L

### Parámetros inorgánicos no metálicos

Parámetro	Límite detección	Unidad
Acidez pH 8.3	0.15	mmol/L
Acidez pH 4.5	0.15	mmol/L
Alcalinidad pH 4.5	0.15	mmol/L
Alcalinidad pH 8.3	0.15	mmol/L
Sólidos totales	10	mg/L
Dióxido de Carbono Total (CO <sub>2</sub> )	0	mg/L
Sólidos disueltos a 105°C	10	mg/L
Dióxido de Carbono libre (CO <sub>2</sub> )	0	mg/L
Sólidos en suspensión a 105°C	5	mg/L
CO <sub>2</sub> agresivo	0	mg/L
Sílice disuelta como SiO <sub>3</sub>	0.1	mg/L

### Elementos mayoritarios

Parámetro	Límite detección	Unidad
Carbonatos	0	mg/L
Cloruros	1	mg/L
Nitratos	2	mg/L
Sulfatos	5	mg/L
Bicarbonatos	0	mg/L
Nitratos	0.5	mg/L
Calcio	0.05	mg/L
Magnesio	0.003	mg/L
Potasio	0.05	mg/L
Sodio	0.03	mg/L

### Elementos minoritarios/metales disueltos

Parámetro	Límite detección	Unidad
Nitritos	0.04	mg/L
Nitritos como N	0.01	mg/L
Sílice disuelta como SiO <sub>2</sub>	0.08	mg/L
Sílice disuelta como H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0.1	mg/L
Aluminio	0.01	mg/L
Antimonio	0.01	mg/L
Arsénico	0.005	mg/L
Bario	0.0005	mg/L
Berilio	0.0002	mg/L
Boro	0.01	mg/L
Cadmio	0.0004	mg/L
Cromo	0.001	mg/L
Cobalto	0.002	mg/L
Cobre	0.001	mg/L
Hierro	0.002	mg/L
Plomo	0.005	mg/L
Litio	0.001	mg/L
Manganeso	0.0005	mg/L
Molibdeno	0.002	mg/L
Níquel	0.002	mg/L
Fósforo	0.05	mg/L
Selenio	0.01	mg/L
Plata	0.001	mg/L
Talio	0.01	mg/L
Vanadio	0.001	mg/L
Zinc	0.002	mg/L

El primer paso es caracterizar la facies hidroquímica en base al contenido en iones mayoritarios (Aniones y Cationes). Generalmente se suele representar mediante diagramas tipo:

- Diagramas de Stiff en los que se enfrentan aniones a cationes. Suelen representarse en porcentaje de miliequivalentes (mEq), pero en este caso resulta más intuitiva su representación en contenido en mEq, de forma que las dimensiones del gráfico orientan sobre el contenido mayoritario (relacionado con la conductividad).

- Diagrama ternario de Piper-Hill-Langelier. Al representarse los aniones y cationes mayoritarios en diagramas ternarios, permite analizar la evolución de las aguas.
- Otros diagramas, como por ejemplo Schoeller.

En las figuras siguientes (Figura 62 y Figura 63) se muestran los diagramas de Stiff sobre Ortofoto y sobre el mapa geológico. En este caso se representa el diagrama como se muestra a continuación:

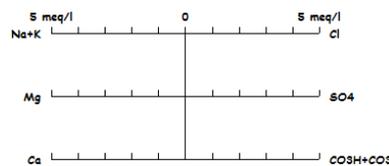


Figura 61: Diagrama de Stiff y escala representada

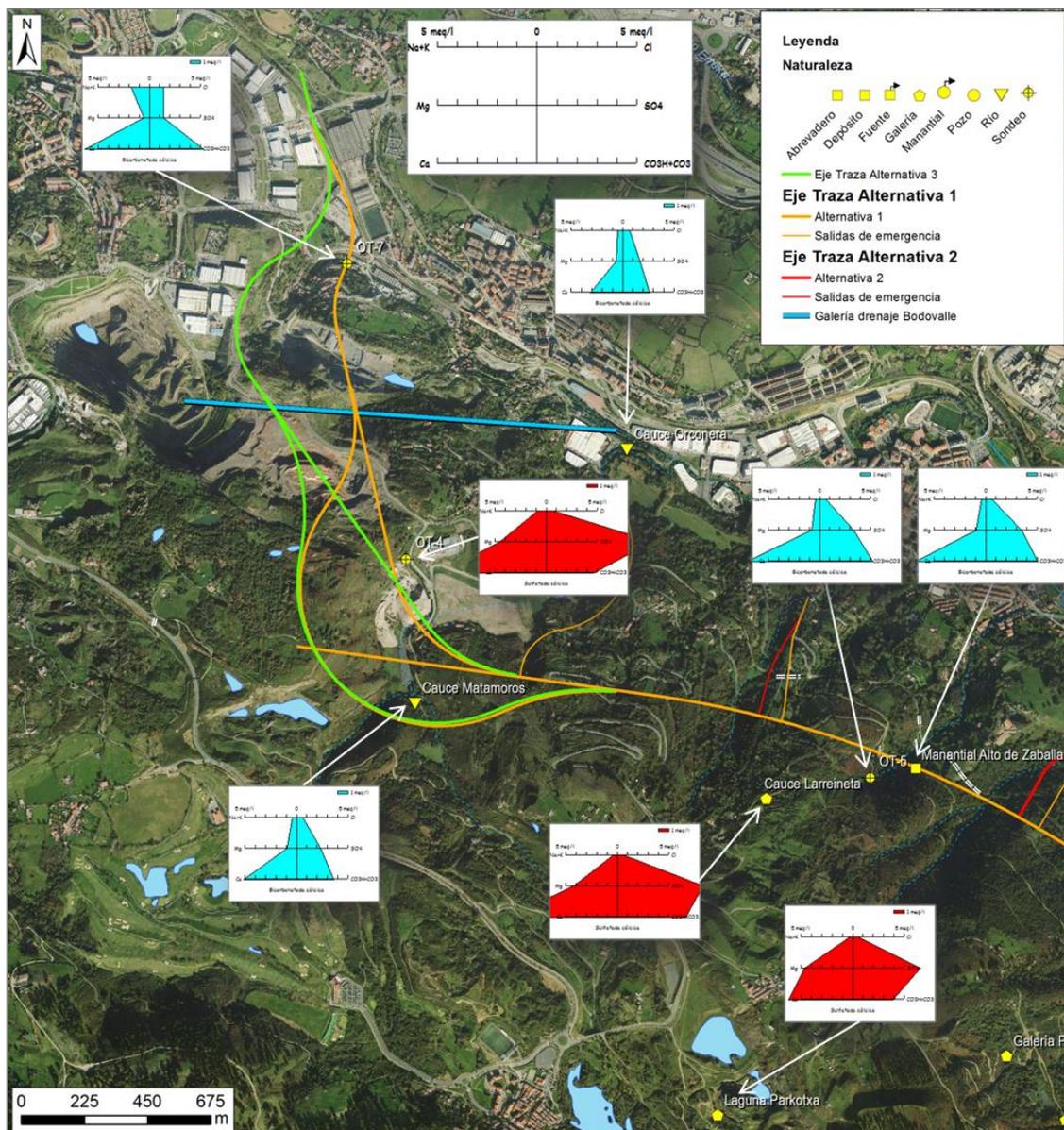


Figura 62: Diagramas de Stiff de las muestras analizadas (sobre ortofoto)

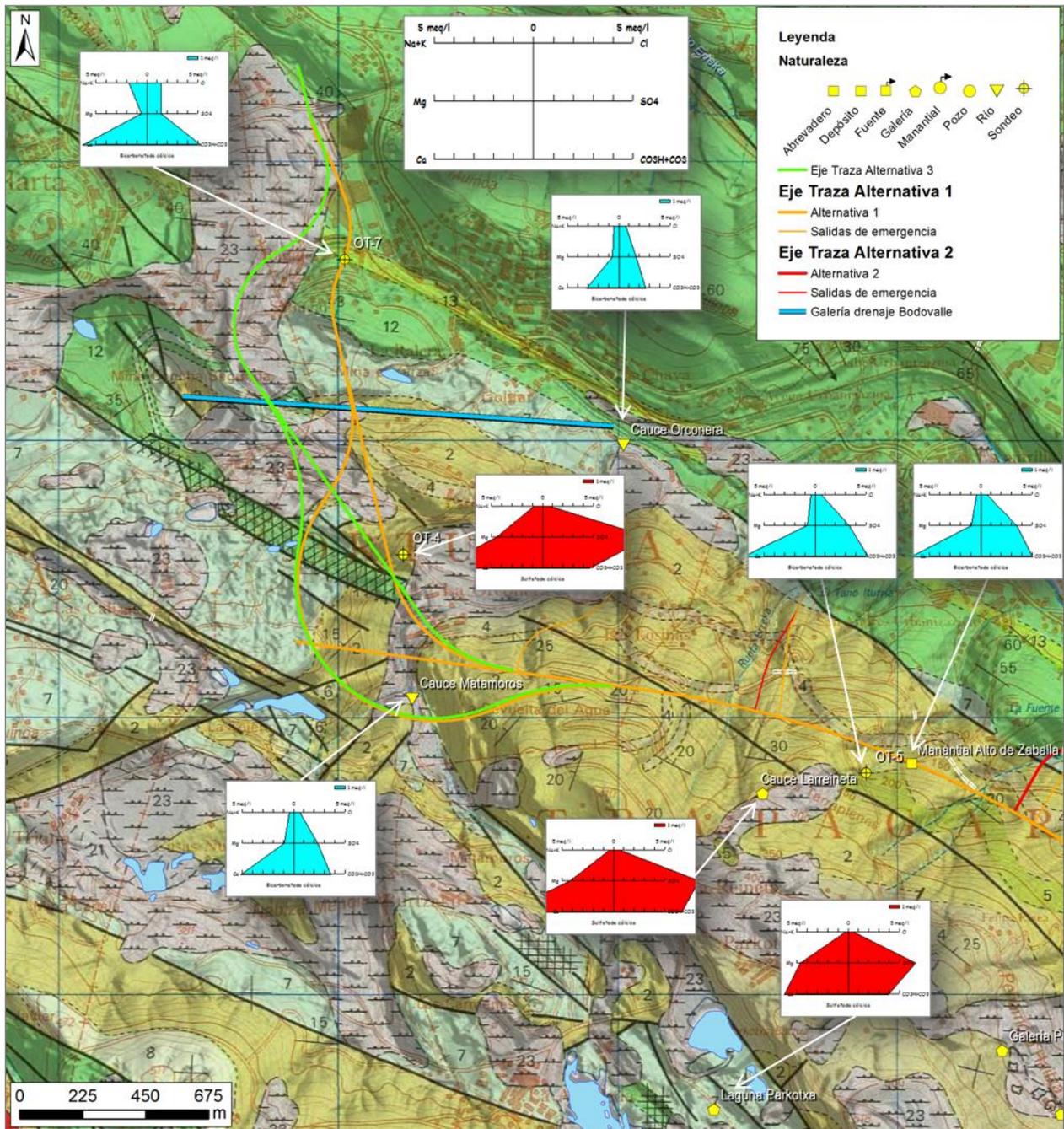


Figura 63: Diagramas de Stiff de las muestras analizadas (sobre base geológica)

En las figuras anteriores se puede observar el predominio de aguas de facies bicarbonatadas-cálcicas (sombreado en azul). En algunos casos, el contenido en sulfatos crece, hasta tal punto que varias muestras se consideran sulfatadas (sombreadas en rojo) o combinaciones de bicarbonatadas-Sulfatadas o viceversa. Analizando por sectores, se obtiene lo siguiente:

- Sector Ortuella-Bodovalle (OT-7). Se trata de una muestra claramente bicarbonatada cálcica.
- Sector Matamoros-Orconera. Se ha muestreado el cauce de Matamoros y Orconera. Se puede

observar que desde Matamoros se mantiene el quimismo, si bien existe dilución en Orconera (se reduce la salinidad). El caso del sondeo OT-4 es particular, muestra facies fuertemente sulfatada cálcica, con un fuerte incremento de Sulfatos, Calcio y Magnesio.

- Sector de Arboleda y Larreineta, próxima a la conexión entre los Ramales Norte y Sur y el tronco principal de Serantes-Olabeaga. Se ha muestreado la boca de mina de la mina Parkotxa, por la sospecha de que este plano inclinado actúa como zona de drenaje preferente hacia Durañona y/o Larreineta (ladera Norte). En las inspecciones realizadas, se ha podido comprobar que así como en las lagunas existentes hacia el Norte el nivel evoluciona lentamente, en la boca de mina el nivel desciende con mayor celeridad.

El quimismo indica que es más parecida el agua que se drena en Larreineta que la que se drenada por la galería Parkotxa. En cambio los quimismos entre la galería Parkotxa, sondeo OT-5 y el manantial del Alto de Zaballa son muy similares y serán los predominantes en este tramo de la traza, que incluye la salida de emergencia 4 (para evacuación de drenaje).



**Figura 64:** Cauce de drenaje de Larreineta con 3.61 l/s (izquierda) y Galería Parkotxa de Peña Mora (derecha)

Una vez analizados los sectores mediante diagramas de Stiff, se tiene una mayor sensibilidad de la zona y el quimismo representativo. Visto en un diagrama de Piper-Hill-Langelier (Figura 65), se puede comprobar que todas las muestras son cálcicas, mientras que existe un grupo de muestras con componente sulfatada, que se relacionan directamente con actividades mineras (el cauce de Larreineta y el plano inclinado de la laguna Parkotxa, y el sondeo OT-4 de Ortuella).

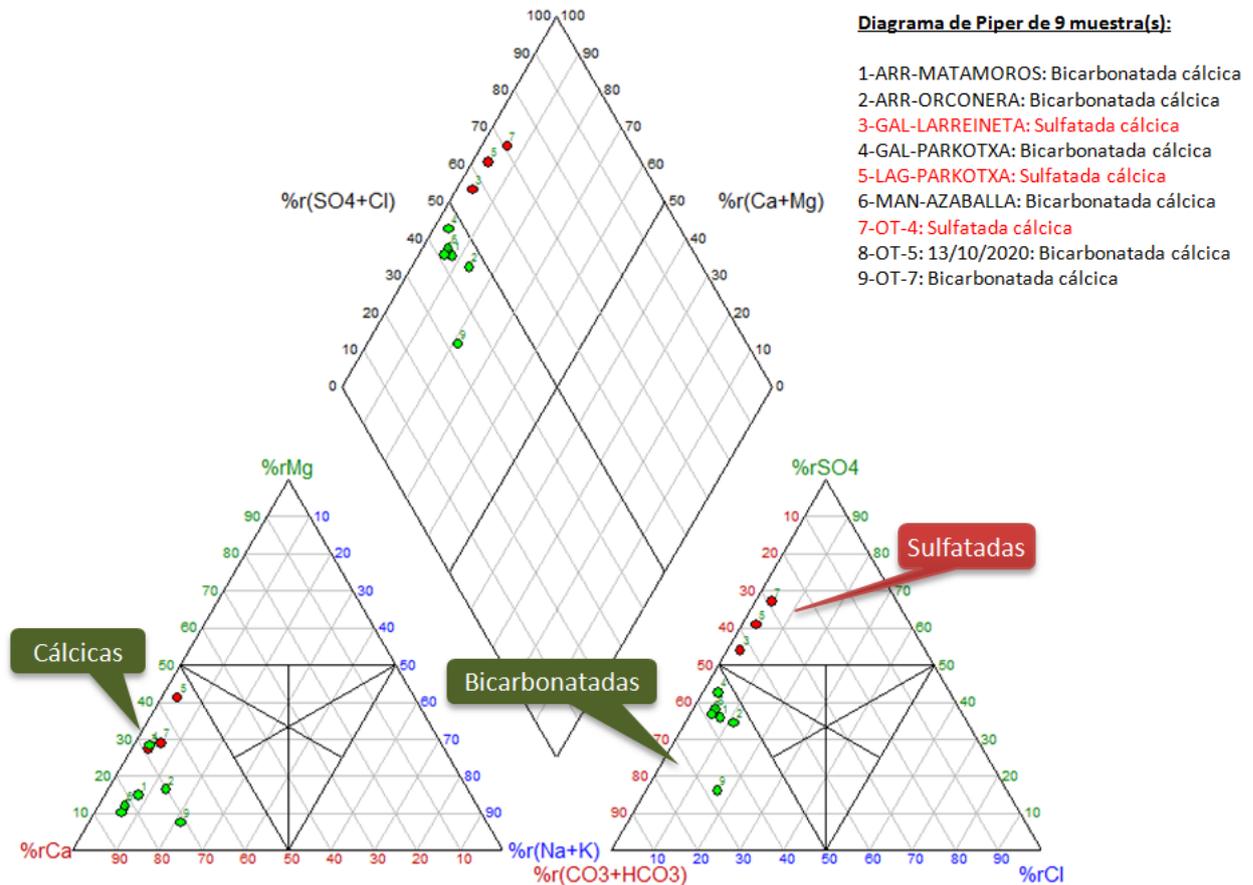


Figura 65: Diagrama de Piper-Hill-Langelier para las muestras analizadas

En cuanto a otros elementos, se ha detectado lo siguiente (se ordenan los puntos de acuerdo a la secuencia de sectores descrita con los diagramas de Stiff):

- Nitratos, Nitritos y Fósforo. En general son valores bajos a nulos, salvo el caso del sondeo OT-7 (Ortuella). Es probable que se relacione con temas de contaminación. A esto se suma que existe cierto contenido de Nitritos (0.184 mg/l), elemento que es muy inestables y que si se detecta, indica contaminación directa. También se han detectado en el cauce de Orconera (0.122 mg/l).

Otro parámetro indicativo de contaminación es el fósforo, cuya presencia se encuentra únicamente en el sondeo OT-7 (0.0045 mg/l).

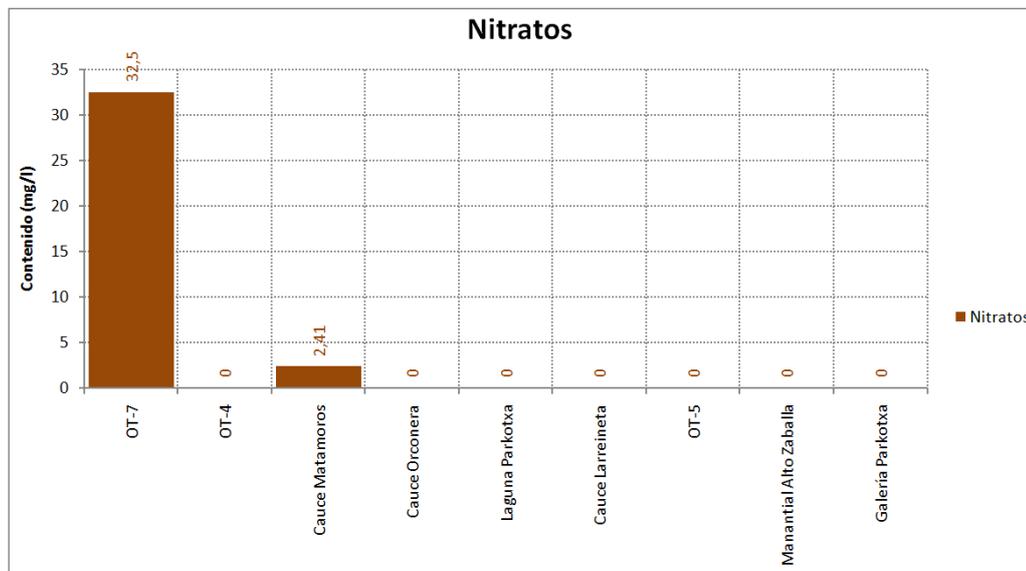


Figura 66: Contenido en Nitratos en las muestras analizadas

- No se ha detectado presencia en el agua de Aluminio, Antimonio, Arsénico, Berilio, Cadmio, Cromo, Cobalto, Plomo, Molibdeno, Plata y Talio en ninguna muestra.
- Se ha detectado presencia Hierro, Manganeso y Zinc. Destaca también la presencia de Zinc, el cual aparece especialmente en los sondeos. No se descarta que este Zinc provenga de los elementos de fijación de datalogger (suelen ser zincados).

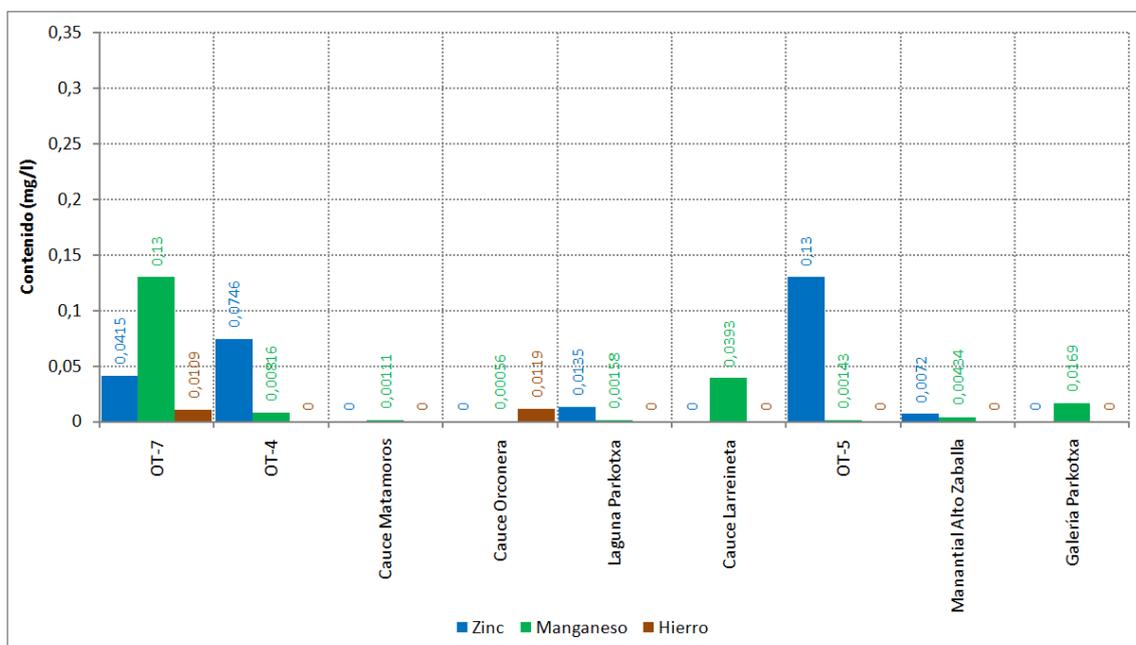


Figura 67: Contenido en Zinc, Manganeso y Hierro en las muestras analizadas

- A menor escala (por debajo de 0.01 mg/l), se ha detectado presencia de Niquel, Cobre y Litio. El sondeo OT-7 presenta estos tres elementos. Es frecuente la presencia de Litio e numerosos puntos. El cobre apenas se detecta en la zona.

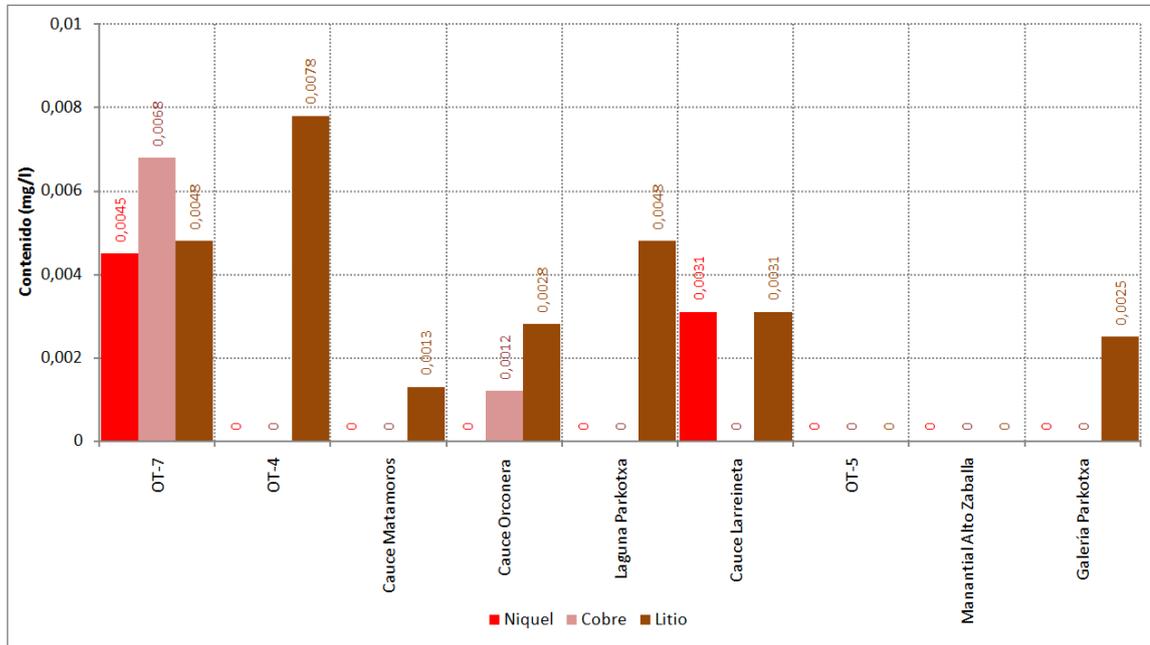


Figura 68: Contenido en Niquel, Cobre y Litio en las muestras analizadas

- Finalmente, hay un grupo de elementos minoritarios con presencia frecuente, se trata del Bario, el Boro y el Selenio. Se puede observar que todas las muestras contienen Bario y muchas Boro, mientras que el Selenio no aparece en este sector.

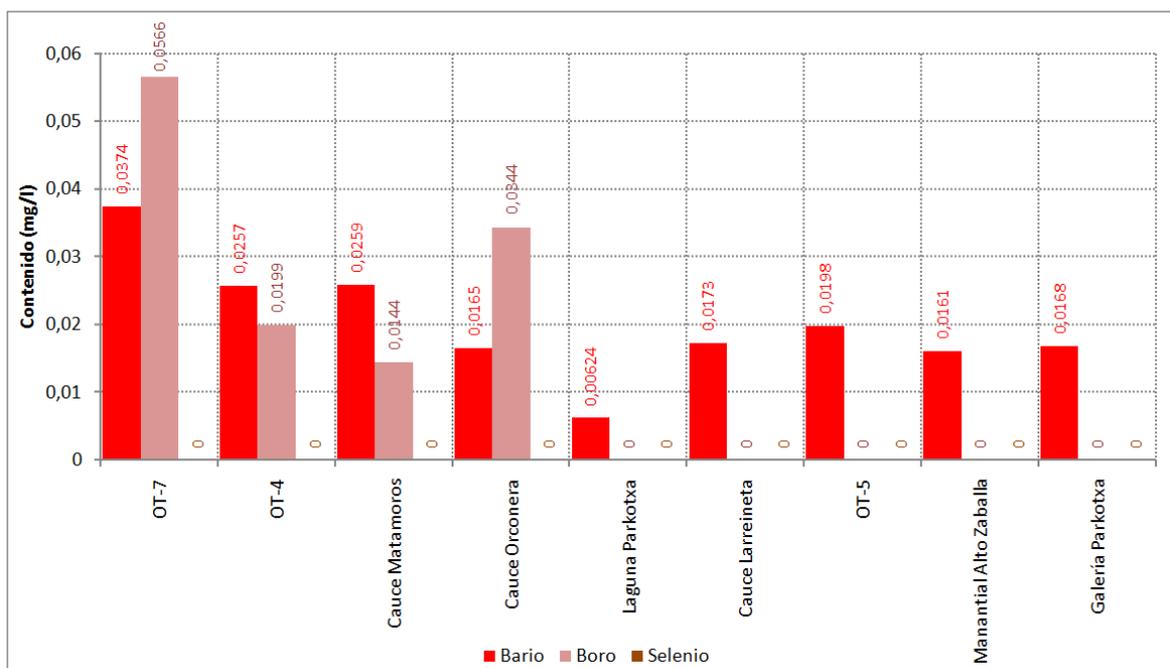


Figura 69: Contenido en Bario, Boro y Selenio en las muestras analizadas

## 11. ANÁLISIS DE POSIBLES AFECCIONES A PROVECHAMIENTOS DE AGUA

Uno de los aspectos más críticos es la determinación a priori, de la posible afección a aprovechamientos de agua de forma que su funcionamiento natural quede definitivamente alterado como consecuencia del abatimiento piezométrico generado por un túnel.

El primer paso para realizar este análisis, es determinar cuales son los aprovechamientos de agua existentes en la zona, y analizar su posible relación/dependencia de las aguas subterráneas. Para realizar esta labor, se han llevado a cabo dos trabajos básicos:

- Recopilación de inventarios de puntos de agua de todo tipo de estudios y trabajos.
- Inspección de campo para verificar el estado y naturaleza de los puntos de agua recopilados.

Por otra parte, se ha contactado en varias ocasiones con el Organismo competente en materia de aguas en la zona, en este caso el URA (Agencia Vasca del Agua). Tras un largo proceso se ha obtenido un inventario final de aprovechamientos en la zona, incluida su situación concesional.

En la figura siguiente (**Figura 72**), se muestra la distribución de aprovechamientos de agua en la zona y su estado concesional, y se puede comprobar que:

- Existe un manantial junto a la corta de Bodovalle con la concesión pendiente. Este manantial se encuentra en el borde superior de la corta, la cual presenta un nivel abatido a cota -27.5 msnm. Es decir, este manantial representa un nivel superior colgado, por lo que no es posible su afección desde cotas inferiores.
- En la Ralera (Barrio Saugal) aparecen dos captaciones, una con concesión extinguida y otra archivada. Todas ellas corresponden a captaciones de agua superficial, probablemente relacionadas con la laguna de la cantera situada aguas arriba. Tampoco pueden resultar afectadas por una obra en profundidad.
- La Fuente de la Calera, situada en el polígono junto al río Granada, figura como una captación en estado desconocido. Se ha hecho una inspección de la zona y no se ha localizado, y gente de la zona tampoco conocen la citada fuente.



**Figura 70:** Aspecto actual de la zona en la que se ubica la Fuente de la Calera

- Finalmente se marca una concesión en Orconera, con el nombre de Granada. Se trata de una captación de aguas superficiales con concesión archivada, que como se puede ver, se encuentra sepultada por el relleno de Orconera, si bien el cauce de Matamoros, procedente de la Arboleda,

se encuentra soterrado en esta zona para posteriormente reaparecer aguas abajo, en la zona de polígono y caer en el río Granada. Se trata de aguas superficiales de procedencia exterior al sistema (la Arboleda) que no podrán resultar afectadas por una obra subterránea.



Figura 71: Detalle del cauce proveniente de Orconera antes de caer (detalle cascada) al río Granada

Por lo tanto, no existen captaciones en la zona que puedan resultar afectadas por los futuros túneles. Es importante tener en presente la existencia de un importante abatimiento asociado al bombeo sistemático de la mina de Bodovalle.

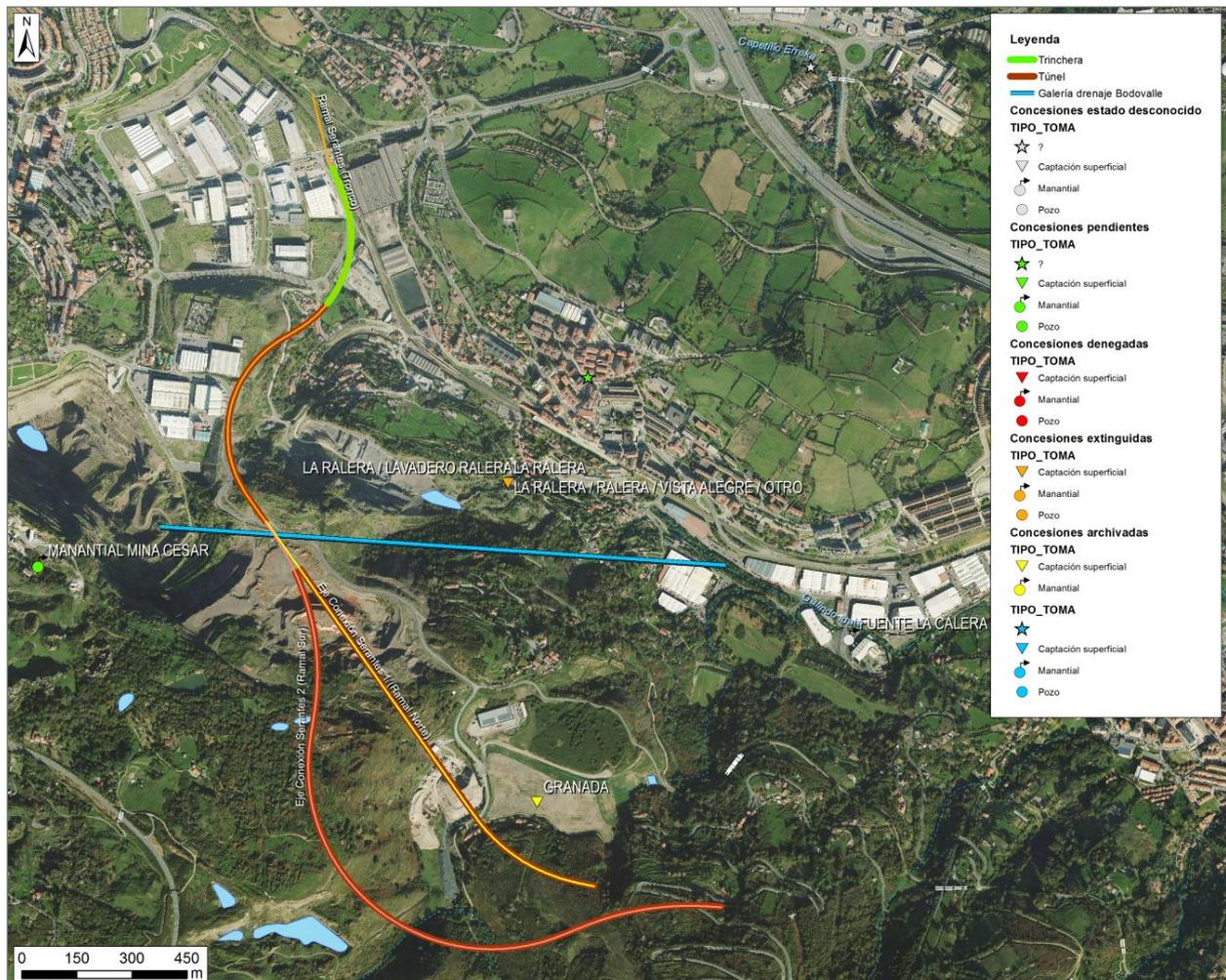


Figura 72: Aprovechamientos de agua en la zona

## 12. CONCLUSIONES

### 12.1. CONCLUSIONES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN LOS TÚNELES

Del presente documento se puede concluir que:

- La permeabilidad del medio es un dato fundamental. Existe mucha información sobre permeabilidad, la inmensa mayoría derivada de ensayos Lugeon, pero la variabilidad del parámetro es tan grande que hace necesario adoptar valores realmente representativos. La variación de este parámetro tiene implicación directa en los caudales de fluencia de los túneles.
- En relación con lo anterior, y con objeto de ser realista con los datos de campo, se han seleccionado los ensayos Lugeon específicos de la zona y se han reinterpretado, agrupando los valores según la profundidad, pues se demuestra que la permeabilidad en este tipo de materiales se reduce con la profundidad de forma notable.
- Los materiales con una permeabilidad aparentemente mayor, son las calizas, las zonas de fractura y los diques de cuarzo, hecho que hace que los valores de caudal calculados se incrementen significativamente. Se ha de tener en cuenta que:
  - No existe constancia de puntos de surgencia asociados a calizas en la zona, y los testigos recuperados en sondeos muestran un material muy sano, sin presencia de karstificación o micro-karstificación.
  - Las zonas de fractura pueden favorecer la circulación de agua, o bien todo lo contrario, actuar como barreras. Los materiales predominantes en la zona (limolitas y areniscas) no favorecen el desarrollo de fracturas limpias y abiertas, lo que se une a que en la zona tampoco existe constancia de surgencias asociadas a grandes fracturas. Además tampoco se puede determinar su desarrollo en profundidad, dado que se encuentran verticalizadas y raramente son atravesadas por sondeos. A pesar de ello, se les ha asignado una permeabilidad más elevada que el resto de materiales.
  - Los diques de cuarzo, generalmente se asocian a fracturas y presentan una problemática similar a ellas. Tampoco existen surgencias asociadas a diques, pero en cualquier caso se les asigna una permeabilidad más elevada que el resto de materiales.
- La piezometría tiene su importancia, pero es menor que la de la permeabilidad. Se han realizado ajustes sobre los datos de campo, y aún se harán más, dado que a partir del quimismo se deducen puntos cuyo papel en las aguas subterráneas es irrelevante y por lo tanto no deben constituir valor piezométrico. En cualquier caso la piezometría representada es muy representativa de la zona.
- El método aplicado (Goodman, 1965) para la estimación de caudales, demuestra que es necesario eliminar valores caudal cuando la carga piezométrica se aproxima al túnel.
- En los cálculos se han tenido en cuenta dos tipos de secciones, la representativa del túnel, con un radio de 5.2 m, y la representativa de salidas de emergencia, con un radio de 2 m.

- Son muy importantes los puntos altos y bajos en la traza de cada alternativa, dado que, aunque la piezometría indique una trayectoria de flujo, la pendiente de la rasante marcará el sentido de flujo del agua de drenaje de puntos altos a puntos bajos. El punto más alto de toda la traza se sitúa en el Ramal Sur del eje de conexión Serantes 2, a cota 63.9 msnm. El punto más bajo de la alternativa es el emboquille en Ortuella por lo que una parte del drenaje irá a este punto, pero la mayoría irá hacia el tronco principal del tramo Serantes-Olabeaga (Alternativa A).
- Se ha utilizado el túnel de Argalarío para calibrar los resultados obtenidos, dado que en el túnel se conoce el caudal aproximado, por varias visitas efectuadas durante las labores de campo. A pesar de ello, el túnel de Argalarío atraviesa únicamente formación Ereza y apenas presenta fallas. De acuerdo con el método utilizado, se obtienen 5.55 l/s en Argalarío.
- Los valores de caudal obtenidos tanto en el comienzo de la traza (Ramal Serantes) como en ambas vertientes de los ejes de conexión, son elevados, y ello se debe a la presencia de caliza y presencia de fracturas. Es el sector más crítico de toda la traza desde el punto de vista de la permeabilidad. Con la permeabilidad asignada a la caliza ( $2.60 \times 10^{-5}$  cm/s) se obtienen valores de caudal elevados, y no se trata de una permeabilidad alta. Los caudales obtenidos en el ramal Sur del eje conexión Serantes 2 son de 10.62 l/s hacia el Norte y 25.89 l/s hacia el Sur.
- Si se comparan estos resultados con los obtenidos en los tramos equivalentes en la alternativa A, se puede comprobar que los caudales generados hacia el ramal de Serantes-Olabeaga son similares (41.97 l/s en la alternativa B y 43.06 l/s en la alternativa A), pero los generados en la boca del Ramal Serantes (Ortuella) son sensiblemente inferiores (16.85 l/s) en comparación con la alternativa A (25.83 l/s), por lo que la alternativa B se presenta más favorable en este sentido.

## 12.2. CONCLUSIONES SOBRE EL QUIMISMO DE LAS AGUAS

Del presente documento se puede concluir que:

- Se han realizado multitud de determinaciones de parámetros físico-químicos in situ, y se han tomado muestras de agua para su análisis en laboratorio, incluido un barrido de elementos minoritarios.
- Solo con las determinaciones in situ, y en concreto con la medida de Conductividad, se puede concluir que la zona de inicio de traza, Larreineta y Arboleda presentan valores elevados frente a los que se observan en otras zonas de la traza. La conductividad general del macizo oscila entre los 250 y 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y comienza a incrementarse por influencia de estructuras y depósitos mineros.
- Las aguas de toda la zona son básicamente Bicarbonatadas Cálcidas, y cuando varían de esta facies, es por influencia minera o por contaminación, como es el caso del sondeo OT-4 y Larreineta, muestras que presentan facies Sulfatada Cálcida. Es probable que en la traza se encuentren aguas de esta naturaleza bajo Orconera, dado que el sondeo OT-4 a bajado por debajo de la cota de rasante.
- En cuanto a elementos minoritarios, destaca el contenido en los sondeos OT-7 (comienzo de la

traza). Los contenidos en Nitratos, Nitritos, Fósforo etc. apuntan a contaminación en este punto.

- No se ha detectado presencia en el agua de Aluminio, Antimonio, Arsénico, Berilio, Cadmio, Cromo, Cobalto, Plomo, Molibdeno, Plata y Talio en ninguna muestra.
- Se ha detectado Hierro, Zinc, Manganeso, Níquel, Cobre, Litio, Bario, Boro, Selenio sin contenidos destacables.

### 12.3. CONCLUSIONES SOBRE AFECCIONES A APROVECHAMIENTOS DE AGUA

Del presente documento se puede concluir que:

- El número de aprovechamientos de agua existentes en la zona es muy escaso, lo cual se relaciona con la baja permeabilidad del medio. Dentro de estos aprovechamientos, la mayoría son captaciones de cauces superficiales (regatas y arroyos) cuya dependencia de la precipitación es absoluta, y por lo tanto son independientes de la dinámica subterránea. Tal es el caso del río Granada.
- Esta situación es aplicable tanto a la alternativa B como a la alternativa A. Los principales aprovechamientos relacionados con aguas subterráneas comienzan a aparecer en el tramo de Serantes-Olabeaga, en los valles de La Toba, Durañona y Yedal, fuera del ámbito de la alternativa 3. En los tramos del Ramal Serantes, Ramal Sur y Ramal Norte de todas las alternativas no hay aprovechamientos o captaciones de aguas subterráneas susceptibles de ser afectadas por la futura obra.
- Existe una serie de aprovechamientos asociados a estructuras mineras, lo que implica que se trata de aprovechamientos que son considerados como manantiales pero realmente tienen origen en captaciones lejanas (normalmente galerías mineras) que son conducidas por tubería hacia otros sectores. Se está estudiando el tema en el presente Estudio Hidrogeológico, puesto que se trata de aguas externas a la zona. En concreto se ha detectado que la mayor parte de los aprovechamientos existentes en el tramo de Serantes-Olabeaga (tramo contiguo a la presente alternativa) proceden de la Galería Parkotxa que a su vez procede de una de las lagunas de la Arboleda (de hecho existen Barrios, que se abastecen en este momento de las aguas de la galería minera). También se ha encontrado otro drenaje minero en la zona de Larreineta.
- Es importante tener en cuenta que, a priori, la zona de Ortuella se halla influida por el abatimiento asociado al bombeo de la mina de Bodovalle. Actualmente, la laguna que existe en el fondo de la corta se halla a cota -27.5 msnm, pero se sabe por información suministrada por el EVE, que se bombea desde la cota -185 msnm, impulsándose el agua en dos fases, una a cota -114 msnm para abastecer la red de agua industrial, y otra a la cota de la citada laguna para después impulsar a la galería de drenaje que conduce el agua al río Granada.