



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



# HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA PENÍNSULA DE TUMBES, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE



Memoria para optar al Título de Geólogo

**Cristóbal Jonathan Villanueva Pavez**

**Profesor Patrocinante:** Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado

**Profesores Comisión:** MsC. Liubow Nikolaiivna González

MsC. Abraham Elías González Martínez

Concepción, 2021

# ÍNDICE

## Página

RESUMEN .....	
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. OBJETIVOS .....	2
1.1.1. Objetivo General .....	2
1.1.2. Objetivos Específicos .....	2
1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS .....	2
1.3. CLIMA .....	3
1.4. FLORA Y FAUNA .....	4
1.5. TRABAJOS ANTERIORES .....	5
1.6. AGRADECIMIENTOS .....	6
2. MARCO GEOLÓGICO .....	7
2.1. GEOMORFOLOGÍA .....	7
2.2. GEOLOGÍA .....	9
2.2.1. Generalidades .....	9
2.2.2. Paleozoico .....	9
2.2.2.1. Basamento Metamórfico .....	9
2.2.2.2. Batolito Costero del Sur .....	10
2.2.3. Mesozoico .....	11
2.2.3.1. Plutón Hualpén .....	11
2.2.3.2. Formación Quiriquina .....	11
2.2.4. Cenozoico .....	11
2.2.4.1. Formación Cosmito .....	11
2.2.4.2. Formación Andalién .....	12
2.2.4.3. Depósitos fluviales y litorales .....	12
2.2.5. Estructuras .....	13
3. MARCO HIDROGEOLÓGICO .....	14
3.1. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL .....	14
3.1.1. Cuencas y red de drenaje .....	14
3.2. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....	15
3.2.1. Unidades hidrogeológicas locales .....	15
3.2.1.1. Unidades impermeables .....	15
3.2.1.2. Unidades permeables .....	16
3.2.2. Hidrogeología en rocas cristalinas .....	17
3.2.2.1. Generalidades .....	17
3.2.2.2. Contexto local .....	18
3.3. VERTIENTES .....	19

3.3.1. Generalidades .....	19
3.3.2. Clasificación de vertientes .....	21
4. METODOLOGÍA .....	24
4.1. GENERALIDADES .....	24
4.2. HIDROGEOQUÍMICA .....	24
4.3. HIDROGEOLOGÍA .....	26
4.3.1. Medición de caudales y nivel estático en pozo .....	27
4.3.2. Balance hídrico .....	27
4.4. DIFUSIÓN .....	28
5. RESULTADOS .....	30
5.1. HIDROGEOQUÍMICA .....	30
5.1.1. Ubicación y descripción de los puntos muestreados .....	30
5.1.2. Parámetros fisicoquímicos .....	31
5.1.3. Elementos mayores .....	33
5.2. HIDROGEOLOGÍA .....	37
5.2.1. Caudal de descarga en vertientes .....	37
5.2.1.1. Ubicación y descripción de los puntos de medición .....	37
5.2.1.2. Serie temporal de la descarga .....	39
5.2.2. Nivel freático en pozo .....	40
5.2.3. Balance hídrico .....	41
5.2.3.1. Infiltración .....	41
5.2.3.2. Escorrentía .....	42
5.3. DIFUSIÓN .....	45
6. DISCUSIÓN .....	47
6.1. ORIGEN Y PROCESOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	47
6.1.1. Procesos predominantes y evolución de las aguas .....	47
6.1.2. Interacción agua - roca y contaminación antrópica .....	51
6.1.3. Origen de las aguas de los cerros islas de Talcahuano .....	56
6.1.4. Calidad del agua .....	58
6.1.4.1. Agua potable .....	58
6.1.4.2. Agua para riego .....	59
6.2. HIDROGEOLOGÍA .....	60
6.2.1. Recarga .....	60
6.2.1.1. Distribución espacial de la recarga .....	61
6.2.1.2. Distribución temporal de la recarga .....	64
6.2.2. Disponibilidad y relevancia de los volúmenes de agua en vertientes .....	66
6.3. DIFUSIÓN .....	68
7. CONCLUSIONES .....	69
8. REFERENCIAS .....	71

## ANEXOS .....

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos .....	3
1. 2. Temperatura y precipitaciones mensuales promedio 2000 - 2019 .....	4
2. 1. Mapa geomorfológico .....	7
2. 2. Mapas de elevación y pendiente de la península de Tumbes .....	8
2. 3. Mapa geológico .....	9
3. 1. Mapa de cuencas y redes hídricas .....	14
3. 2. Límites y piezometría del acuífero Talcahuano .....	16
3. 3. Modelo conceptual de las propiedades hidrogeológicas en rocas cristalinas .....	18
3. 4. Perfil de meteorización del regolito en rocas cristalinas .....	19
3. 5. Fotografías del perfil de un pozo del área .....	20
3. 6. Vertientes de gravedad .....	22
4. 1. Metodología de trabajo en terreno .....	25
5. 1. Mapa de puntos muestreados .....	30
5. 2. Tipos de puntos de muestreo .....	31
5. 3. Parámetros fisicoquímicos .....	32
5. 4. Diagrama de caja .....	34
5. 5. Diagrama de Schoeller - Berkaloff .....	35
5. 6. Diagrama de Piper .....	36
5. 7. Distribución espacial de diagramas de Stiff .....	37
5. 8. Mapa de puntos de medición de caudal .....	38
5. 9. Imágenes referenciales de puntos de medición de caudal .....	38
5. 10. Caudal medido en vertientes .....	39
5. 11. Nivel estático de pozo y precipitaciones .....	41
5. 12. Mapa de usos de suelo .....	43
5. 13. Clasificación del umbral de escorrentía .....	44
5. 14. Vista preliminar de la página web	45
5. 15. Aplicaciones interactivas en la página web	46
6. 1. Relación del Cl con iones mayores .....	48
6. 2. Matriz de correlación de Spearman .....	49
6. 3. Diagrama simplificado de Gibbs .....	50
6. 4. Comparación de diagramas de Stiff para muestras en campos distintos del diagrama de Gibbs .....	50
6. 5. Razón Cl/Na .....	53
6. 6. Evolución de la razón de cationes totales (TZ <sup>+</sup> ) respecto al SiO <sub>2</sub> .....	54
6. 7. Muestras del área respecto a la estabilidad termodinámica de la anortita .....	55



6.	8.	Mapa de distribución de SO <sub>4</sub> .....	56
6.	9.	Conductividades eléctricas en acuífero Talcahuano y muestra PT01 .....	57
6.	10.	Ubicación de las líneas divisorias de aguas respecto a la elevación y pendiente .	61
6.	11.	Diferencias en los perfiles de meteorización del área .....	62
6.	12.	Drenajes por dirección de desembocadura y densidad de vertientes .....	63
6.	13.	Recarga promedio por mes para el período 1967 - 2019 .....	64
6.	14.	Caudal de descarga promedio mensual por vertiente .....	65
6.	15.	Población por manzana en área cercana a vertiente San Juan Tumbes (C7) .....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>	
3.	1.	Clasificación de vertientes con base en su volumen de descarga .....	2
5.	1.	Parámetros fisicoquímicos .....	31
5.	2.	Concentración de elementos mayores .....	33
5.	3.	Valores máximos y mínimos de caudal registrados .....	40
5.	4.	Características del suelo .....	42
5.	5.	Recarga por infiltración según usos de suelo .....	42
5.	6.	Valores posibles en la zonificación del umbral de escorrentía .....	43
6.	1.	Conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (TDS) .....	47
6.	2.	Minerales de las rocas del área .....	51
6.	3.	Razones iónicas en muestras .....	52
6.	4.	Comparación de las concentraciones máximas de iones respecto a límites de la norma chilena de agua potable .....	58
6.	5.	Clasificación del agua para riego según conductividad eléctrica .....	59
6.	6.	Valores de parámetros de calidad para agua de riego por muestra .....	60
6.	7.	Caudales aforados en vertientes de otro estudio .....	68

## RESUMEN

Se realiza un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de las aguas subterráneas albergadas en las rocas metamórficas y plutónicas de la península de Tumbes, región del Biobío. Mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y concentración de elementos mayores se establece que las aguas poseen bajas conductividades y mineralización, y son probablemente jóvenes con un origen meteórico. Se identifica que la química de las aguas es influenciada por las precipitaciones, la interacción agua - roca y actividades antrópicas, donde se aprecia una evolución desde aguas dominadas por Na y Cl a aguas mixtas con un mayor predominio de Ca y  $\text{HCO}_3$ . Los procesos principales más probables que sirven de control en las concentraciones son la meteorización de silicatos de las rocas del área y contaminantes de carácter doméstico asociados al área urbana. La comparación de normas chilenas y recomendaciones internacionales con parámetros y concentraciones iónicas obtenidas en este estudio y otros anteriores, permiten establecer que las aguas no son en general adecuadas para el consumo humano, aunque poseen en su mayoría características buenas a aceptables para el riego. Se distingue, además, una clara diferencia entre la química las aguas de la península y la de un cerro isla cercano, sugiriendo orígenes distintos.

A partir de modelos de recarga, umbrales de escorrentía y un análisis de la geomorfología y las cuencas del área, se estiman volúmenes ponderados de recarga y se definen zonas estratégicas, ubicadas principalmente en parte de las líneas divisorias en las terrazas del área, que pueden tener efectos significativos en la recarga y la contaminación de las aguas subterráneas y vertientes. Adicionalmente, se determina con la ayuda de datos entregados por el monitoreo del nivel freático de un pozo y el caudal de descarga de vertientes que el período preferencial en el que ocurre la recarga se encuentra entre los meses de junio y septiembre. El estudio de caudales permite estimar, por primera vez, la disponibilidad del agua en los meses de mayores y menores precipitaciones para 7 vertientes, donde se concluye que los volúmenes mínimos entregados no parecen constituir una fuente sustentable de agua para el uso doméstico respecto a la población de la península. Sin embargo, debido al carácter permanente de los caudales y la evidencia de volúmenes mayores en otras partes del área no se descarta su uso para otro tipo de actividades. Finalmente, se comparte parte de los resultados a través de la creación de una página web (<https://vertientes-talcahuano.herokuapp.com>).

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea almacenada en distintos acuíferos ubicados a lo largo de Chile y el mundo, es una fuente cada vez más importante de recursos hídricos (SEA, 2012). En este contexto, numerosos estudios de carácter hidrogeológico se han llevado a cabo, aunque principalmente enfocados en cuencas sedimentarias, debido a que son estas las que generalmente poseen el potencial de albergar grandes volúmenes de agua, y ser económica y técnicamente más rentables. Es por esto que evaluaciones del agua subterránea en regiones donde se disponen rocas cristalinas no constituyen una prioridad, excepto en zonas áridas (Sharp, 2014), a pesar de que el volumen disponible en estas áreas puede alcanzar magnitudes suficientes para cubrir la demanda de agua a nivel de pequeñas comunidades, industria, agricultura y/o uso doméstico (Lachassagne y otros, 2011), pudiendo de este modo constituir fuentes relevantes de agua, más aún en un escenario actual de aumento general en la demanda de recursos hídricos (UTP, 2017).

En la península de Tumbes, región del Biobío, sobre las rocas metamórficas de la Serie Occidental que predominan en el área, y en menor medida, las rocas intrusivas del Plutón Hualpén (Creixell, 2001), se desarrollan numerosas vertientes, que han tenido una importancia histórica desde el asentamiento de las primeras poblaciones de la zona, ya que estas representaban en conjunto con pozos una de las únicas fuentes de agua (Moreno, 1964). Luego del terremoto del 2010 su importancia vuelve a ser reconocida frente a la falta de agua potable, que perduró en algunos sectores por varios meses, período durante el cual las vertientes permitieron abastecer a una parte de la población (Saavedra, 2014). Este hecho impulsó en el área el desarrollo de proyectos ambientales, con el fin de lograr su adecuado reconocimiento y protección, y mediante los cuales se logran identificar en la actualidad 32 vertientes a lo largo de la península (Saavedra, C., comunicación personal, 2019).

A pesar del exhaustivo trabajo de reconocimiento, los estudios realizados sobre estas y las aguas subterráneas a las que están asociadas son escasos, y aquellos existentes carecen de un enfoque geológico. En este contexto, se propone un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la península de Tumbes y sus vertientes asociadas, mediante el análisis de elementos mayores y complementado con mediciones de caudal en vertientes del área y un estudio de la recarga. Se pretende de esta manera proporcionar antecedentes que permitan conocer su estado y características actuales, y servir de base para una adecuada administración y protección de los recursos hídricos locales.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo general

- Caracterizar hidrogeológica e hidrogeoquímicamente las aguas subterráneas de la península de Tumbes.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Clasificar hidrogeoquímicamente las aguas subterráneas y establecer su origen.
- Determinar las zonas donde se produce la recarga y evaluar su magnitud.
- Clasificar las vertientes con base en sus características físicas.
- Estimar volúmenes y reconocer variaciones estacionales en la disponibilidad de agua proporcionada por las vertientes.
- Difundir información relevante de las aguas subterráneas y las vertientes a la comunidad.

## 1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS

La península de Tumbes se encuentra ubicada en la comuna de Talcahuano a 8 km al NNO de la ciudad de Concepción, en la zona costera de la región del Biobío entre los  $36^{\circ}44'24''$  -  $36^{\circ}36'0''$ S y  $73^{\circ}10'48''$  -  $73^{\circ}4'19''$ O (Figura 1.1), con una superficie aproximada de 37 km<sup>2</sup>.

La península posee una población de 36,001 personas (INE, 2017), de la cual su mayor parte está concentrada en la zona sur en el sector de “Los Cerros”, donde se encuentran las poblaciones La Gloria, Monte Redondo, Los Lobos, Nueva Los Lobos, Villa Badarán, Centinela, Centinela 2, Brisas del Mar, Los Copihues, San Francisco, Santa Julia, Los Cipreses, Zaror, Buena Vista, Cerro Alegre, Cornou, Vista Hermosa y Las Canchas, y una parte menor se dispone en el extremo norte en “Caleta Tumbes”. Una porción importante de la superficie del área corresponde a terrenos de la Armada de Chile, con acceso de carácter restringido o prohibido.

El acceso a la península es posible mediante varias rutas, las principales corresponden a la “Autopista Concepción - Talcahuano” desde Concepción y la “Ruta Interportuaria” desde Penco (R-151).

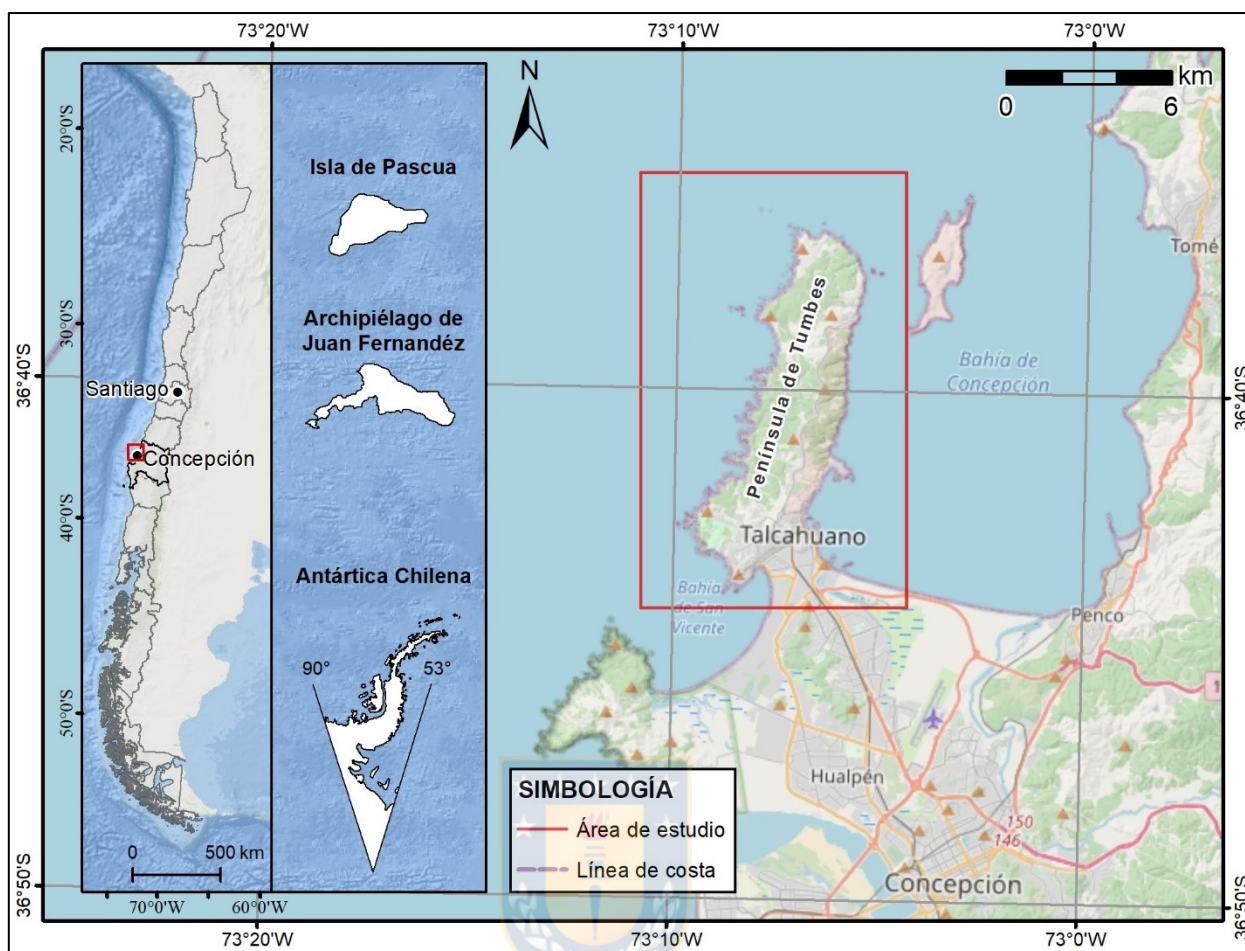


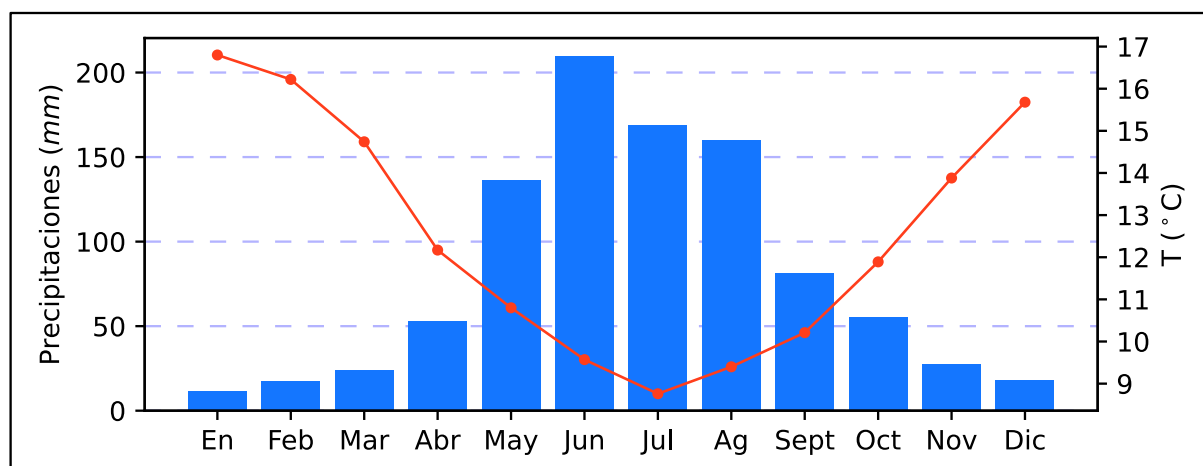
Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos. Mapa base desde *OpenStreetMap*.

### 1.3. CLIMA

En la región del Biobío se reconoce una transición entre un clima de tipo mediterráneo predominante en la parte central de Chile, y un clima templado húmedo que prevalece hacia el sur (Muñoz y otros, 2005). Según la clasificación climática de Köppen (1936), la zona costera de la región del Biobío corresponde a un clima de tipo mediterráneo con lluvias invernales, caracterizado por inviernos fríos o templados y veranos secos y frescos, en donde la mayor parte de las lluvias se concentra durante el invierno o estaciones intermedias, y que muestra hacia el borde litoral una fuerte influencia oceánica que se traduce en una humedad constante y una amplitud térmica anual y diaria menor que en el interior de la región.

Datos meteorológicos registrados entre el 2000 - 2019 (Figura 1.2) indican que los meses más secos corresponden a enero y febrero, y que las precipitaciones se concentran principalmente

en los meses de junio, julio y agosto. Por otro lado, las menores y mayores temperaturas promedio se alcanzan en los meses de julio y enero, respectivamente.



**Figura 1.2:** Temperatura y precipitaciones mensuales promedio 2000 - 2019. Las barras azules indican las precipitaciones; la línea roja indica las temperaturas. Estación Carriel Sur, Talcahuano. Datos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile (2020).

#### 1.4. FLORA Y FAUNA

La península de Tumbes es un área de gran diversidad ecosistémica, gran parte de la cual se desarrolla en las quebradas alimentadas por agua de las vertientes. Saavedra y otros (2013) realiza una descripción de la flora y la avifauna más característica del área, de esta manera, se distinguen entre las especies de la asociación florística: *Aristotelia chilensis* (Maqui), *Luma apiculata* (Arrayán), *Fuchsia magellanica* (Chilco), *Lapageria rosea* (Copihue), *Cryptocarya alba* (Peumo), *Drimys winteri* (Canelo), *Peumus boldo* (Boldo), *Blechnum chilense* (Costilla de vaca) y *Caesalpinia angulata* (Rematilla). Se registran también entre la cobertura vegetal, áreas significativas de plantaciones de *Pinus radiata* (Pino insigne) y *Eucalyptus globulus* (Eucalipto común).

En la fauna se destaca la gran diversidad de avifauna nativa, donde algunas de las especies reconocidas corresponden a *Passer domesticus* (Gorrión), *Carduelis barbata* (Jilguero), *Curaeus curaeus curaeus* (Tordo), *Zonotrichia capensis chilensis* (Chincol), *Sephanoides sephaniodes* (Picaflor), *Milvago chimango* (Tiuque), entre otras.

## 1.5. TRABAJOS ANTERIORES

Entre los trabajos geológicos locales se destacan los estudios de Galli (1967), quien describe las unidades litológicas más importantes del área de Concepción y Talcahuano, caracterizando también el suelo de fundación con énfasis en los riesgos geológicos asociados. Quezada y otros (1997) realizan un estudio más actualizado del mismo tipo en el área de Talcahuano, proporcionando nuevos antecedentes geológicos y geotécnicos. Creixell (2001) reconoce que las rocas ígneas de las penínsulas de Tumbes y Hualpén corresponden a intrusivos de edad Triásico Superior, y los agrupa en una unidad que denomina “Plutón Hualpén”, y Vásquez (2001) estudia las características petrológicas, mineralógicas y geoquímicas de las rocas metamórficas de la Cordillera de Nahuelbuta, entre las que se incluyen aquellas del sector Hualpén - Tumbes.

Entre estudios de carácter hidrogeológico e hidrogeoquímico se destaca el trabajo de Aqualogy Medioambiente (2013), que realiza un levantamiento hidrogeológico en cuencas costeras de la región del Biobío, y en el que se define el denominado “Acuífero Talcahuano” considerándolo como el único acuífero relevante del área, y en donde además se caracteriza parte de su hidrogeoquímica e hidrogeología asociadas. Saavedra y otros (2013) realizan un informe ambiental en el sector de los cerros de Talcahuano, en el cual se describen aspectos de la hidrología, flora y fauna del área, y se presentan también resultados de un diagnóstico de la calidad de las aguas de 8 vertientes, donde se llevan a cabo análisis de parámetros entre los que se incluyen: color verdadero, hierro, nitrato, pH y turbidez, concluyendo que las vertientes estudiadas no son aptas para el consumo humano debido a la presencia de organismos patógenos. Tume y otros (2018) miden las concentraciones de Ba, Co, Cr, Mn, y Ni en los suelos urbanos de Talcahuano, entre los que se incluyen partes de los cerros de la península de Tumbes, y registra un factor de contaminación de valor moderado a considerable en algunas muestras de suelo. Por último, Arumí (2018) en el contexto de la evaluación de impacto ambiental para la instalación en la península de Tumbes del proyecto “Bordemar”, para la cría y engorda de salmones, caracteriza la hidrología superficial e hidrogeología de 3 cuencas ubicadas en la parte norte de la península, determinando un régimen hidrológico y curvas de variación estacional, además de evaluar la vulnerabilidad del acuífero.



## 1.6. AGRADECIMIENTOS

A la profesora Fernanda Álvarez Amado, por la propuesta de memoria, el financiamiento y su apoyo teórico y en terreno. A mis compañeros de carrera, por su ayuda en lo técnico y práctico, en especial a Camila Poblete, Camila Quintana y Luciano Muñoz, quienes dieron de su tiempo para brindarme apoyo en el trabajo de terreno, y a Mauro Castillo por su ayuda en el desarrollo de la página web. A los funcionarios del Departamento Ciencias de la Tierra, con mención especial a Pedro Bravo por su extensiva colaboración en terreno y como chofer, y a los funcionarios del Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) por su total disposición en el laboratorio. A los docentes Liubow Nikolaiivna González, Alexey Novoselov, Jorge Quezada Flory y Joaquín Cortés Aranda quienes resolvieron mis dudas, entregaron material y/o dieron recomendaciones para este trabajo. A la Municipalidad de Talcahuano y Claudia Saavedra, quienes facilitaron información respecto a los estudios de proyectos ambientales en el área. Finalmente, a mi familia, especialmente a mi padre quién me apoyo repetidamente a lo largo de este trabajo y en mi carrera universitaria.





## 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1. GEOMORFOLOGÍA

Se distinguen en el territorio chileno 4 grandes formas del relieve, dispuestas en franjas paralelas que recorren prácticamente todo el país, estas corresponden de O a E a: planicies litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes (Errázuriz, 1998).

Localmente, se reconoce la Cordillera de la Costa en la parte más oriental (Figura 2.1), en forma de un cordón montañoso que se extiende en dirección NNE - SSO con alturas que no superan los 200 m, y que en su parte occidental está en contacto con una extensa llanura fluvio-marina con pendientes inferiores a 1° y altitudes entre 10 m y el nivel del mar (Mardones y otros, 1994). Desde la llanura, y asociados a estructuras falladas y basculadas emergen cerros isla, entre los que se tiene el cerro San Miguel, cerro de la U, El Morro y David Fuentes, constituidos por rocas sedimentarias eocenas y cretácicas con cotas que no superan los 90 m (Quezada y otros, 1997).

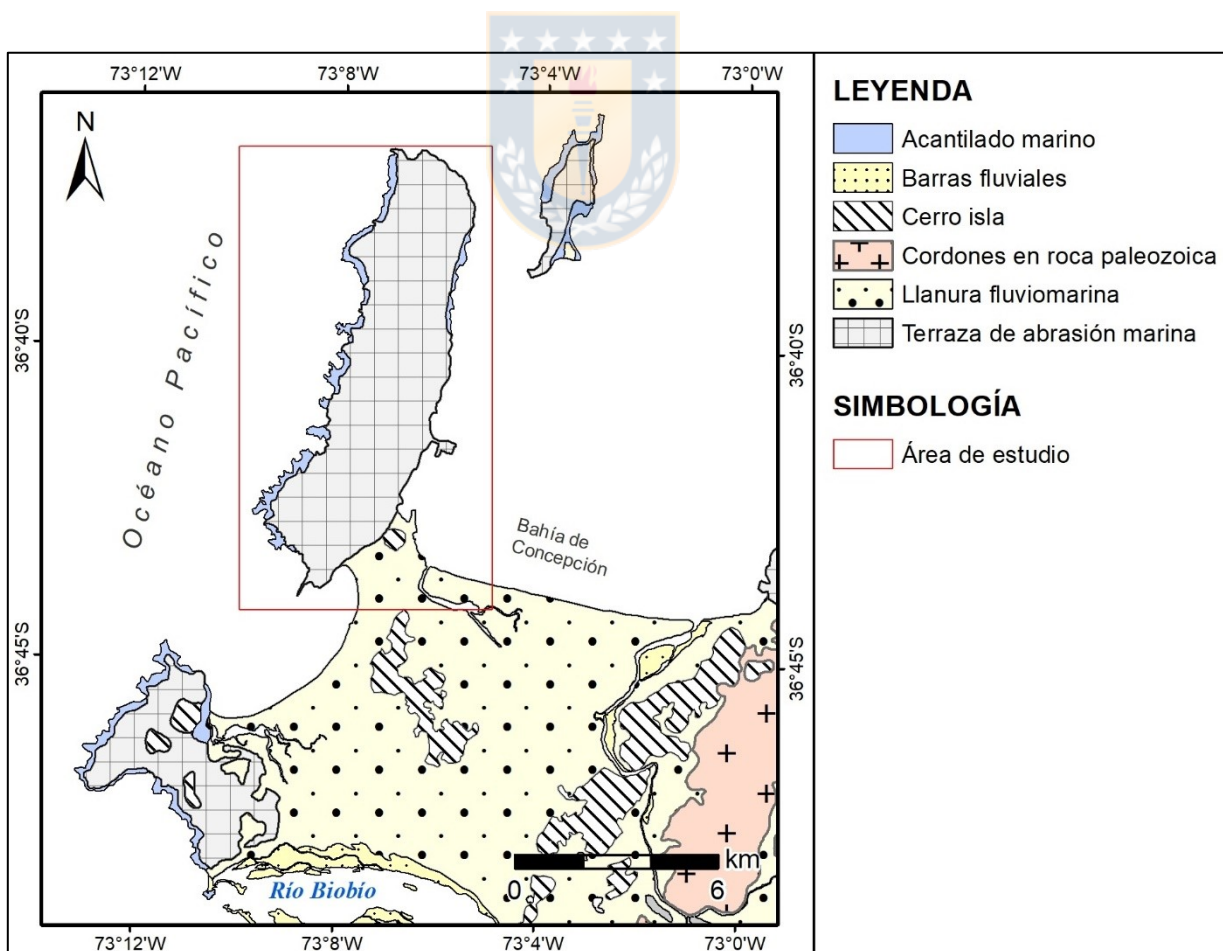


Figura 2.1: Mapa geomorfológico local. Modificado de Mardones (1978).

Al O de la llanura se disponen las penínsulas de Tumbes y Hualpén, constituidas por bloques de terrazas de abrasión marina que han sido solevantadas en sus márgenes y modeladas por el océano y el viento (Mardones, 1978).

En la península de Tumbes las terrazas poseen una morfología con perfil cóncavo a semirecto y pendientes menores a  $11^\circ$ , y en la parte O la meseta posee una cota aproximada de 90 m, con una terraza más alta en el sector de “Las Canchas” (Quezada, J., comunicación personal, 2020) a  $\sim 110$  m. Estas terrazas son cortadas por laderas de morfometría cóncavo - convexas con valores de pendiente entre  $11^\circ$  y  $39^\circ$  en vertientes suaves, y entre  $31^\circ$  y más de  $40^\circ$  en acantilados (Mardones y otros, 1994). En los bordes de la península se identifican escarpes representados por un acantilado costero activo, de trazado irregular y sin espacio suficiente para el desarrollo de playas de gran extensión. La altitud no sobrepasa los 200 m (Figura 2.2), y las cotas mayores se encuentran en la parte oriental cerca del borde del escarpe, destacándose el cerro Centinela ubicado al S de la península con 188 m s. n. m.

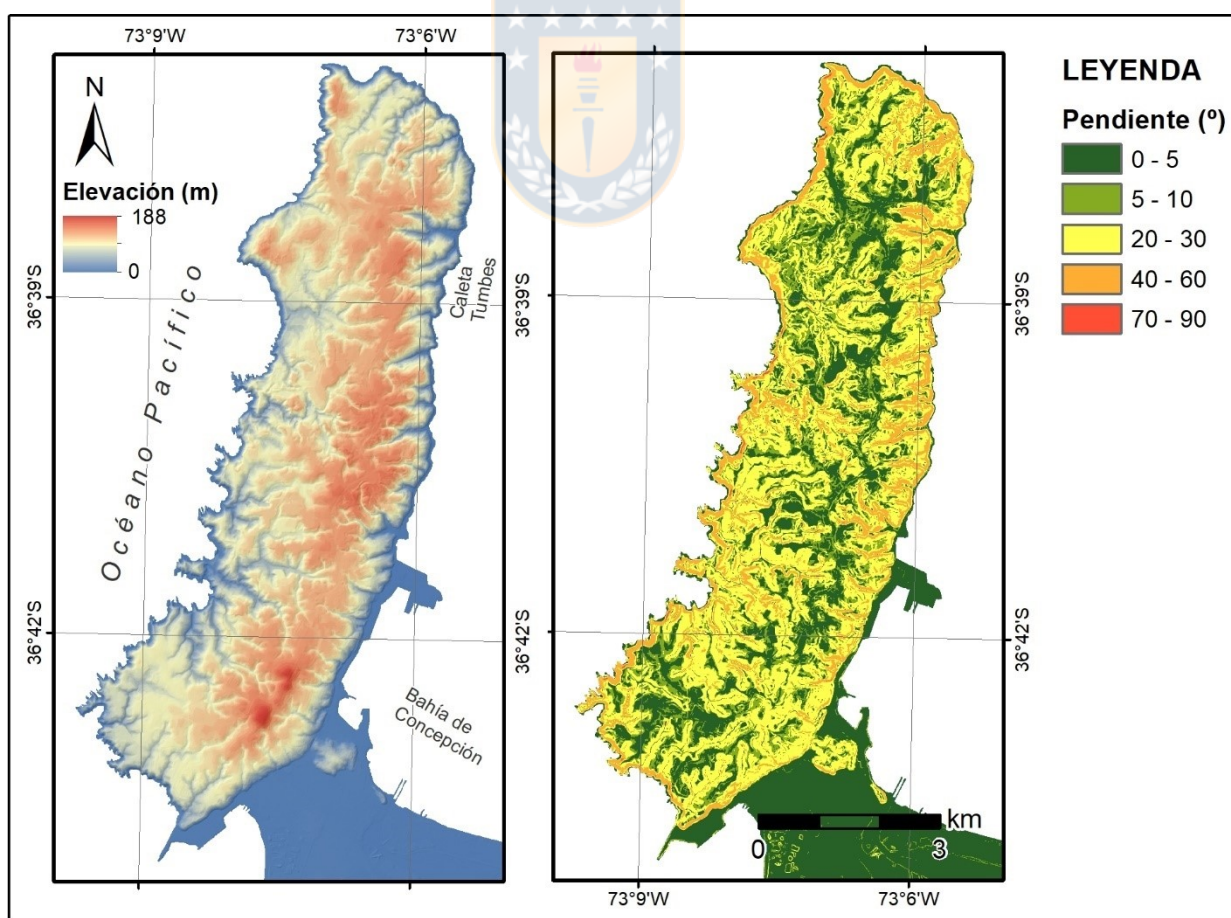


Figura 2.2: Mapas de elevación y pendiente de la Península de Tumbes.

## 2.2. GEOLOGÍA

### 2.2.1. Generalidades

La geología del área se caracteriza por la presencia de unidades antiguas, conformadas por rocas metamórficas e intrusivas del Paleozoico superior y cuerpos intrusivos triásicos locales, sobre las que se disponen en inconformidad rocas estratificadas y sedimentos no consolidados que van desde el Cretácico al reciente (Figura 2.3).

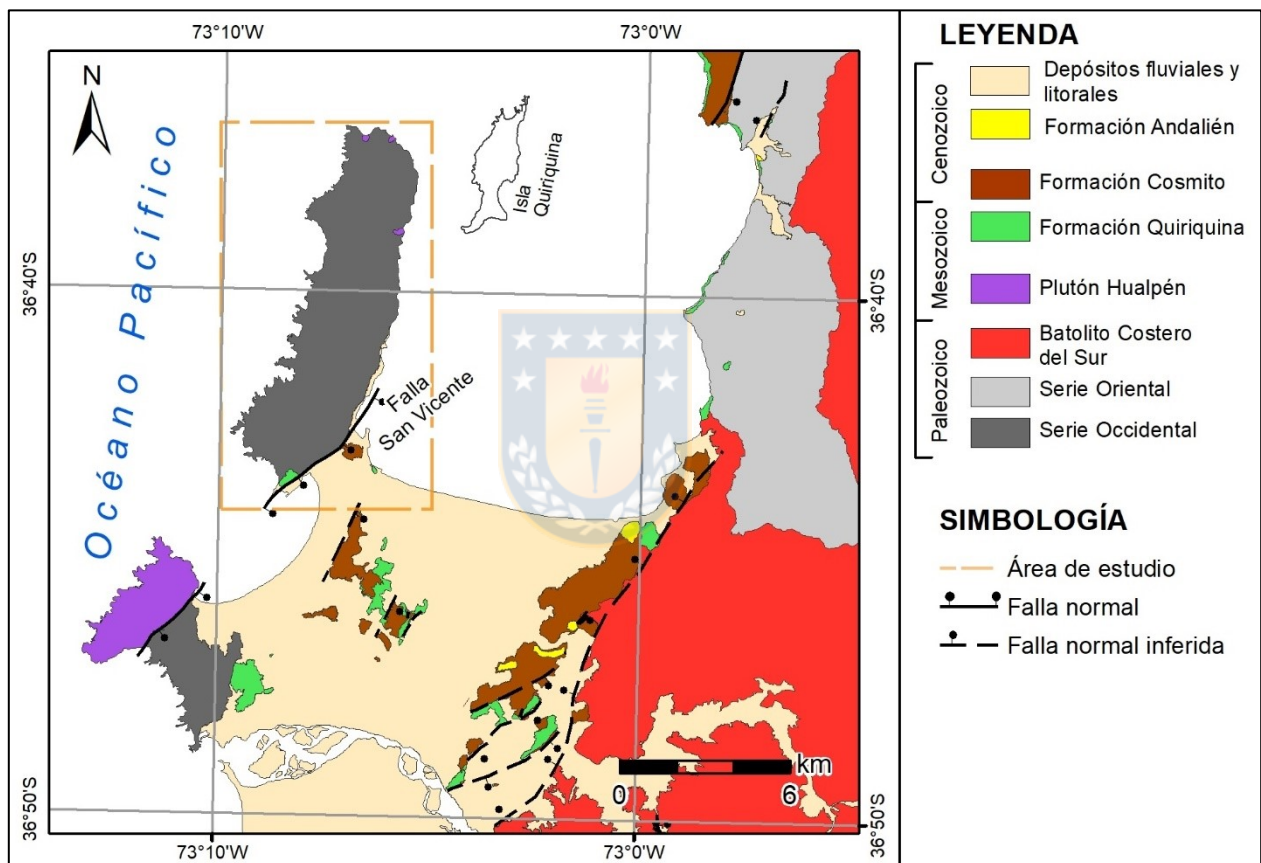


Figura 2.3: Mapa geológico. Modificado de Geología de Campo II (2020).

### 2.2.2. Paleozoico

#### 2.2.2.1. Basamento Metamórfico

Corresponde a un cinturón metamórfico pareado dividido en la Serie Occidental y Serie Oriental, las que se diferencian por su litología, asociaciones mineralógicas, protolito y condiciones de metamorfismo (Aguirre y otros, 1972).

La Serie Occidental es la franja O afectada por un metamorfismo de alto P/T, con facies de esquistos verdes y azules. La litología corresponde a metagrauvascas con intercalaciones de metabasitas y serpentinitas, con un protolito de edad 278 - 388 Ma que consiste en una mezcla de sedimentos siliciclásticos provenientes del continente y depositados en el fondo oceánico, y secciones desmembradas de la parte superior de la corteza oceánica (Hervé y otros, 2007). Se extiende de manera discontinua entre los 34° y 43°S, y de forma local en las penínsulas de Hualpén y Tumbes, donde se dispone en inconformidad con las rocas estratificadas del área y en contacto por intrusión con el Plutón Hualpén, produciendo una pequeña aureola de contacto (Creixell, 2001). Se expresa litológicamente en el sector Hualpén - Talcahuano como esquistos, metarenitas y filitas con una mineralogía representada por cuarzo, mica blanca, clorita y albita (Vásquez, 2001).

La Serie Oriental corresponde a una secuencia metasedimentaria clástica de grano fino, que aflora de manera continua desde Pichilemu hasta Lanalhue en una franja NNE - SSO, al oeste del Batolito Costero del Sur. Litológicamente está constituida por metarenitas, pizarras, filitas, esquistos y rocas calcosilicatadas, originadas de un protolito interpretado como una secuencia turbidítica proveniente de la erosión de un arco granítico (Hervé, 1988), el que es afectado por un metamorfismo regional (tipo Barroviano), al que posteriormente se sobreimpone un metamorfismo de contacto (tipo Buchan) debido a la intrusión del batolito costero, dando origen a las zonas de biotita, andalucita y sillimanita (Vásquez, 2001).

#### 2.2.2.2. Batolito Costero del Sur

El Batolito Costero del Sur (Hervé y otros, 1987) corresponde a una unidad distribuida de manera continua en una franja NNE - SSO entre los 32°30' - 38°00'S, al E de las rocas metamórficas paleozoicas (Creixell, 2001). La litología consiste en granodioritas y tonalitas, con sectores menos extensos de diorita cuarcífera y granito (Hervé, 1977), en las que es posible reconocer una zonación lateral, con granodioritas y tonalitas en su interior, y cuerpos más diferenciados en los bordes (Creixell, 2001). Entre los 36°30' - 38°S Creixell (2001) divide al batolito en 3 zonas, con base en diferencias mineralógicas y modales, las que denomina: Granitoides de Concepción, Tonalitas de Santa Juana y Granitoides de Nahuelbuta. El batolito intruye a las rocas metamórficas de la Serie Oriental, e infrayace en inconformidad a las rocas estratificadas del área, y su edad se acota entre los 300 - 320 Ma (Deckart y otros, 2014).

### **2.2.3. Mesozoico**

#### **2.2.3.1. Plutón Hualpén**

Cuerpo intrusivo constituido por monzogranitos y monzonitas leucocráticas de dos micas (Creixell, 2001), distribuido a lo largo de la península de Hualpén y en partes aisladas de la península de Tumbes, en contacto con las rocas de la Serie Occidental. El Plutón Hualpén corresponde a un pulso de magmatismo triásico (220 - 225 Ma) de carácter granítico y epizonal, y forma parte de un grupo de rocas intrusivas mesozoicas que afloran de manera discontinua entre los 34° y 37°S, en áreas de poca extensión, emplazadas a bajas profundidades, con aureolas de contacto pequeñas y sin evidencias de metamorfismo o deformación (Vásquez y otros, 2011).

#### **2.2.3.2. Formación Quiriquina**

Definida formalmente por Biró-Bagóczy (1982) para referirse a las capas cretácicas fosilíferas en la localidad tipo de Las Tablas, ubicada en el noroeste de la isla Quiriquina, y con parlocalidad tipo en el sector costero de Cocholgüe, al norte de Tomé. La Formación Quiriquina corresponde a una secuencia sedimentaria marina de edad Maastrichtiano (Stinnesbeck, 1986) compuesta principalmente por areniscas glauconíticas, con contenido variable de bioturbaciones y fósiles, y en menor medida, niveles finos y conglomerádicos. La unidad está emplazada desde los 37°S en la península de Arauco hasta los 33°S en la región de Valparaíso (Algarrobo) (Buatois y Encinas, 2011), y se distribuye localmente en los acantilados y plataformas de abrasión de los bordes costeros, y también en los cerros isla de la zona urbana, sobreyaciendo en inconformidad al Basamento Metamórfico y el Batolito Costero del Sur e infrayaciendo concordantemente a la Formación Cosmito.

### **2.2.4. Cenozoico**

#### **2.2.4.1. Formación Cosmito**

Definida por Galli (1967), donde se incluyen a las rocas sedimentarias eocenas del área de Concepción y Talcahuano. Su localidad tipo se define a 5 km al norte de Concepción en el sector de Cosmito, y es descrita como un conjunto de capas horizontales o levemente inclinadas de areniscas y lutitas fosilíferas, de origen marino y continental, asociadas a conglomerados y carbón.



El espesor medio estimado es de 300 m en Cosmito (Galli, 1967), y su ambiente de depositación es interpretado como depósitos lagunares - costeros asociados a pantanos y dunas litorales, formados en un ambiente de baja energía en una cuenca marginal (Galli, 1967). La Formación Cosmito sobreyace concordantemente a la Formación Quiriquina, e infrayace en discordancia angular a la Formación Andalién y los depósitos no consolidados del Cuaternario (Galli, 1967). Esta unidad es correlacionable con la Formación Curanilahue (Galli, 1967) y Formación Cerro Alto (Frutos y otros, 1982).

#### 2.2.4.2. Formación Andalién

Galli (1967) agrupa en esta formación areniscas y conglomerados muy meteorizados distribuidos en las serranías bajas ubicadas entre Cerro Verde y Concepción, con localidad tipo en el sector donde el río Andalién bordea por el NE a la ciudad de Concepción. Su ambiente de sedimentación es interpretado como continental de piedemonte asociado a depósitos fluviales. Estratigráficamente sobreyace en discordancia angular a rocas paleógenas de la Formación Cosmito e infrayace de la misma forma a los sedimentos de la Formación Huachipato (García, 2004). Sobre la base de relaciones estratigráficas con las demás unidades del área, Galli (1967) estima una edad de Plioceno - Pleistoceno, mencionando una posible correlación con la Formación Tubul en la península de Arauco.

#### 2.2.4.3. Depósitos fluviales y litorales

Corresponden a materiales no consolidados a semiconsolidados, constituidos por gravas y arenas originados a partir de la meteorización, erosión y transporte de partículas provenientes de rocas preexistentes por medio de agentes fluviales y/o la acción del mar. En los depósitos fluviales se diferencian a grandes rasgos aquellos movilizados por el río Biobío, correspondientes a arenas oscuras correlacionables a la Formación Huachipato (Galli, 1967) y la unidad informal Arenas del Biobío (Quezada, 1996), y aquellos sedimentos cuarzo - feldespáticos transportados por el río Andalién atribuibles a la unidad informal Arena Andalién (Galli, 1967). Se distribuyen en el área en las llanuras y terrazas comprendidas entre las bahías de San Vicente y Concepción, y en los cauces de los ríos y playas del área. Es posible asignarles una edad de Pleistoceno - Reciente con base en sus relaciones de contacto (Quezada, 1997).

### 2.2.5. Estructuras

La comuna de Talcahuano corresponde a un horst y una fosa tectónica (Quezada, 1996), donde el horst está representado por las penínsulas de Hualpén y Tumbes, y es limitado por fallas normales de dirección NE - SO, y la fosa se constituye por la bahía de Concepción, limitada al E por la Cordillera de la Costa. Cerros islas se alzan en la fosa y representan bloques tectónicos basculados hacia el NO controlados también por fallas normales subverticales de dirección NE - SO (Quezada, 1997).

La península de Tumbes, en particular, está limitada al S por la falla San Vicente (Galli, 1967) (Figura 2.3), y es afectada por fallas de tipo indeterminado que generan movimiento de bloques (Quezada, J., comunicación personal, 2020).



### 3. MARCO HIDROLÓGICO

#### 3.1. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

##### 3.1.1. Cuencas y red de drenaje

El área de estudio está ubicada dentro de la cuenca costera entre los ríos Itata y Biobío establecida por la Dirección General de Aguas (DGA), la cual drena gran parte de la zona costera entre las comunas de Tomé y la parte norte de Talcahuano, con una extensión aproximada de 1500 km<sup>2</sup>. En ella forma parte de las denominadas “Subcuencas Costeras entre Río Andalién y Río Biobío” (código DGA 0823) (Figura 3.1a).

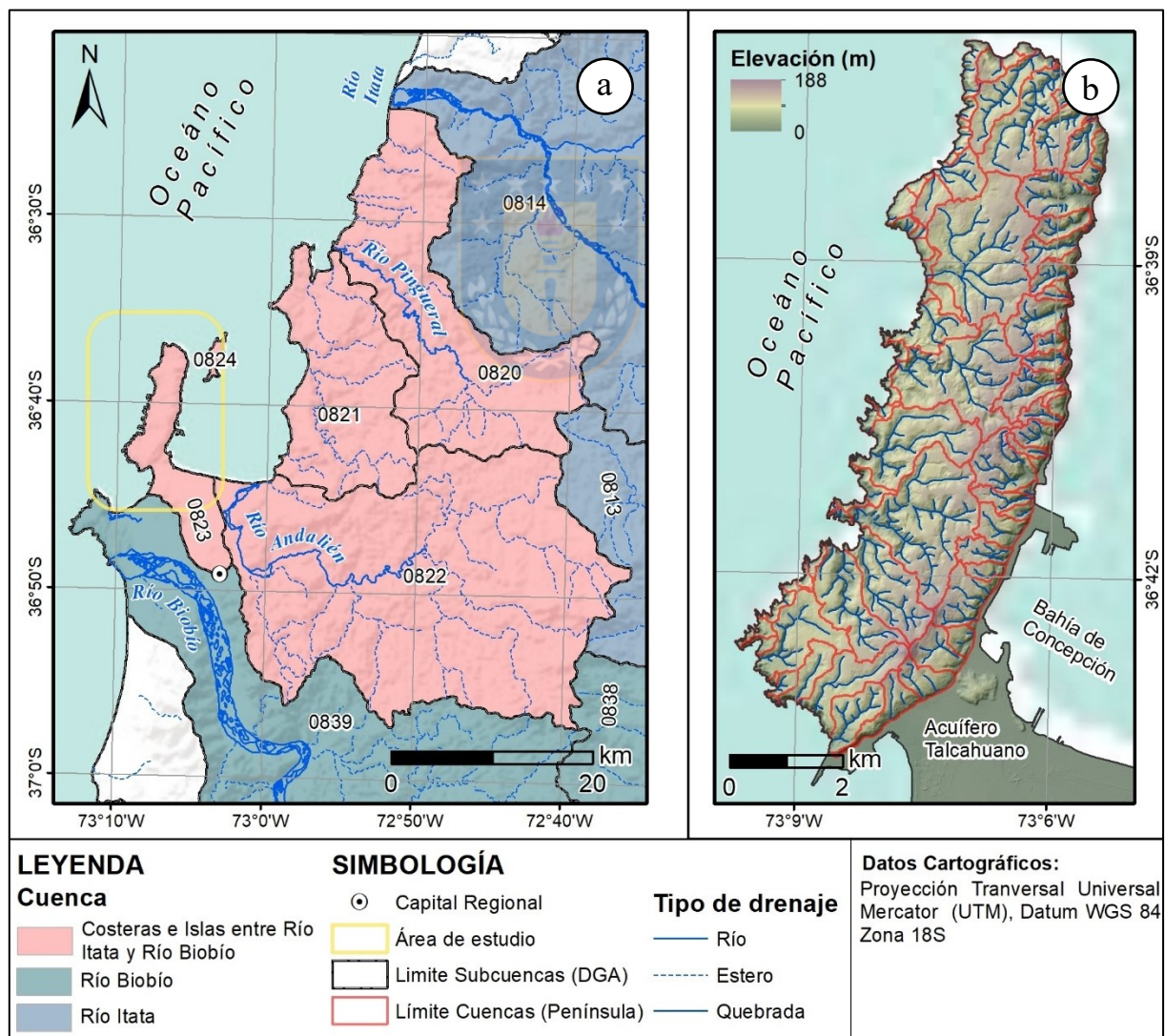


Figura 3.1: Mapa de cuencas y redes hídricas. Números corresponden a los códigos DGA de las subcuencas.



Debido a las características geomorfológicas de la península, esta se encuentra separada de los principales sistemas hidrográficos cercanos (ríos Andalién y Biobío), y el drenaje se constituye por una red independiente, de carácter ramificado y distribuido a lo largo numerosas cuencas individuales de área variable que desembocan principalmente al O y N en el Océano Pacífico, al E en la bahía de Concepción, y en menor medida hacia el S en el acuífero Talcahuano (Figura 3.1b). Las cuencas de mayor superficie se disponen mayoritariamente en la parte occidental de la península, donde alcanzan extensiones de hasta ~350 ha. En contraste, en el sector oriental y en zonas adyacentes a la costa, las redes están representadas por quebradas de menor desarrollo que pueden incluso alcanzar el mar en forma individual, conformando cuencas de superficie reducida.

## **3.2. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS**

### **3.2.1. Unidades hidrogeológicas locales**

La geología de las cuencas costeras de la región del Biobío se caracteriza por la presencia de unidades antiguas cubiertas por formaciones sedimentarias que van desde el Cretácico al reciente. Cada una de estas posee características litológicas que son determinantes en su comportamiento hidrogeológico, siendo posible separarlas a grandes rasgos en unidades permeables e impermeables.

#### **3.2.1.1. Unidades impermeables**

Representadas por las rocas intrusivas del Batolito Costero del Sur y el Plutón Hualpén y las rocas metamórficas de las series Oriental y Occidental. Las litologías de ambas unidades corresponden a rocas con baja a nula permeabilidad y porosidad, por lo que muestran un comportamiento que va desde acuícludo a acuífugo, con almacenamiento y transmisión de agua baja o nula en roca fresca.

Se incluyen también en este grupo los sedimentos consolidados del área, donde se tienen las formaciones Quiriquina, Cosmito y Andalién, constituidas principalmente por areniscas, con variaciones en la granulometría y escasa matriz. Estas unidades, debido a procesos de compactación y cementación, poseen una capacidad de almacenamiento y permeabilidad considerablemente menor que la de los depósitos no consolidados, y no muestran evidencias de constituir acuíferos relevantes.

### 3.2.1.2. Unidades permeables

Representadas por los depósitos fluviales y litorales que descansan sobre el basamento metamórfico e intrusivo, y que gracias a sus características sedimentológicas poseen buena permeabilidad y porosidad, pudiendo albergar volúmenes de agua considerables donde la potencia de los sedimentos lo permite. Especial atención requieren los depósitos fluviales y marinos, y las areniscas negras en la llanura de Talcahuano - Concepción - Hualpén, en estos depósitos se define el denominado “Acuífero Talcahuano”, determinado como el único acuífero relevante de la región del Biobío mediante un levantamiento hidrogeológico realizado por Aqualogy Medioambiente (2013), y que limita al norte con la bahía de Concepción y el área de estudio (Figura 3.2).

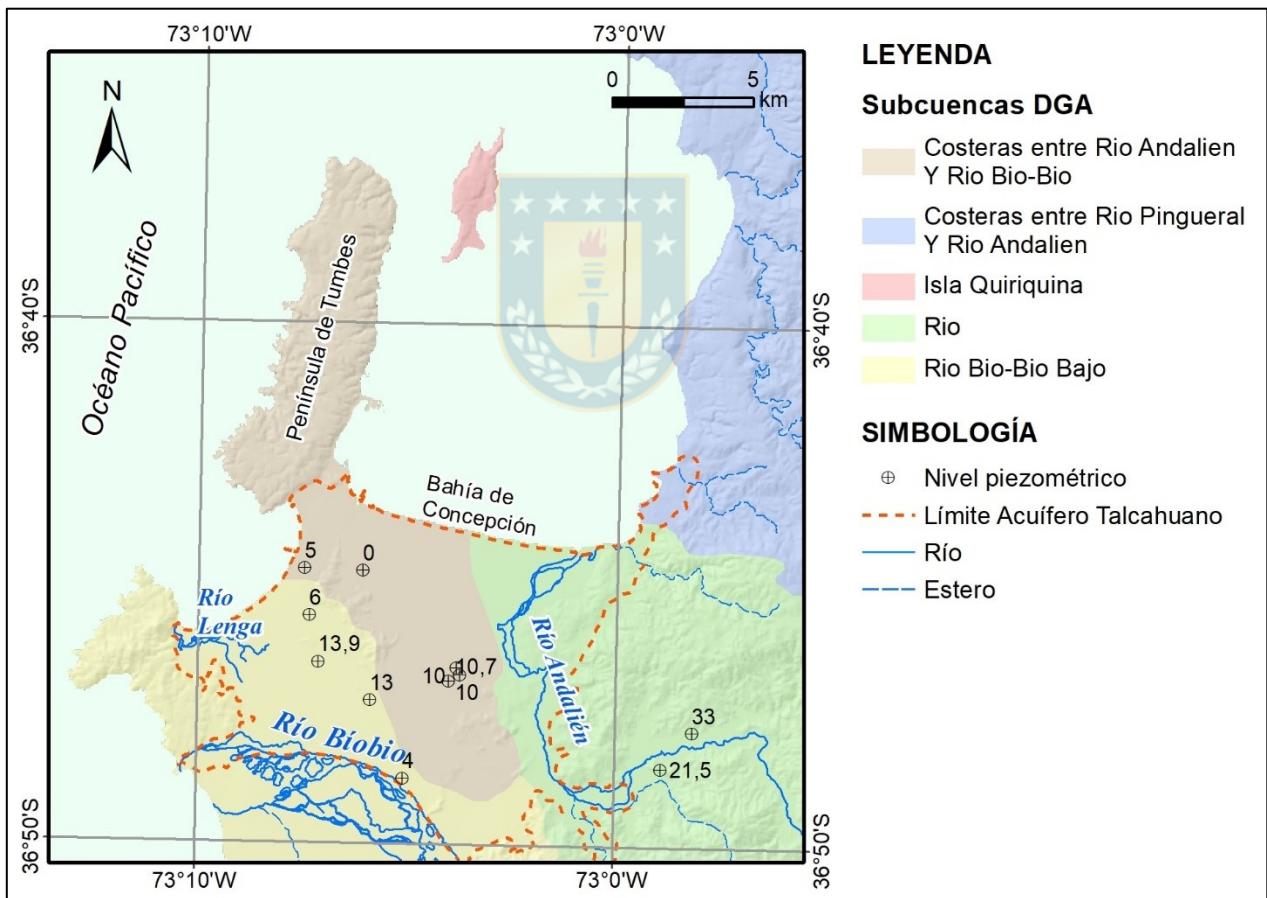


Figura 3.2: Límites y piezometría del Acuífero Talcahuano. Modificado de Aqualogy Medioambiente (2013).

### 3.2.2. Hidrogeología en rocas cristalinas

#### 3.2.2.1. Generalidades

Las rocas cristalinas (*hard rocks*), en las que se consideran las rocas metamórficas (excluyendo el mármol) y plutónicas, constituyen el basamento de los continentes y afloran en gran parte del mundo, mayoritariamente en regiones tectónicamente estables (Lachassagne y otros, 2014). En algunas de estas áreas, los acuíferos desarrollados representan una fuente de recursos hídricos relevantes para las comunidades, donde se destacan regiones de India y África (Lachassagne y otros, 2011; Ngoupayou y otros, 2019), a pesar de la baja magnitud en términos de descarga por pozo (desde 100 L/h hasta algunos pocos m<sup>3</sup>; Courtois y otros, 2009) en comparación con aquellos acuíferos que ocurren en contextos volcánicos, kársticos o en sedimentos no consolidados porosos.

Este tipo de rocas poseen conductividades hidráulicas intrínsecas muy bajas (Kresic y Stevanovic, 2009), presentando valores  $< 10^{-8}$  m/s (Lachassagne y otros, 2014). Es por esto que el potencial para el almacenamiento de agua en regiones donde se disponen estas litologías, dependerá de la conductividad hidráulica permitida por la permeabilidad secundaria, la cual tiene su principal origen en procesos de meteorización (Lachassagne y otros, 2011), los que son determinados a su vez por diversos factores, tales como geomorfología, precipitaciones, características litológicas y latitud (Taylor y Howard, 2002).

La naturaleza de los acuíferos desarrollados en este tipo de rocas se considera heterogénea, y la permeabilidad de las fracturas puede mostrar cambios de varios órdenes de magnitud y exhibir considerable variación espacial en distancias cortas (Lachassagne y otros, 2011), y se caracterizan además por variaciones locales en la potencia de los materiales meteorizados (Ngoupayou y otros, 2019). Diversos autores (e.g., Courtois y otros, 2009, Lachassagne y otros, 2011) han realizado estudios de los perfiles de meteorización en diversas partes del mundo, los cuales sugieren un modelo de 2 capas subhorizontales, compuestas por el regolito, y una capa fisurada/fracturada permeable ubicada en los primeros metros a decenas de metros de la capa anteriormente concebida como roca no meteorizada (Figura 3.3).

En este modelo, el perfil de meteorización en el regolito ha sido descrito en detalle, sobre todo en climas tropicales (Figura 3.4), donde cada capa puede presentar un carácter variable, con potencias que pueden ir desde unos pocos metros a varias decenas de metros.

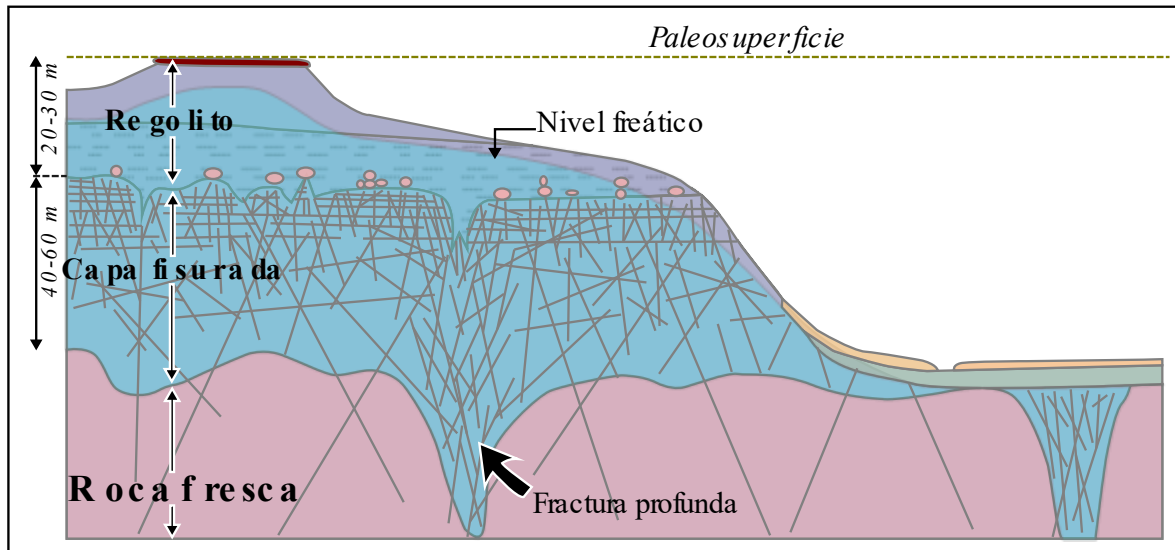


Figura 3.3: Modelo conceptual de las propiedades hidrogeológicas en rocas cristalinas. Modificado de Wyns y otros (2004).

Por otro lado, la capa fisurada infrayacente se caracteriza por una gran densidad de fracturas en la roca, y puede exhibir una potencia con una magnitud de incluso el doble del regolito. En esta capa la densidad y conectividad de las fracturas es máxima en la parte superior, alcanzando conductividades hidráulicas máximas de hasta  $10^{-4}$  m/s, y decreciendo con la profundidad en dirección a la roca fresca (Lachassagne y otros. 2011).

### 3.2.2.2. Contexto local

El área de estudio posee una geología dominada por rocas metamórficas de la Serie Occidental, localmente representada por filitas foliadas y plegadas, y en menor medida, rocas intrusivas correspondientes a monzogranitos del denominado Plutón Hualpén. A nivel local no existen estimados propuestos para el perfil de meteorización, aunque Quezada y otros (1997) describen en el área una importante cubierta de suelo.

Sondajes realizados en el área (Anexo VII) muestran valores variables para los distintos horizontes, indicando espesores entre 0.3 a 3.75 m para una capa de suelo de carácter mayoritariamente arcilloso y plástico, y un espesor de hasta 6.35 m para una capa de roca altamente fracturada y descompuesta bajo este. Adicionalmente, en un pozo del área se registra la presencia de estructuras de la roca original a 7.5 m de profundidad, representada por una veta de cuarzo de grosor centimétrico, y a los 10 m se registra un color azulado e indicios de foliación asociados a las características originales de las roca metamórficas del área (Figura 3.5).

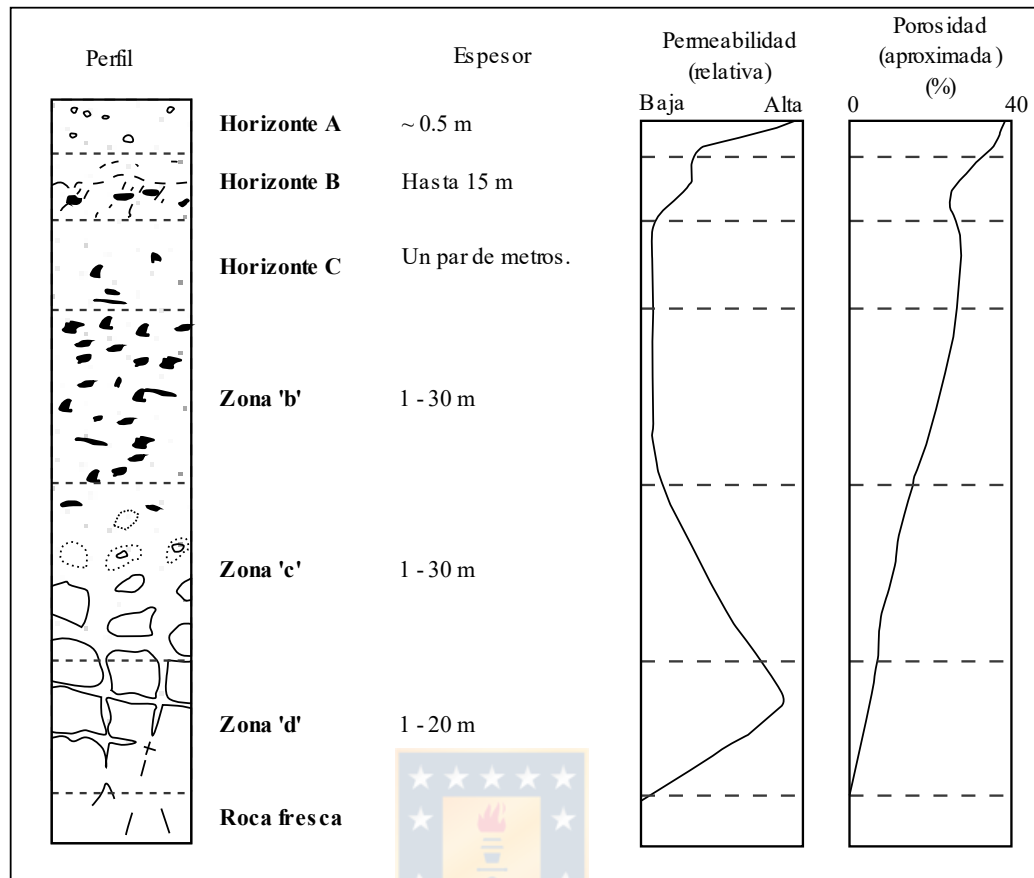


Figura 3.4: Perfil de meteorización del regolito en rocas cristalinas. Modificado de Acworth (1987).

### 3.3. VERTIENTES

#### 3.3.1. Generalidades

Una vertiente es un lugar en el que el nivel freático alcanza la superficie y aflora agua subterránea creando un flujo visible (Kresic y Stevanovic, 2009). Las vertientes pueden cumplir numerosas funciones, entre las que se tienen el aporte de agua y humedad necesaria para la mantención de la flora y fauna, además de su uso como fuentes de agua para consumo humano, regadíos u otros.

Debido a su naturaleza, las vertientes representan una transición entre el agua superficial y subterránea, y constituyen una oportunidad única para estudiar una gran cantidad de procesos subsuperficiales, especialmente en regiones con escasos pozos (Manga, 2001). En este contexto,



el análisis de la hidrogeoquímica de las vertientes puede entregar información respecto al origen de las aguas y el tiempo de residencia de estas en el acuífero (Kresic y Stevanovic, 2009).

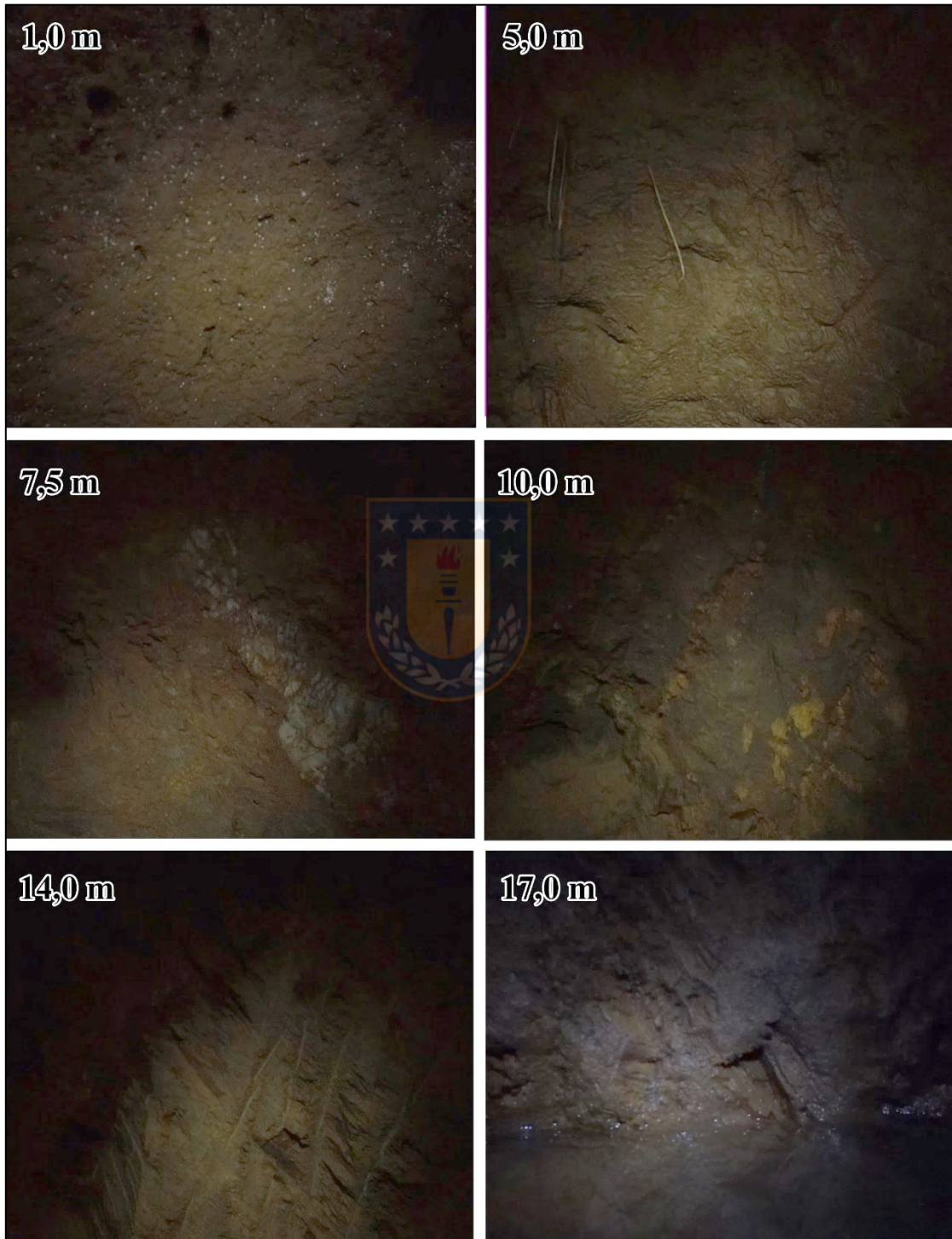


Figura 3.5: Fotografías del perfil de un pozo del área.

De igual manera, cambios en el caudal de descarga de las vertientes a lo largo del tiempo (*spring hydrograph*), constituyen una herramienta importante para entender variaciones en la recarga y propiedades del acuífero, aún en casos donde estos parámetros no pueden ser observados directamente (Bredehoeft, 2007). El monitoreo del caudal facilita, de este modo, establecer patrones a largo plazo y entender variaciones estacionales (Tubman, 2007), proporcionando información valiosa sobre la disponibilidad del agua a lo largo del año.

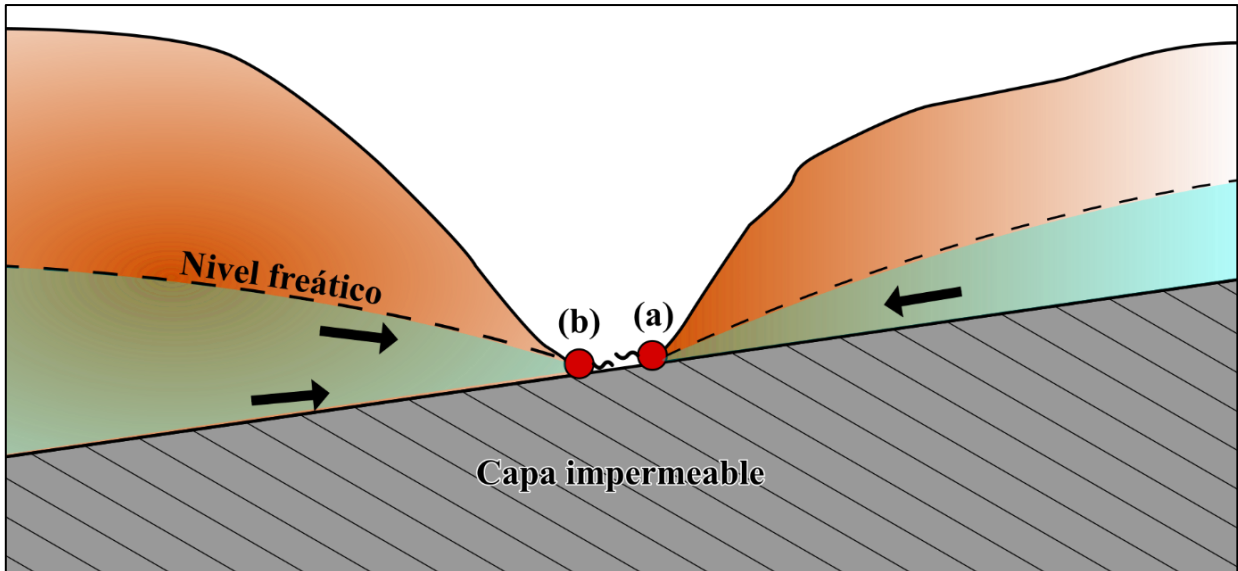
### 3.3.2. Clasificación de vertientes

Existen numerosos métodos para la descripción y clasificación de vertientes, basados en diferentes parámetros, entre los más comunes se tienen: caudal de descarga y su uniformidad, naturaleza del nivel piezométrico, características geológicas y estructurales que controlan la descarga, calidad del agua y temperatura. A continuación, se describen algunas de las formas de denominar y clasificar vertientes.

El orificio de una vertiente es el lugar desde donde el agua subterránea es descargada a la superficie. Las vertientes originadas en rocas consolidadas usualmente poseen un orificio bien definido, en contraste con lo observado comúnmente en sedimentos no consolidados, donde el flujo de agua no es observado inmediatamente, si no que la superficie del terreno está saturada respecto a las áreas adyacentes produciendo una descarga difusa del agua. Las vertientes originadas de esta última forma son denominadas vertientes de infiltración (*seepage springs*). Por otro lado, una vertiente de fractura (*fracture/fissure spring*) se refiere a la descarga concentrada desde planos de estratificación, diaclasas y/o fallas en rocas consolidadas.

El factor principal que controla la descarga corresponde a la gravedad. De este modo, se puede clasificar a las vertientes según la naturaleza del nivel piezométrico del acuífero en: vertientes de gravedad o descendentes (*gravity spring/descending spring*), que ocurren en acuíferos libres cuando el nivel freático interseca la superficie, y vertientes artesianas o ascendentes (*artesian spring/ascending spring*), cuando la descarga ocurre debido a la presión en condiciones confinadas.

En las vertientes de gravedad, cuando el contacto entre la unidad que contiene el agua y la capa impermeable posee una pendiente hacia el punto de descarga en la dirección del flujo, se llama vertiente de contacto descendente (*descending contact spring*). Por otro lado, cuando la dirección del flujo va contra la pendiente del contacto se denomina vertiente de contacto desbordante (*overflowing contact spring*) (Figura 3.6).



**Figura 3.6: Vertientes de gravedad.** a) Descendente (*descending contact spring*). b) Desbordante (*overflowing contact spring*). Modificado de Milojevic (1966).

Por otro lado, Meinzer (1923) propone una clasificación basada en el volumen promedio de descarga que es aún ampliamente utilizada en EE. UU (Kresic y Stevanovic, 2009) (Tabla 3.2). Debido a que el caudal de descarga depende de muchos parámetros y varía a lo largo del tiempo, la práctica general en muchos países es evaluar el potencial de explotación de las vertientes con base en el caudal mínimo medido durante un período prolongado de tiempo.

**Tabla 3.1: Clasificación de vertientes según su volumen de descarga.** Meinzer (1923).

Orden	Descarga
1°	> 10 m <sup>3</sup> /s
2°	1 a 10 m <sup>3</sup> /s
3°	0.1 a 1 m <sup>3</sup> /s
4°	10 a 100 L/s
5°	1 a 10 L/s
6°	0.1 a 1 L/s
7°	10 a 100 cm <sup>3</sup> /s
8°	< 10 cm <sup>3</sup> /s

En la evaluación de la disponibilidad del agua es importante también considerar la variabilidad del caudal, la medida más simple de esta es la razón entre la descarga máxima y mínima, como se indica en la Fórmula 3.1. Según esta fórmula, razones mayores a 10 indican vertientes muy variables, y aquellas menores a 2 son denominadas constantes (*steady springs*).



$$I_v = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{Q_{min}} \quad 3.1$$

Meinzer (1923) también propone como otro indicador de la variabilidad la Fórmula 3.2, según la cual las vertientes con un porcentaje menor a 25 serían constantes y aquellas mayores a 100 serían vertientes variables.

$$V (\%) = \frac{Q_{m\acute{a}x} - Q_{min}}{Q_{promedio}} * 100 \quad 3.2$$



## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. GENERALIDADES**

Con el fin de cumplir los objetivos específicos y complementar los diferentes análisis realizados en este estudio se recopilan antecedentes bibliográficos de la zona de estudio, entre los que se incluyen información geológica, geomorfológica, hidrológica, hidrogeológica y ambiental. Para dicha tarea se utiliza la información disponible y/o solicitada en servicios públicos: IDE Chile, Dirección de Medio Ambiente de Talcahuano y la Dirección General de Aguas (DGA), e informes de estudios particulares solicitados al MINVU en el marco de la ley de transparencia (20.285).

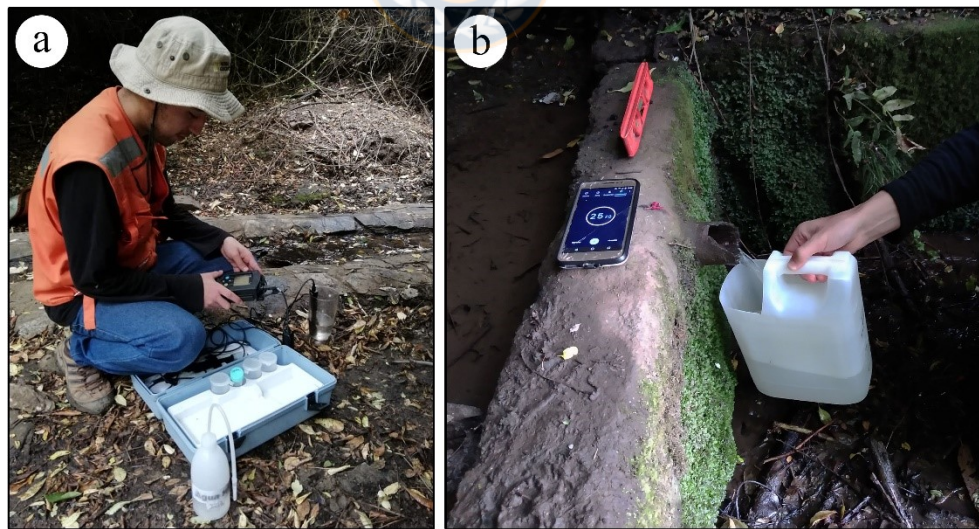
El trabajo se divide en una parte hidrogeoquímica que involucra el análisis de elementos mayores y parámetros fisicoquímicos, y una parte hidrogeológica en la que se monitorean volúmenes de descarga en vertientes y el nivel freático de un pozo, y que incluye además un estudio de la recarga en el área considerando los usos de suelos actuales y proyecciones. Para el desarrollo de estas partes se llevan a cabo diferentes campañas de terreno. La primera consiste en un período de reconocimiento de las vertientes del área entre agosto y octubre del 2019, donde se visitan parte de las vertientes reconocidas en estudios anteriores además de otras adicionales. Durante este período se evalúan aquellas que serán elegidas para los análisis hidrogeoquímicos y las mediciones de caudales. La segunda campaña de terreno consiste en la toma de muestras durante el mes de enero del 2020, esta será explicada en detalle en la siguiente sección. Finalmente, se incluye una parte final de difusión en la que se lleva a cabo el desarrollo de una página web.

### **4.2. HIDROGEOQUIMICA**

Para el muestro de agua (cationes y aniones) se seleccionan 12 puntos, de los cuales 11 corresponden a cursos de agua superficiales de vertientes y el otro a un pozo doméstico. El proceso de recolección de muestras involucra, en primer lugar, una preparación de los recipientes a utilizar (botellas de polietileno) y sus respectivas tapas y contratapas. El tratamiento preliminar consiste en 3 enjuagues con agua Milli-Q para las botellas donde se medirán alcalinidad y aniones, y en aquellas usadas en la medición de cationes es necesario de manera adicional realizar un baño ácido con  $\text{HNO}_3$  al 1% (v/v) por al menos 24 horas.

Posteriormente se efectúa una visita a los puntos seleccionados en un terreno realizado durante el verano del 2020. Se realiza la toma de muestras en los sectores más cercanos a la fuente del agua, dentro de lo permitido por la accesibilidad del terreno. En cada punto se extraen: 2 botellas de 250 ml destinadas al análisis a cationes y aniones y 1 botella de 500 ml sin filtrar para la alcalinidad. En el primer caso, el agua es preliminarmente pasada por un filtro de  $0.45\ \mu\text{m}$  que evita la incorporación de partículas sólidas, y en el caso de la botella de cationes es necesaria además la incorporación de 2.5 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) de concentración 4 normal para disminuir el pH e impedir la precipitación de sólidos. En todos los procedimientos los envases son ambientados previo a la toma de muestras. Las muestras son posteriormente refrigeradas a  $4^\circ\text{C}$  hasta ser enviadas al laboratorio SAT de la Facultad de Química de la Universidad de Concepción para el análisis de elementos mayores, el que se llevó a cabo mediante el espectrofotómetro de absorción atómica “Thermo Scientific ICE 3000 Series AA Spectrometer”.

En paralelo se midieron *in situ* parámetros fisicoquímicos: temperatura ( $T^\circ$ ), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto (LDO), mediante un multiparámetro portable HQ40D de la marca Hach (Figura 3.1a), el cual se calibra antes de emplearse según las indicaciones del fabricante.



**Figura 4.1: Metodología de trabajo en terreno.** a) Medición *in situ* de parámetros fisicoquímicos con multiparámetro. Vertiente Vista Hermosa. b) Medición de caudal con contenedor graduado y cronómetro. Vertiente Estrella Azul.

Luego de recibir los resultados de los análisis químicos se lleva a cabo el cálculo del balance de cargas iónicas, que se basa en la electroneutralidad del agua, donde el error en la medición se define como muestra la Fórmula 4.1:

$$\text{Error en balance iónico (\%)} = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} * 100 \quad 4.1$$

Finalmente, se recopila y ordena la información recolectada de los análisis químicos para su análisis, visualización e interpretación. Los resultados son tratados mediante gráficos, diagramas y matrices de correlación, realizados con la ayuda de las librerías de Python Matplotlib (Hunter, 2007), Plotly y pandas. Para evaluar ciertos parámetros de la calidad del agua, los resultados se comparan respecto a valores establecidos por la norma chilena de agua potable (NCh 409. Of. 2005) y la norma diferentes usos (NCh N°1333/78), además de calcular índices adicionales ampliamente utilizados a lo largo del mundo para evaluar la calidad del riego (Sakram y Adimalla, 2018). Entre estos últimos se consideran: razón de adsorción de sodio (RAS) (Fórmula 4.2), sodio porcentual (%Na) (Formula 4.3) y carbonato sódico residual (RSC) (Formula 4.4) (valores expresados en meq/L).

$$SAR = \frac{Na}{(\sqrt{Ca + Mg})/2} \quad 4.2$$

$$\%Na = \frac{Na + K}{Ca + Mg + Na + K} * 100 \quad 4.3$$

$$RSC = HCO_3 + CO_3 - (Ca + Na) \quad 4.4$$

### 4.3. HIDROGEOLOGÍA

El análisis hidrogeológico preliminar consistió en la realización de mapas de elevación, pendiente, y delimitación de redes y cuencas, los que fueron creados a partir de un modelo de elevación digital de resolución 5 x 5 m mediante las herramientas hidrológicas de la ArcToolbox del software ArcMap. Se consideran además la medición periódica del caudal en vertientes y una estimación de la recarga en la península, de los que su metodología se detalla a continuación.

### 4.3.1 Medición de caudales y nivel estático en pozo

Las mediciones de caudal se efectúan en 7 vertientes, seleccionadas con base en la existencia de antecedentes de uso por parte de la comunidad y de la facilidad para la medición, determinada por la calidad de encauzamiento de los cursos de agua y su accesibilidad. Las mediciones comienzan en las últimas semanas de agosto y primeras semanas de septiembre del 2019 para 2 vertientes, a las que se suman 5 vertientes adicionales en el mes de enero del 2020. Todas las mediciones son llevadas a cabo cada 1 o 2 semanas hasta el inicio del mes de agosto del 2020, abarcando un período que incluye los meses con mayores y menores promedios de precipitaciones.

El cálculo del caudal ( $Q$ ) se realiza a partir de la razón entre el volumen registrado en un contenedor plástico graduado y el tiempo medido por un cronómetro (Figura 4.1b), donde la influencia del error aleatorio en las medidas de caudal se reduce promediando al menos 3 mediciones, e idealmente 5, en las que la mayor y menor son eliminadas. Para la medida de la variabilidad en la descarga de las vertientes se utiliza la razón entre los valores máximos y mínimos ( $I_v$ ) (Fórmula 3.1), y no aquellos parámetros que incluyen el promedio de descarga, esto debido a lo reducido del período de estudio para algunas de estas, lo que no permite estimar con seguridad un promedio representativo de su caudal.

Debido a la falta de antecedentes sobre la piezometría de la península y el limitado acceso a pozos, sólo es posible el estudio prolongado de 1 pozo doméstico, en el cual la profundidad de su nivel freático se monitorea con la ayuda de un distanciómetro láser en el período comprendido entre septiembre del 2019 y agosto del 2020.

### 4.3.2. Balance hídrico

Para estimar la recarga del área se utiliza el software EASY BAL Ver. 3.0, desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña, que permite el cálculo de la evapotranspiración potencial mediante el método de Thornthwaite. El análisis se lleva a cabo con valores mensuales promedio de precipitación y temperatura para un período de 53 años comprendido entre enero de 1967 y diciembre de 2019, obtenidos desde la página de la Dirección Meteorológica de Chile para la estación Carriel Sur, la cual se selecciona entre las estaciones meteorológicas disponibles debido a su proximidad espacial con el área de estudio (~8 km) y su amplio registro temporal.

Las características hidráulicas de los suelos solicitadas por el modelo (capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica saturada) se determinan mediante la calculadora del triángulo de texturas (Saxton y otros, 1986), a partir de las fracciones de arena y arcilla proporcionadas por el Estudio Agrológico VIII (CIREN, 1999) para la serie Constitución, y datos adicionales respecto a las características del suelo se adquieren a partir observaciones en terreno y fotos al perfil de un pozo mediante la cámara del dron DJI Phantom 3. La información respecto a los usos de suelo del área se obtiene desde un archivo ESRI Shapefile proporcionado por la CONAF y actualizado al año 2015.

Los valores de máxima absorción o laminación ( $S$ ) se obtienen mediante el método de número de curvas ( $NC$ ) (SCS, 1986) a través de la Fórmula 4.5:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \text{ (mm)} \quad 4.5$$

Donde  $NC$  representa el valor ponderado por cuenca para los diferentes usos de suelo y grupos hidrológicos de suelo dados según la Tabla 1 (Anexo V).

Para la estimación del efecto de los usos de suelo en la recarga se recalculan los valores del modelo original asumiendo como áreas urbanas adicionales las zonas indicadas como “zonas de extensión residencial” por el Plan Regulador Comunal de Talcahuano (2016) (Anexo VIII).

Por último, se realiza una estimación espacial de la escorrentía mediante los valores del umbral de escorrentía ( $P_o$ ), en el que su estimación se realizó según la metodología propuesta por el SGS (Soil Conservation Service), en la que se debe obtener una zonificación del terreno basada en la pendiente, permeabilidad (dada por la serie de suelo) y usos de suelo, y que según su intersección se asignan valores según lo indicado por la Tabla 2 (Anexo V).

### 4.3. DIFUSIÓN

Con el objetivo de acercar investigaciones de carácter geológico a la comunidad, se realiza un programa de difusión a través de la creación de una página web. En este sitio, se comparte información relevante acerca de las vertientes y parte de los resultados de la presente investigación, permitiendo proporcionar información para una mejor protección y un adecuado uso de los recursos hídricos locales. La página y sus mapas y gráficos son creados mediante Python mediante las

librerías Django, Folium y Dash, a partir de datos propios e información adicional proporcionada por la municipalidad de Talcahuano y Claudia Saavedra (2019).





## 5. RESULTADOS

### 5.1. HIDROGEOQUÍMICA

#### 5.1.1. Ubicación y descripción de los puntos muestreados

Se muestrean 12 puntos (Figura 5.1), de los cuales 11 consisten en aguas superficiales provenientes de vertientes y 1 (PT12) corresponde a una muestra de agua subterráneas extraída de un pozo. En la Tabla 1 (Anexo I) se indican las coordenadas y cotas de cada punto.

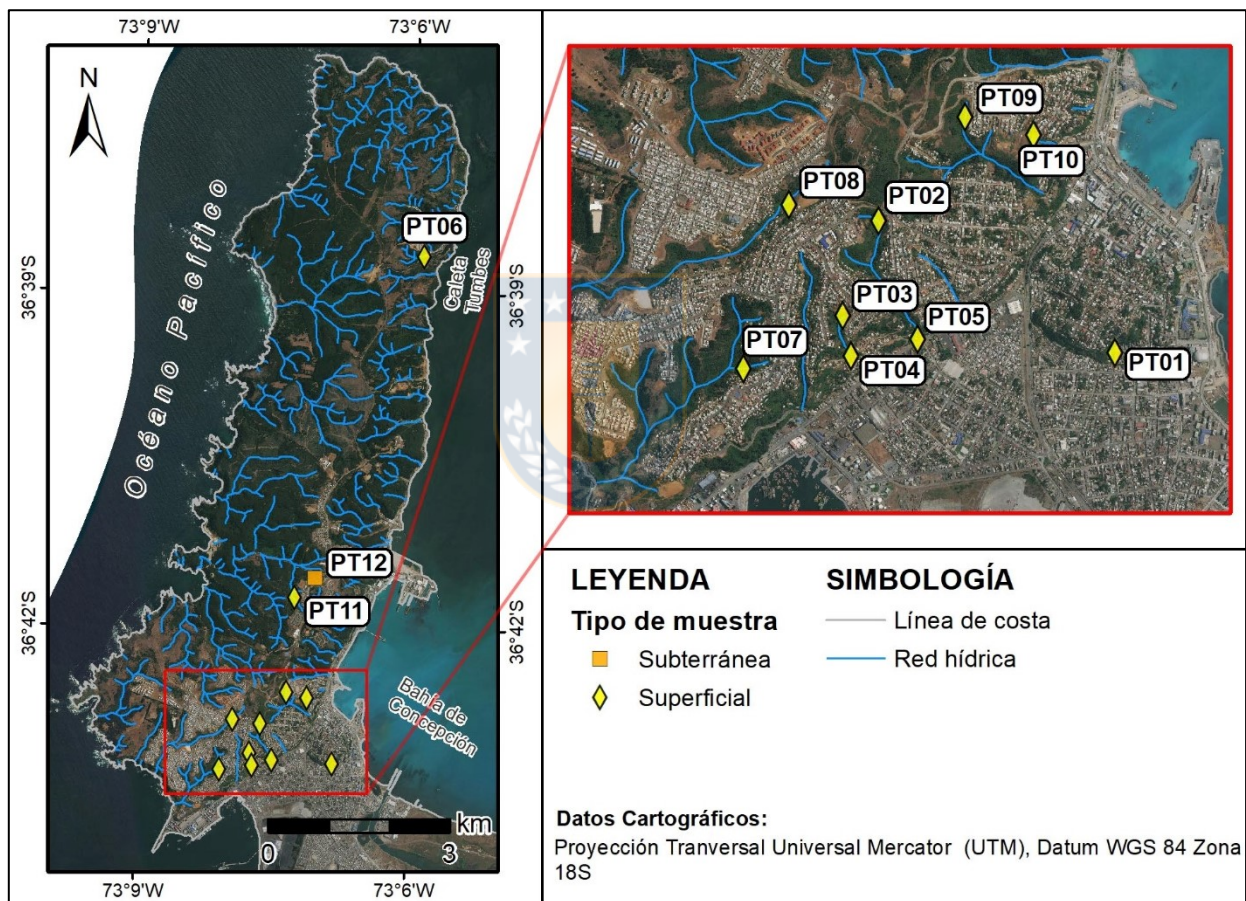


Figura 5.1: Mapa de puntos muestreados. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.

Las muestras se disponen sobre las rocas metamórficas y plutónicas del área, con la excepción de PT01, ubicada fuera de la península en un cerro isla adyacente conformado por rocas sedimentarias. Cada muestra se distribuye a lo largo de distintas cuencas, con la excepción de los pares PT03 - PT04 y PT02 - PT05. Los cursos superficiales varían en forma y caudal, y están asociados a quebradas con abundante vegetación (Figura 5.2a), y la mayoría posee fuentes cercanas



a asentamientos humanos, donde en ocasiones se puede apreciar contaminación de carácter antrópico en zonas aledañas. El pozo doméstico (PT12) (Figura 5.1b), tiene al momento de tomar la muestra un nivel freático de 16.6 m, y no posee registro de explotación en al menos 8 años.



**Figura 5.2: Tipos de puntos de muestreo** a) Curso superficial, vertiente La Torre (PT05). b) Agua subterránea en pozo (PT12).

### 5.1.2. Parámetros fisicoquímicos

La Tabla 5.1 y la Figura 5.3 exponen los valores de los parámetros fisicoquímicos. Adicionalmente, el Anexo II muestra los mapas con la distribución espacial de cada parámetro.

**Tabla 5.1: Parámetros fisicoquímicos.**

Código	Nombre de la vertiente	pH	T (°C)	CE (μS/cm)	LDO (mg/L)
PT01	Serrano Cerro David Fuentes	6.68	14.6	575	6.48
PT02	Santa Julia	6.07	13.8	123	6.99
PT03	Baroa Bajo	6.65	14.4	264	7.35
PT04	Juan Chávez	7.74	14.1	292	10.26
PT05	La Torre	7.51	14.6	238	10.23
PT06	San Juan Tumbes	7.33	15.5	128.4	9.95
PT07	La Gloria	6.91	14.5	369	9.14
PT08	Los Cipreses	6.15	14.9	392	8.61
PT09	Vista Hermosa	6.63	13.9	231	8.57
PT10	28 de Octubre Cerro Cornou	6.27	18.6	219.1	9.95
PT11	Estrella Azul	6.07	15.1	292	7.64
PT12	Pozo Tola	6.51	15.6	328	6.35

El pH medido presenta valores entre 6.07 (PT02 y PT11) y 7.74 (PT04), donde 9 muestras corresponden a aguas ácidas y 3 a aguas alcalinas. Las temperaturas obtenidas oscilan entre 13.8°C (PT02) y 18.6°C (PT10), con la mayor parte mostrando valores entre 14 y 15°C. La CE varía entre 123.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (PT02) y 575.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (PT01), esta última con un valor especialmente más elevado que las demás muestras, que poseen un promedio de 261.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y valores menores a 392  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (PT08). Por último, el oxígeno disuelto (LDO) tiene un promedio de 8.46 mg/L, con concentraciones entre 6.35 mg/L (PT12) y 10.26 (PT04), siendo la más baja aquella registrada en el agua subterránea de pozo.

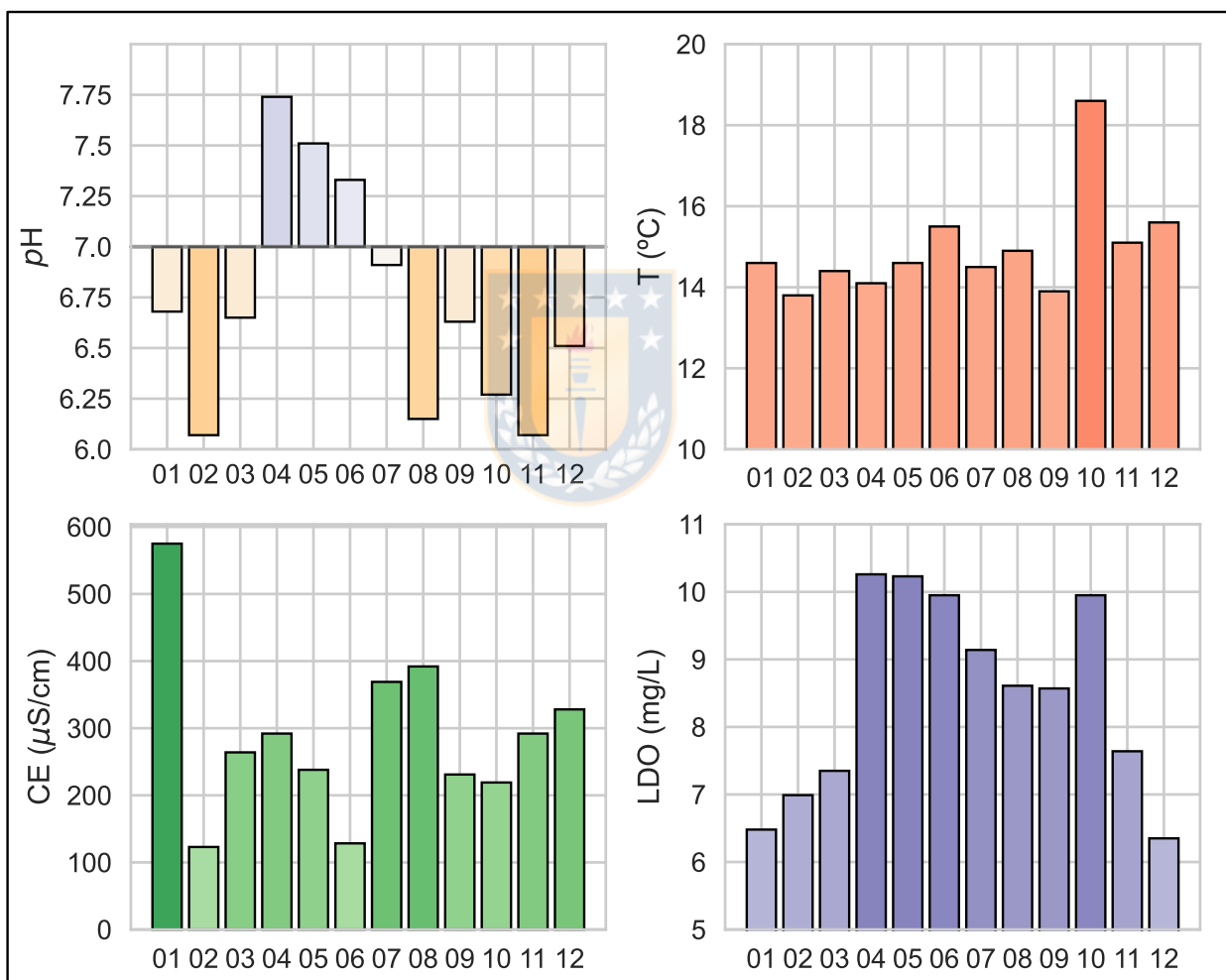


Figura 5.3: Parámetros fisicoquímicos. Se omite el prefijo “PT” de las muestras.

### 5.1.3. Elementos mayores

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados de elementos mayores en mg/L, con sus respectivos errores en el balance de cargas iónicas. Los valores en miliequivalentes por litro (meq/L) se entregan en la Tabla 2 (Anexo I).

**Tabla 5.2: Concentración de elementos mayores.** Concentraciones en mg/L. N.D: Valor bajo el límite de detección. BI: Error en el balance iónico. \* = Análisis de estudio anterior (Saavedra y otros, 2013).

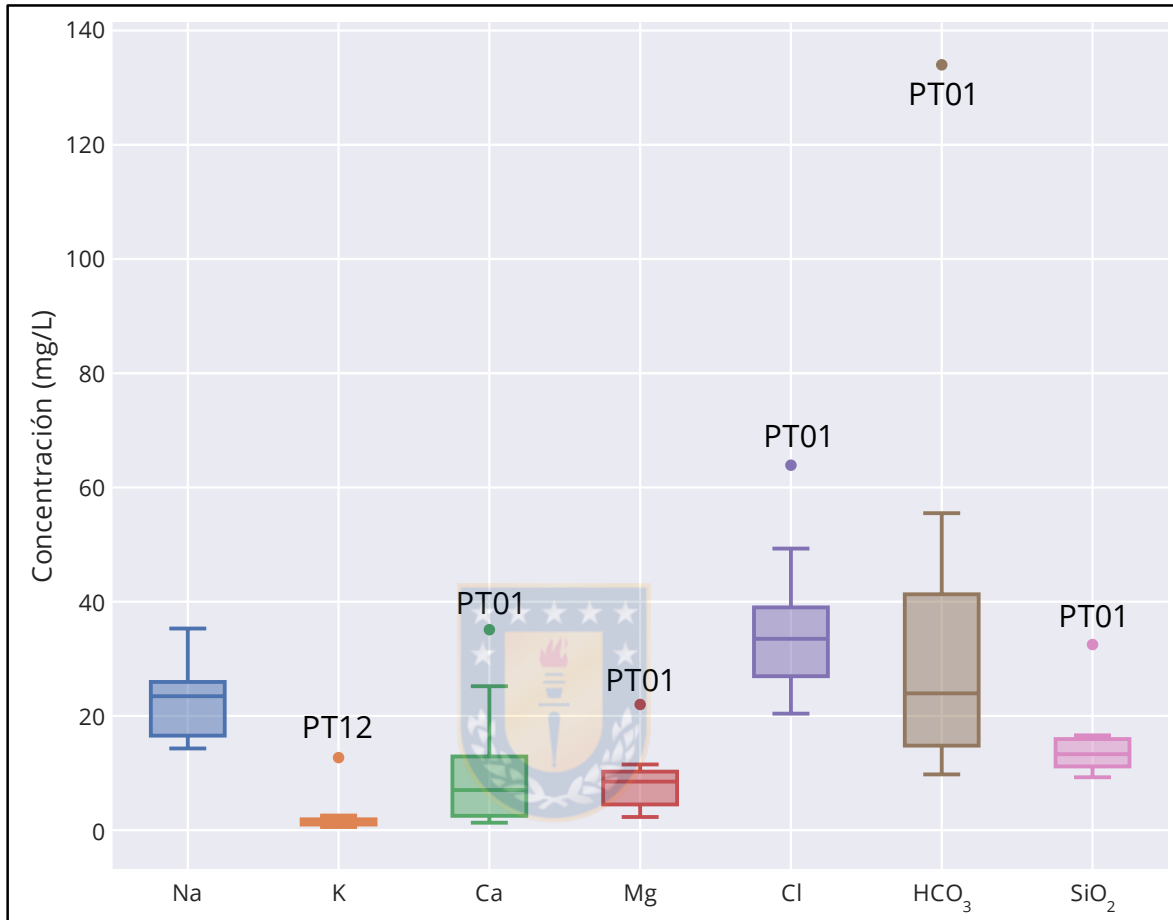
Código	Na	K	Ca	Mg	Sr	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	BI (%)	*NO <sub>3</sub>
PT01	35.30	2.14	35.10	22.00	N.D	63.90	134.00	71.00	N.D	32.50	3.04	-
PT02	16.20	1.00	1.30	2.80	N.D	24.00	14.00	N.D	N.D	16.40	6.20	9.67
PT03	22.20	0.96	6.40	11.50	N.D	36.20	15.60	N.D	N.D	12.70	27.76	-
PT04	25.40	1.60	16.30	10.00	N.D	40.40	48.20	11.00	11.70	10.40	4.39	-
PT05	24.10	1.66	9.25	8.50	N.D	33.30	34.40	11.40	3.60	12.80	9.54	-
PT06	15.20	1.42	2.94	2.30	N.D	20.40	25.00	N.D	N.D	16.60	2.41	-
PT07	26.50	2.56	25.20	7.00	N.D	33.70	55.50	14.00	N.D	13.80	17.31	59.83
PT08	35.00	1.02	7.65	10.50	N.D	49.30	9.76	N.D	N.D	9.89	28.67	75.64
PT09	14.30	0.55	2.36	4.50	N.D	26.20	17.70	N.D	N.D	11.90	4.45	6.64
PT10	16.90	0.60	2.04	8.50	N.D	27.70	22.90	N.D	N.D	15.20	14.62	22.96
PT11	24.50	1.10	2.65	9.00	N.D	37.60	12.80	N.D	N.D	15.50	21.55	-
PT12	22.80	12.70	9.50	4.50	N.D	31.90	30.50	39.70	N.D	9.26	1.47	-

De las 12 muestras estudiadas, 7 poseen un porcentaje de error en el balance iónico superior al 5%, entre los posibles factores de este se consideran: error analítico en el proceso de laboratorio o en la preparación y/o manipulación de envases, presencia de iones orgánicos en cantidades significativas y/o de otros constituyentes no considerados dentro del balance (Hounslow, 1995). Entre estos se destaca la posible presencia del ion nitrato (NO<sub>3</sub>), no medido en los análisis y que según estudios anteriores (Anexo I, Tabla 4) puede alcanzar concentraciones de hasta 75 mg/L, hecho que además coincide con la deficiencia de aniones en el balance iónico (Tabla 3, Anexo I) y la tendencia a presentar errores mayores en las muestras donde se registraron con anterioridad concentraciones considerables de este (Tabla 5.2).

A pesar de este hecho, y debido al número reducido muestras disponibles, se incluyen en parte de los análisis muestras con un error superior al 5%, indicándose a cuáles corresponden cuando sea pertinente.

Se identifican además valores atípicos, representados por los puntos fuera de los rangos intercuartílicos indicados en la Figura 5.4, los que se corresponden con la muestra PT01 para varios

iones y PT12 para el K. Estos valores no se consideran en los cálculos de promedios y desviaciones estándar descritos a continuación.



**Figura 5.4: Diagrama de caja.** Puntos fuera de los rangos intercuartílicos se consideran valores atípicos.

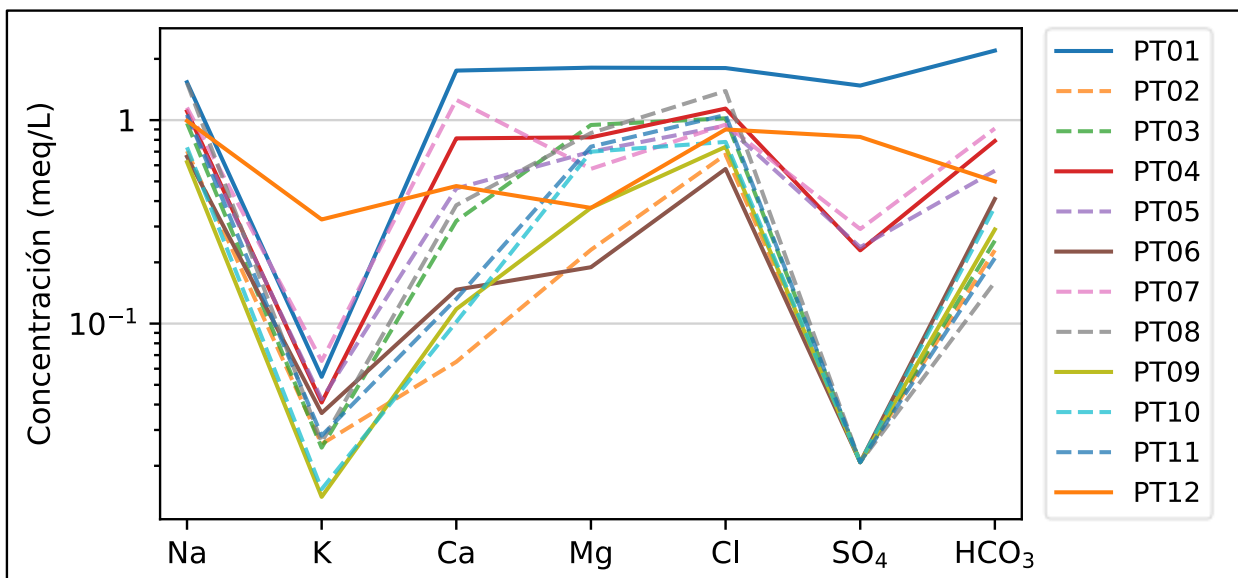
Dominan en los aniones el Cl y el HCO<sub>3</sub>, apareciendo en la totalidad de las muestras y mostrando los promedios más altos de concentración, con 32.79 y 26.03 mg/L, respectivamente. Además, ambos aniones presentan las mayores desviaciones estándar registradas, con 8.17 para el Cl y 14.91 mg/L para el HCO<sub>3</sub>. La concentración del Cl se dispone en el rango entre 20.40 (PT06) y 49.30 mg/L (PT08), con un valor anómalo para la muestra PT01 de 63.90 mg/L. El HCO<sub>3</sub> tiene su mínimo en PT08 (9.76 mg/L) y su máximo en PT05 (55.50 mg/L), y PT01 muestra un valor considerablemente mayor al de otras muestras con 134.00 mg/L. El SO<sub>4</sub> está presente sobre el límite de detección (2 mg/L) en 5 de las muestras, con un mínimo de 11.00 mg/L (PT04) y un máximo de 71.00 mg/L (PT01), y aparece en la muestra del pozo (PT12) con 39.70 mg/L. El CO<sub>3</sub>

solo se encuentra sobre el límite de detección (1.2 mg/L) en PT04 y PT05, con valores de 11.70 y 3.60 mg/L, respectivamente.

Entre los cationes, el Na posee la concentración promedio más alta, con 22.10 mg/L y un rango entre 14.3 (PT09) y 35.0 mg/L (PT08). Le siguen el Ca y el Mg con promedios de 7.78 y 7.19 mg/L, respectivamente, donde el Ca es el catión con mayor desviación estándar (7.78 mg/L) y el Mg, por otro lado, muestra una desviación de 3.20 mg/L. El K es el ion detectado menos abundante, con un promedio de 1.32 mg/L para valores entre 0.55 y 2.56 mg/L (PT09 y PT07, respectivamente), se destaca el valor anómalo en la muestra del pozo (PT12) que posee 12.70 mg/L. El Sr se encuentra bajo el límite de detección (0.07 mg/L) en todas las muestras.

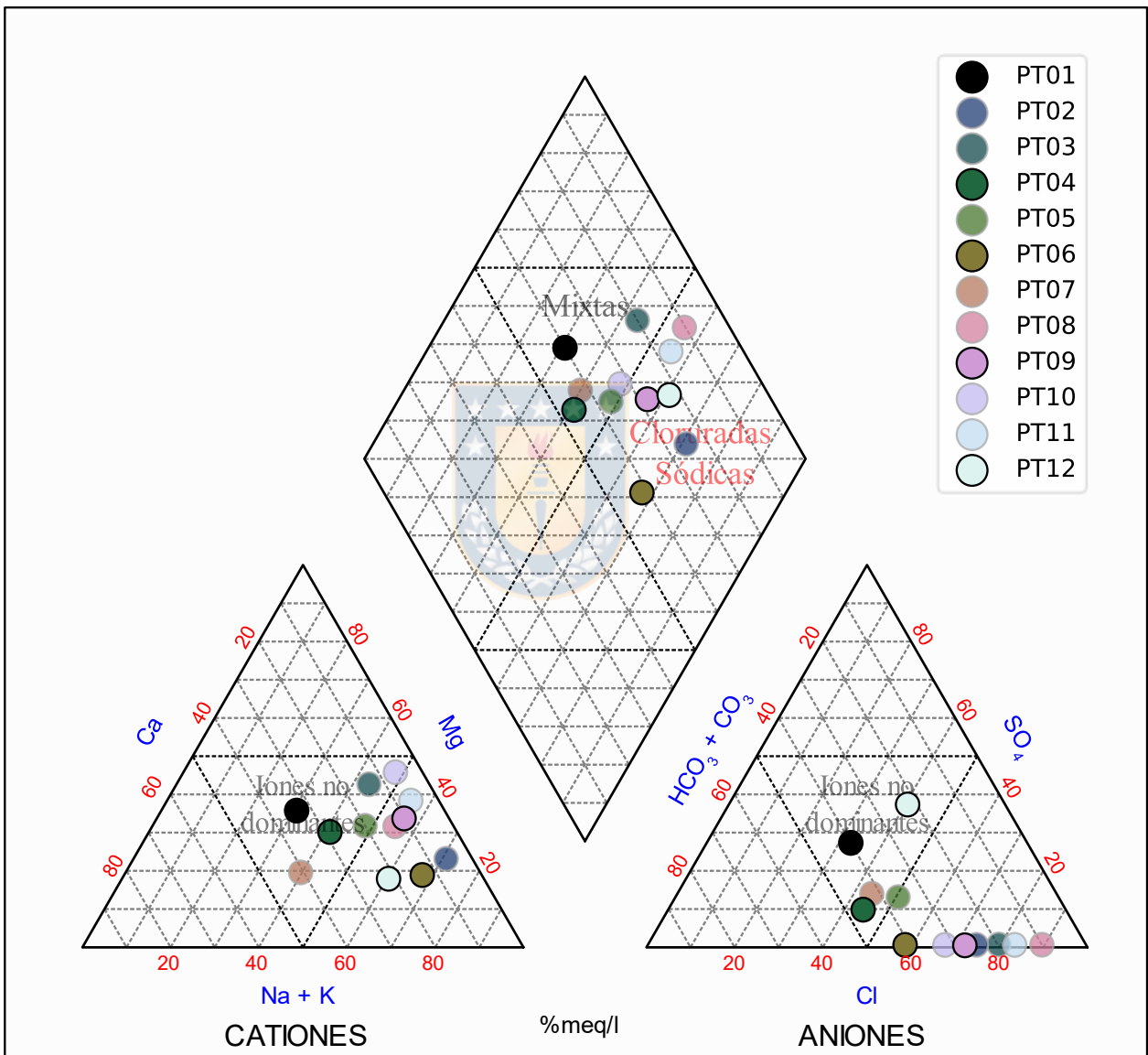
El SiO<sub>2</sub> presenta un valor promedio de 13.13 mg/L, y muestra la menor desviación estándar con 2.60 mg/L, disponiéndose en un rango acotado entre 9.26 (PT12) y 16.60 mg/L (PT06). Se destaca nuevamente PT01, con una concentración considerablemente mayor de 32.50 mg/L.

La Figura 5.5 muestra el diagrama de Schoeller - Berkaloff, con la concentración expresada meq/L, a partir del cual se aprecia un predominio iónico del Cl y el Na. El resto de los cationes muestra proporciones variables, aunque con una menor magnitud para el caso del K. Además, se nota una diferencia en los patrones de concentración de PT01 y PT12, donde PT01 exhibe valores superiores y un orden de magnitud similar en todos los elementos (a excepción del K), y PT12 posee concentraciones de K y SO<sub>4</sub> notablemente superiores a los de las demás muestras.



**Figura 5.5: Diagrama de Schoeller - Berkaloff.** Muestras con error de balance iónico mayor al 5% se indican con línea segmentada. SO<sub>4</sub> se grafica considerando un valor de la mitad de su límite de detección.

Mediante el diagrama de Piper (Figura 5.6), es posible apreciar también que las aguas son de carácter predominantemente cloruradas en los aniones, y mayoritariamente sódicas en los cationes, aunque la tendencia en los cationes es menos clara, lo que se evidencia por el hecho de que la mitad de las muestras no posee un catión dominante. Las aguas se disponen de este modo en los campos de aguas cloruradas sódicas y mixtas.



**Figura 5.6: Diagrama de Piper.** Muestras con error de balance iónico mayor al 5% poseen transparencia.

Adicionalmente, la Figura 5.7 muestra la distribución espacial de los diagramas de Stiff, y en el Anexo III se presenta cada muestra por separado. En ellas se tiene preferencialmente una forma de "T", dada por el predominio del Cl y Na en las aguas, con la excepción de PT01, PT04,



PT05 y PT07 que muestran una mayor proporción de  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ . Se observa también un aumento en la proporción de  $\text{HCO}_3$  en los pares PT02 - PT05 y PT03 - PT04. Por último, el patrón de PT12 evidencia una proporción importante de  $\text{SO}_4$  respecto a las demás muestras.

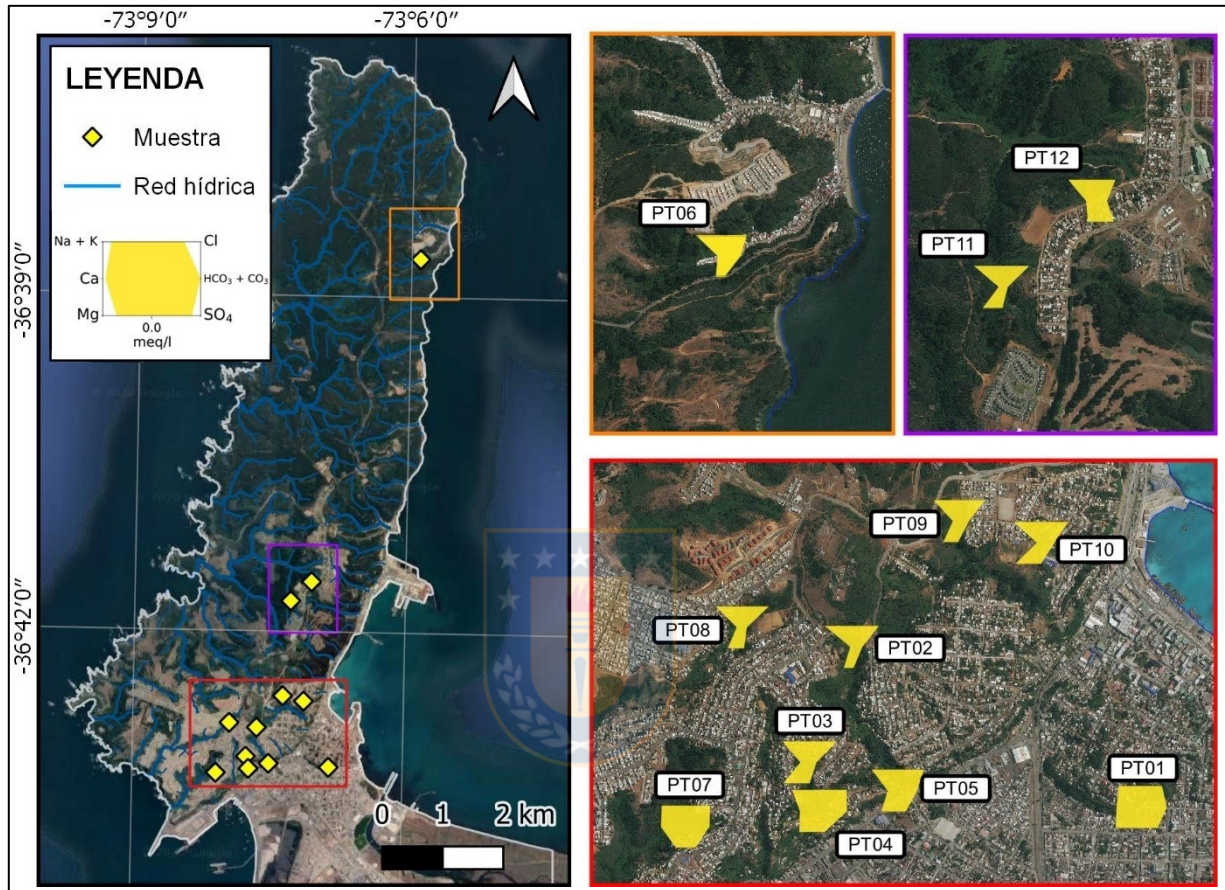


Figura 5.7: Mapa de diagramas de Stiff. Cuadros del mapa a la izquierda corresponden a acercamientos a la derecha según color.

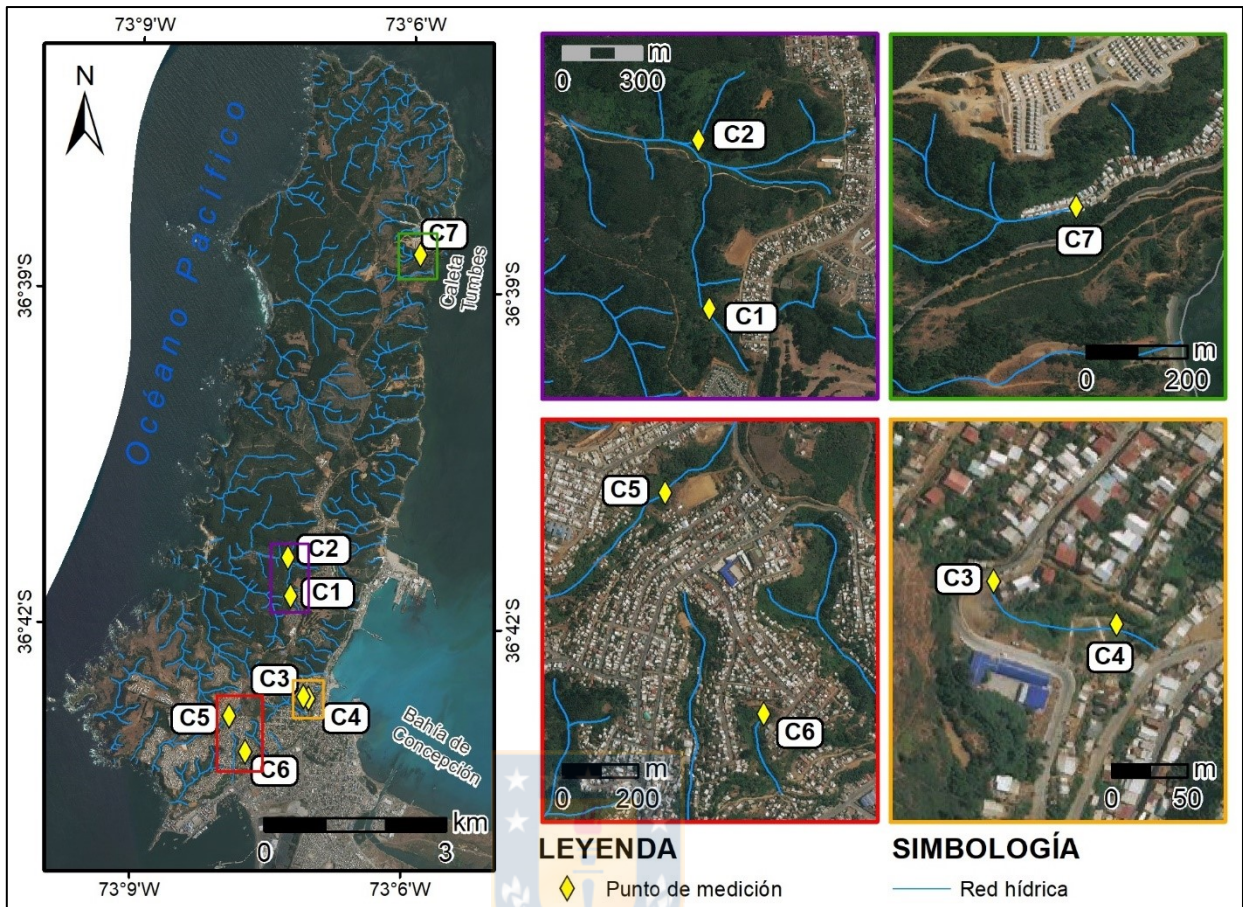
## 5.2. HIDROGEOLOGÍA

### 5.2.1. Caudal de descarga en vertientes

#### 5.2.1.1. Ubicación y descripción de los puntos de medición

Se monitorea el caudal de 7 vertientes, la Figura 5.8 muestra la ubicación de los puntos y la Tabla 1 (Anexo IV) las coordenadas y cotas asociadas. La Figura 5.9 presenta una imagen referencial de algunos de los puntos de medición, y el Anexo IV incluye las fotografías y tablas con las mediciones registradas para todos los puntos.





**Figura 5.8:** Mapa de puntos de medición de caudal. Cuadros del mapa a la izquierda corresponden a acercamientos a la derecha según color.

Las vertientes monitoreadas se encuentran en un radio de al menos 100 m de viviendas o caminos pavimentados y fueron sometidas a algún proceso de canalización o encausamiento antrópico, con la excepción de “C2” (Figura 5.9).

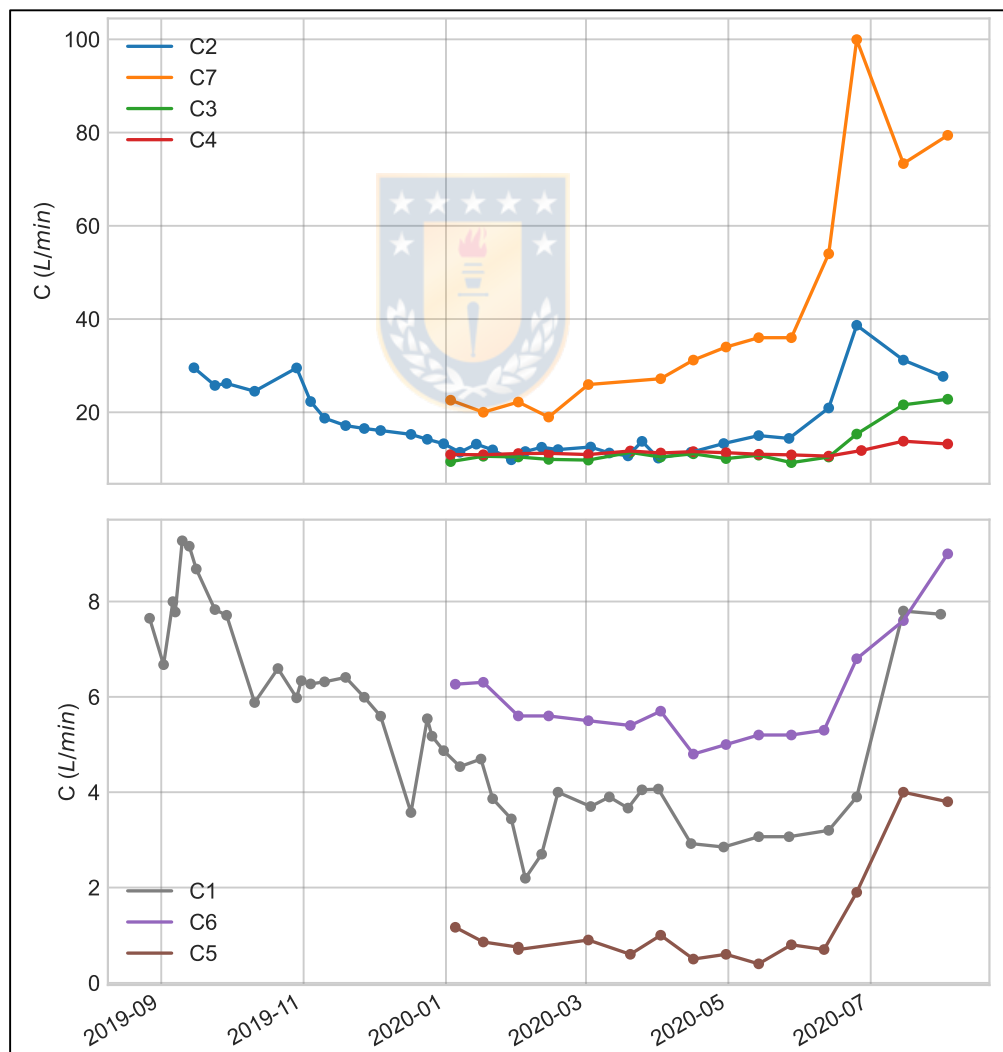


**Figura 5.9:** Imágenes referenciales de puntos de medición de caudal. Códigos se corresponden con el mapa.

En las zonas donde se puede apreciar el nacimiento de las aguas, es posible clasificarlas como vertientes de infiltración (*seepage springs*), con una descarga difusa del agua a partir de un área saturada.

### 5.2.1.2. Serie temporal de la descarga

Los valores de caudal medidos para cada vertiente se muestran en la Figura 5.10. A partir de los datos se tiene que la totalidad de las vertientes estudiadas muestran un régimen continuo, sin desaparecer aún en el período de menor pluviometría del periodo monitoreado, el que ocurre entre noviembre del 2019 y febrero del 2020 (Tabla 3, Anexo VI).



**Figura 5.10: Caudal medido en vertientes.** Se separan vertientes de orden 6° y mayor en el gráfico inferior para una mejor visualización.

La Tabla 5.3 muestra un resumen para cada vertiente donde se indica el período de medición, los máximos y mínimos registrados, la variabilidad y el orden según la clasificación de Meinzer (1923) determinado a partir de los caudales mínimos registrados.

**Tabla 5.3: Caudales máximos y mínimos registrados.**  $Q_{\min}$ : Caudal mínimo.  $Q_{\max}$ : Caudal máximo.

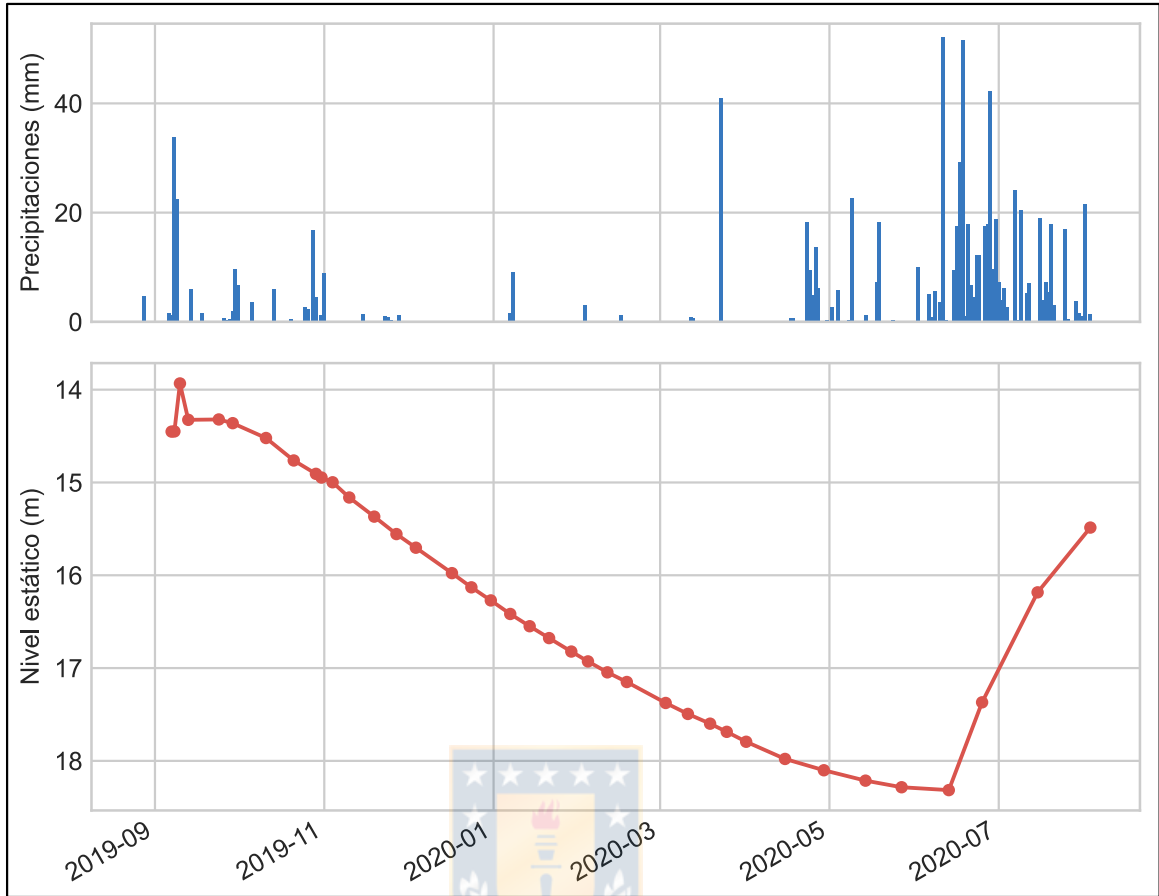
Código	Nombre de la vertiente	$Q_{\min}$		$Q_{\max}$		Orden	$I_v$	Inicio monitoreo	Fin monitoreo
		m <sup>3</sup> /día	L/min	m <sup>3</sup> /día	L/min				
C1	Estrella Azul	3.16	2.19	13.35	9.27	7°	4.22	2019-08-27	2020-07-31
C2	Pino Huacho	14.13	9.81	55.68	38.66	6°	3.94	2019-09-15	2020-08-01
C3	28 de Octubre Cerro Cornou	13.25	9.20	32.84	22.80	6°	5.43	2020-01-03	2020-05-28
C4	El Chilco	15.26	10.60	19.87	13.80	6°	1.30	2020-01-03	2020-08-03
C5	Los Cipreses	0.58	0.40	5.76	4.00	8°	10.0	2020-01-05	2020-08-03
C6	Baroa Bajo	6.91	4.80	12.96	9.00	7°	1.88	2020-01-05	2020-08-03
C7	San Juan Tumbes	27.32	18.98	143.91	99.94	6°	5.27	2020-01-03	2020-08-03

Se reconocen 4 vertientes de orden 6 (0.1 a 1 L/s), 2 de orden 7 (10 - 100 cm<sup>3</sup>/s) y 1 de orden 8 (< 10 cm<sup>3</sup>). En cuanto a su variabilidad, la mayor parte de ellas muestra razones entre sus valores máximos y mínimos ( $I_v$ ) entre 2 y 10, que representan los límites para las vertientes consideradas constantes y altamente variables, respectivamente. Se destacan, sin embargo, las vertientes “Baroa Bajo” (C6) con un comportamiento notoriamente constante ( $I_v < 2$ ; Tabla 5.3) y la vertiente “Los Cipreses” (C5) que muestra la mayor variabilidad observada ( $I_v = 10$ ; Tabla 5.3).

### 5.2.2. Nivel freático en pozo

Los resultados de las mediciones del nivel freático en el pozo se muestran la Figura 5.11, y los detalles de cada medición se adjuntan en la Tabla 9 (Anexo IV). La ubicación del pozo es equivalente a la muestra PT12 indicada en la Figura 5.1.

El nivel mínimo se registra el 10-09-2019 con 13.933 m, y se observa un progresivo aumento hasta alcanzar su máximo el 13-06-2020 con 18.315 m. Posteriormente, se produce una rápida disminución en las 6 semanas sucesivas hasta el fin del monitoreo (03-08-2020), llegando a 15.486 m en su última medición.



**Figura 5.11: Nivel estático de pozo y precipitaciones.** Datos de precipitaciones obtenidos desde estación Carriel Sur.

Durante la temporada seca, el pozo muestra una disminución en su nivel freático con un marcado comportamiento lineal. Si se considera el período con el menor volumen promedio de precipitaciones acumuladas (7.05 mm/mes), que ocurre entre noviembre del 2019 y febrero del 2020 (Tabla 3, Anexo VI), se tiene una razón en la reducción del nivel freático de  $\sim 15.7$  cm/semana.

### 5.2.3 Balance hídrico

Debido a la desconexión de las cuencas de la península con el resto de los sistemas hídricos y, por lo tanto, una ausencia de entradas laterales por escorrentía superficial, se considera en la recarga solo la infiltración por precipitación directa. Por otro lado, ante la falta de antecedentes de bombeos en el área, las salidas corresponden sólo a los afloramientos de las vertientes que forman parte de la red hídrica superficial.



### 5.2.3.1. Infiltración

Los detalles de las características del suelo usadas para el cálculo de la infiltración se muestran en la Tabla 5.5, correspondientes a las de la serie de suelo Constitución.

**Tabla 5.4: Características del suelo.** CC: Capacidad de campo. PMP: Punto de marchitez permanente. ER: Espesor radicular.

Serie de suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Grupo de suelo	CC (%)	PMP (%)	ER (m)
Constitución	25.70	40.47	33.83	D	0.34	0.19	0.15

Los resultados anuales promedio de la recarga y evapotranspiración potencial (ETP) ponderados para toda la península, considerando el período entre 1967 - 2019, se resumen en la Tabla 5.6. Las tablas 3 y 4 (Anexo V) entregan el resumen de los valores de la recarga por mes.

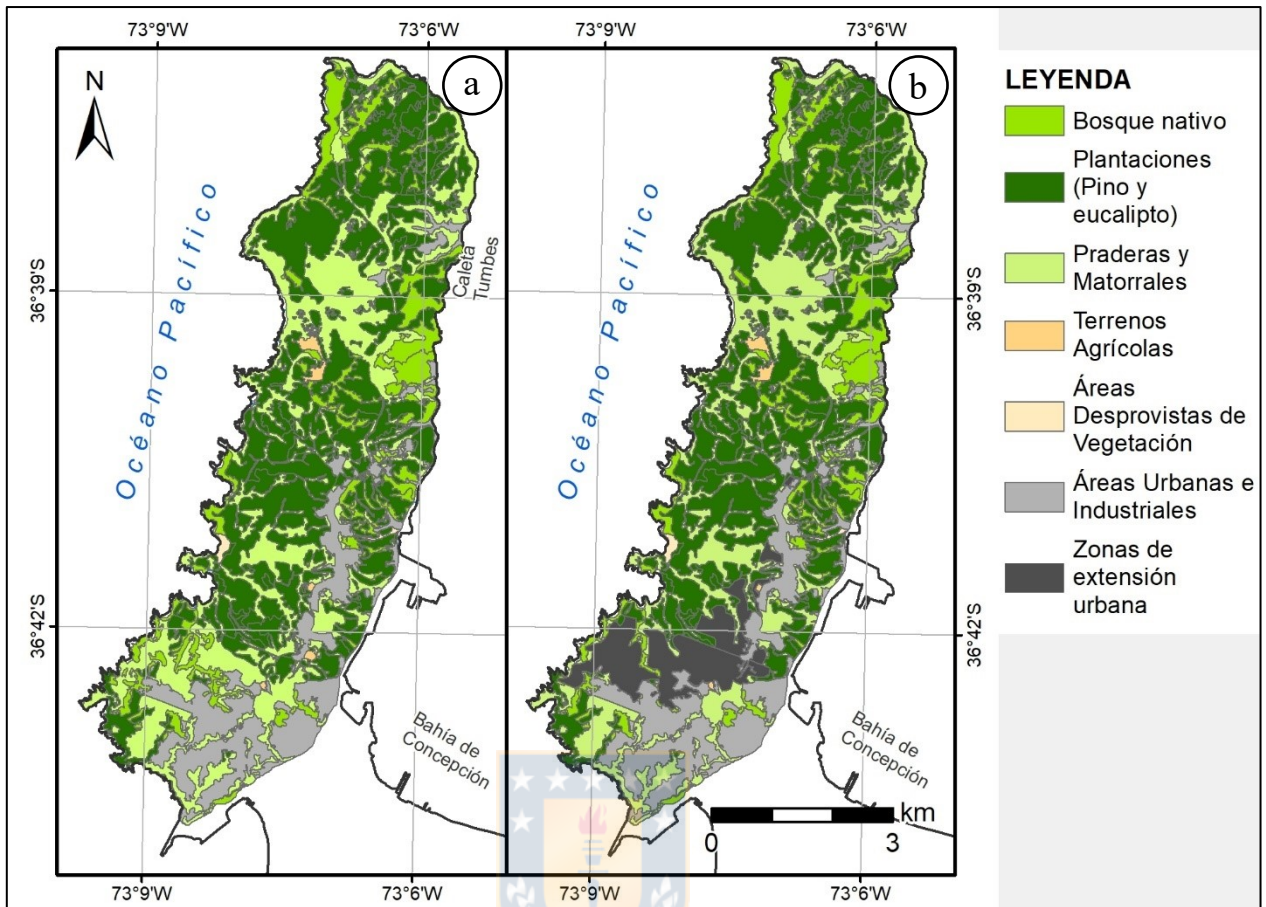
**Tabla 5.5: Recarga por infiltración.**

	Recarga (mm/año)	ETP (mm/año)	Precipitaciones (mm/año)
Recarga según usos de suelo actuales	44.1	745.1	1072.1
Recarga teórica con la ocupación de las zonas de extensión urbanas	40.5		

De este modo, según los usos de suelo actuales (Figura 5.12a), la magnitud del volumen promedio anual de la recarga alcanza los 44.1 mm/año, lo que representa un 4.1% del promedio de las precipitaciones anuales.

Se calcula también la recarga teórica que existiría si la totalidad de las potenciales zonas de extensión urbanas, indicadas por el Plan Regulador de Talcahuano (Anexo VIII), fueran ocupadas con zonas urbanas (Figura 5.12b). Se tiene que, con el aumento hipotético de la superficie urbana, el cual significa un reemplazo de ~280 ha (8% del área total de la península) de bosques y matorrales por superficie urbana, se observaría una disminución total en la recarga de un 8.16%.





**Figura 5.12: Mapa de usos de suelo.** a) Usos de suelo actuales. b) Usos de suelo considerando zonas de extensión urbana. Datos de usos de suelo desde CONAF (2015).

### 5.2.3.2. Escorrentía

Los valores posibles del umbral de escorrentía en el área, obtenidos a partir de la combinación de los usos de suelo, series de suelo y pendiente del terreno se observan en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6: Valores posibles en la zonificación del umbral de escorrentía.**

Grupo de suelo	Uso de suelo	Pendiente (°)	Po (mm)
D	Bosques	< 3	15
		>= 3	14
	Praderas y matorrales	< 3	14
		>= 3	13
	Áreas urbanas	-	6
	Áreas desprovistas de vegetación	< 3	4
>= 3°		2	

La Figura 5.13 muestra la distribución espacial de cada factor, donde se omite el mapa de grupo de suelo por ser homogéneo para toda la península. Los resultados señalan que el umbral de escorrentía ( $P_o$ ) tiene un promedio ponderado para toda la península de 12.33 mm, y se dispone en un rango entre 2 y 15 mm, mostrando valores bajos generalizados dados por el grupo hidrológico de suelo (D). Como indica la Tabla 5.6, los mayores valores se concentran en terrenos de bosques y praderas y matorrales con una pendiente menor a  $3^\circ$ , ubicados preferentemente en zonas altas en la parte central y N de la península. En contraste, los otros usos presentan valores menores, donde una parte importante resulta de la zona urbana ubicada al S del área.

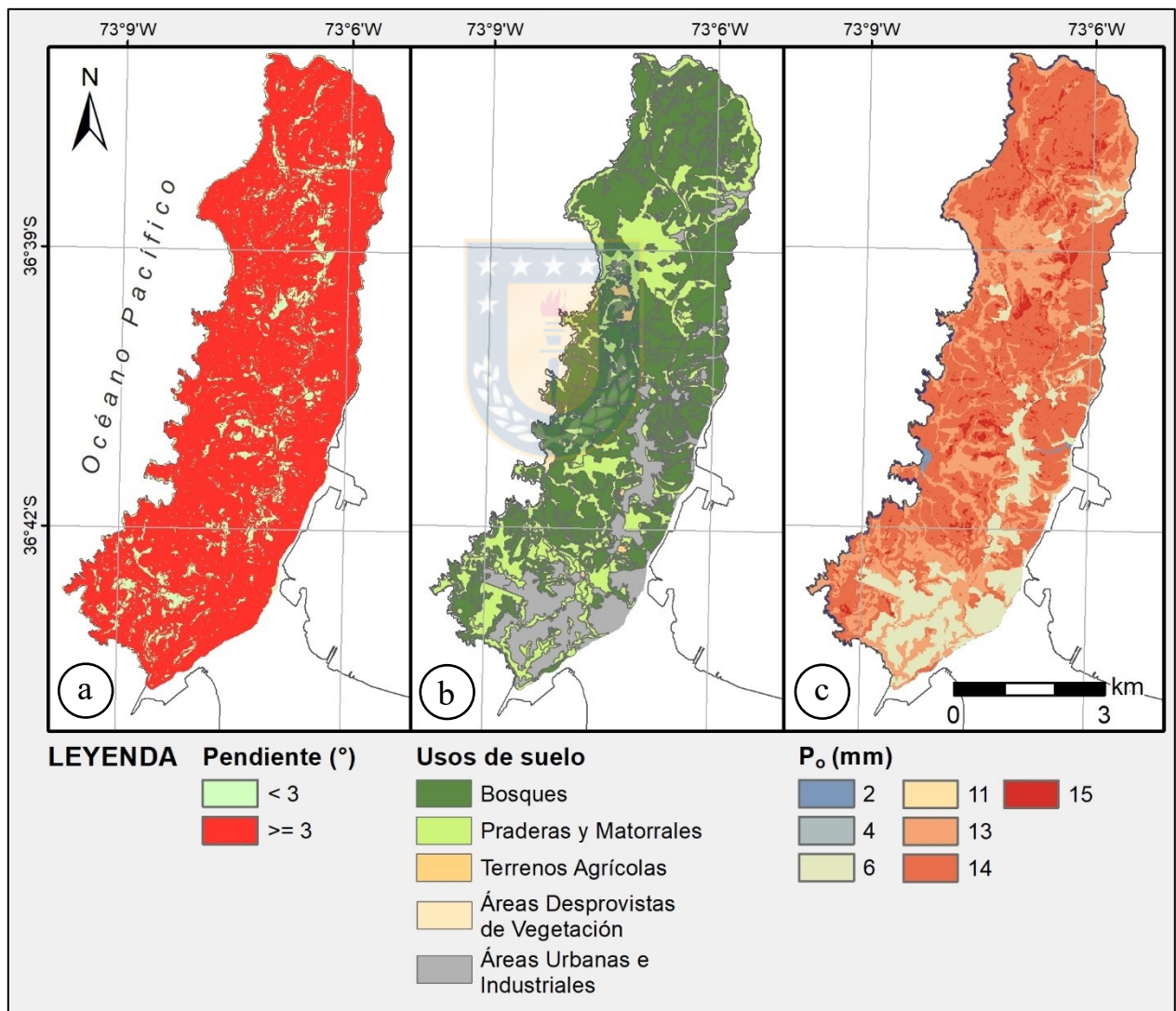


Figura 5.13: Mapa de umbral de escorrentía. a) Pendientes. b) Usos de suelo. c) Umbral de escorrentía ( $P_o$ ).

### 5.3. DIFUSIÓN

En la página web <https://vertientes-talcahuano.herokuapp.com> (Figura 5.14) se ponen a disposición enlaces que entregan información general de las vertientes y el agua subterránea, sumado a información de la geología local de la península.

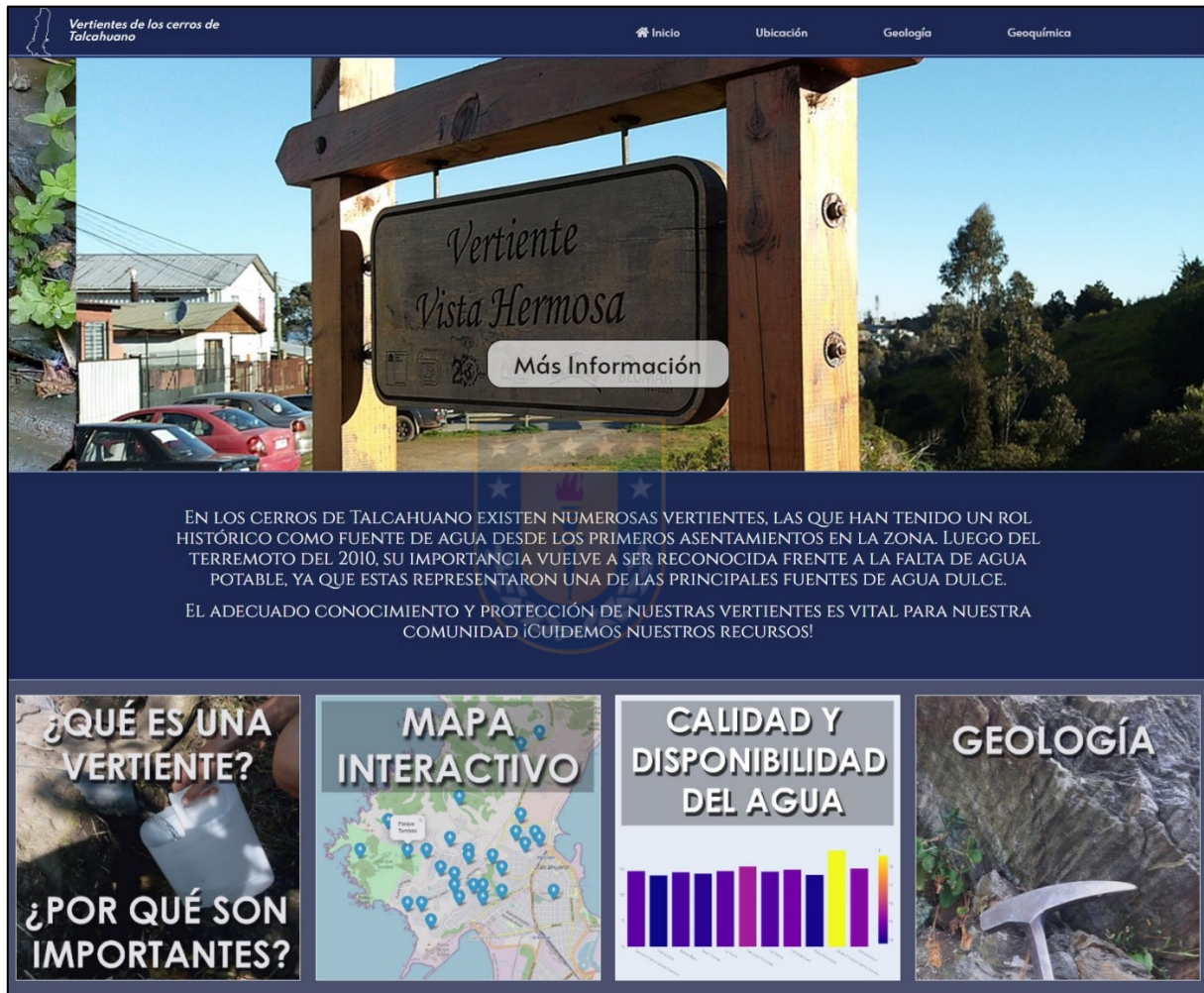
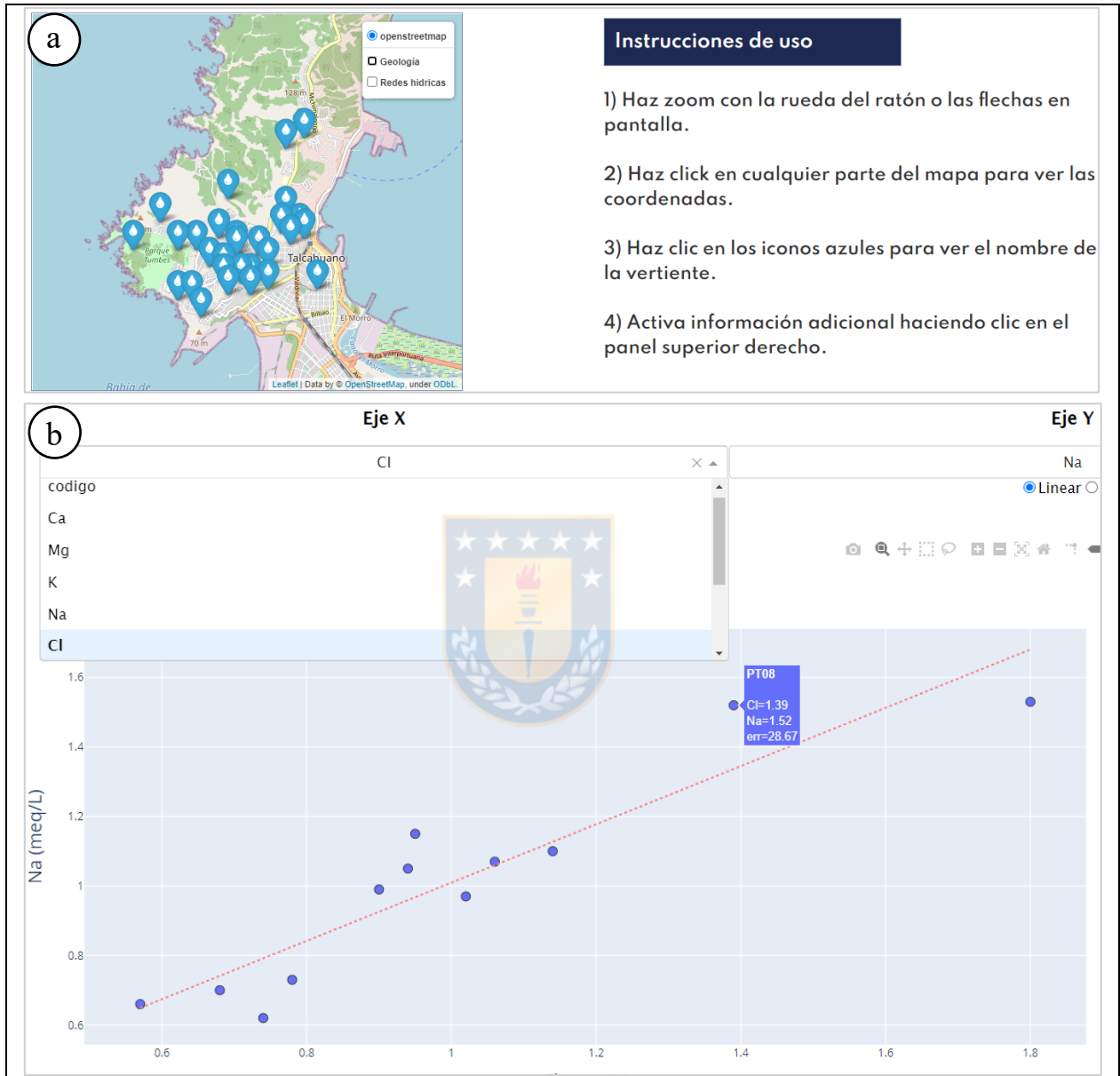


Figura 5.14: Vista preliminar de la página web.

Se incluye un mapa interactivo con la ubicación de todas las vertientes reconocidas en la península de Tumbes, en el que es posible visualizar también la geología y las redes hídricas del área de estudio (Figura 5.15a). Adicionalmente, se comparten los datos obtenidos en este estudio mediante gráficos interactivos que permiten visualizar las concentraciones y relaciones de los



elementos mayores para todas las muestras (Figura 5.15b), además de las magnitudes de los caudales de las vertientes monitoreadas en el área.



**Figura 5.15:** Aplicaciones interactivas en la página web. a) Mapa de ubicación de vertientes. b) Relación de elementos mayores.

## 6. DISCUSIÓN

### 6.1. ORIGEN Y PROCESOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

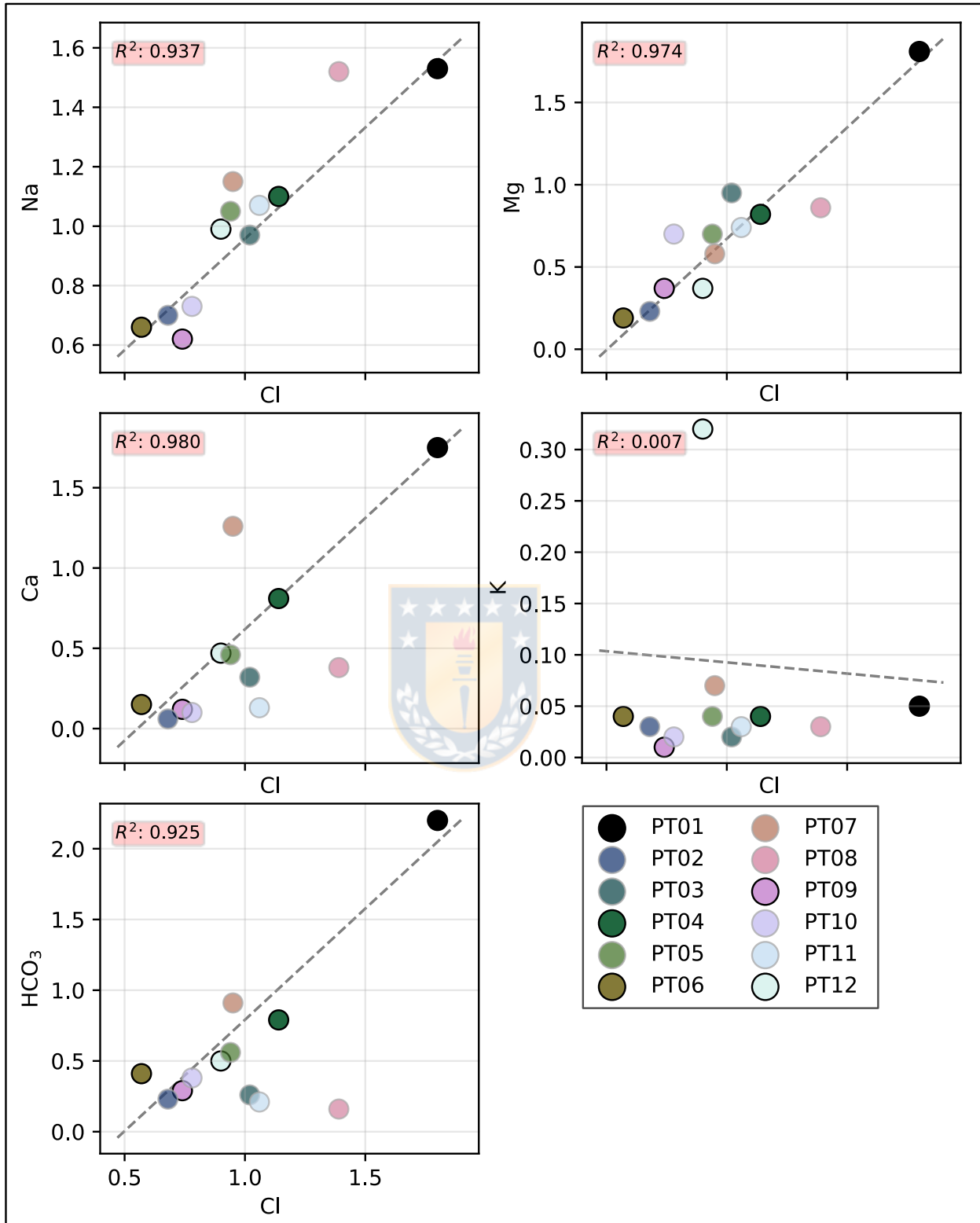
#### 6.1.1. Procesos predominantes y evolución de las aguas

La composición del agua subterránea se origina desde el agua de lluvia, y durante su retorno al océano es alterada por procesos como la interacción con las rocas, evaporación, contacto con el aire y/o el impacto de la agricultura y la urbanización (Hounslow, 1995; Saravanan y otros, 2015). Las aguas de la península de Tumbes poseen valores bajos de CE y sólidos totales disueltos (TDS) (Tabla 6.1), lo que permite clasificarlas como aguas dulces (Srinivasamoorthy y otros, 2009), donde sus bajos contenidos de mineralización son un indicador de un período reducido de residencia de las aguas subterráneas.

**Tabla 6.1: Conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (TDS).**  
TDS no incluyen NO<sub>3</sub>.

Código	CE (μS/cm)	TDS (mg/L)
PT01	575	396.54
PT02	123	77.30
PT03	264	107.16
PT04	292	175.00
PT05	238	139.01
PT06	128.4	85.46
PT07	369	178.86
PT08	392	124.72
PT09	231	79.11
PT10	219.1	95.44
PT11	292	104.75
PT12	328	161.46

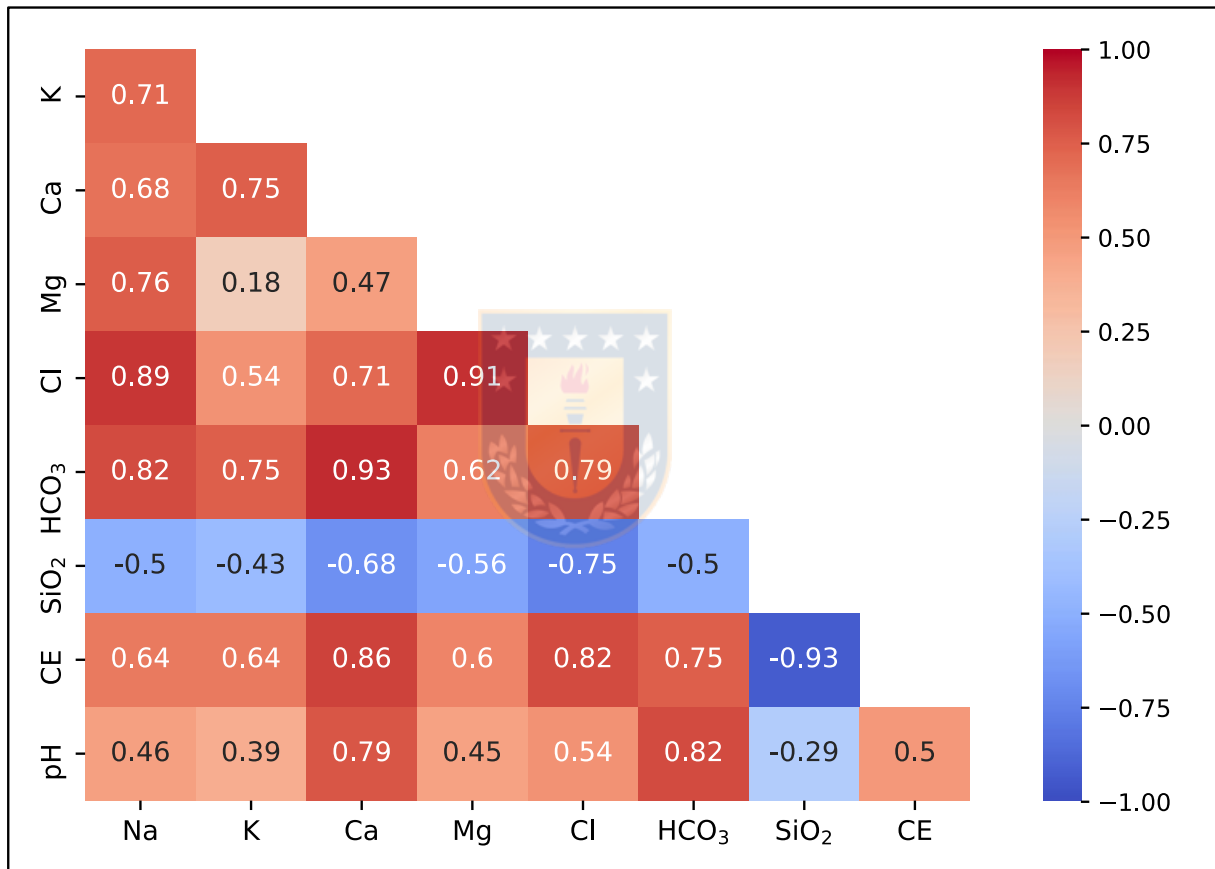
Para el análisis de los procesos que afectan la hidrogeoquímica de las aguas, se examina en primer lugar la relación del Cl respecto a los otros iones mayores (Figura 6.1). Esto en consideración que el Cl es un elemento conservativo en las aguas subterráneas (Nas y Berkay, 2010), por lo que puede servir para comprender la evolución de los datos. Se observa que, a excepción del K, existe una clara correlación del Cl con los demás iones al considerar solo aquellas muestras con un error en el balance iónico inferior al 5%.



**Figura 6.1: Relación del Cl con iones mayores.** Concentraciones en meq/L. Línea segmentada corresponde a la línea de regresión sin considerar muestras con error en el balance iónico superior al 5%, las que se muestran con transparencia. Se omiten SO<sub>4</sub> y CO<sub>3</sub> por presentarse en menos de la mitad de las muestras.

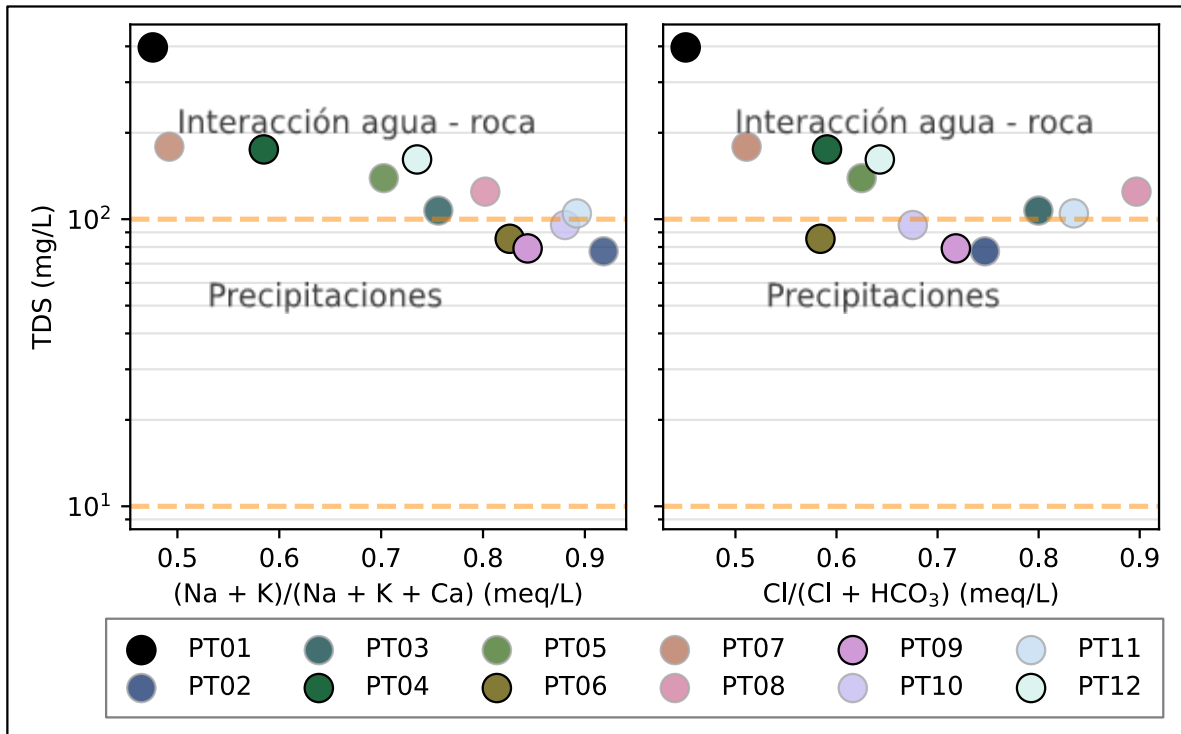


La tendencia existe incluso al considerar la muestra fuera de la península (PT01), y se observa, además, que la mayoría de las muestras que superan el error en el balance iónico siguen igualmente de cerca la línea de regresión, con la excepción de PT03, PT07, PT08, y PT11. Esta y otras relaciones se distinguen también mediante una matriz de correlación, en la que se consideran todas las muestras, excluyendo las anteriormente mencionadas (Figura 6.2). La alta correlación del Cl con los otros iones indica que posiblemente los procesos que determinan las concentraciones son comunes para toda el área (Lorca, 2018).



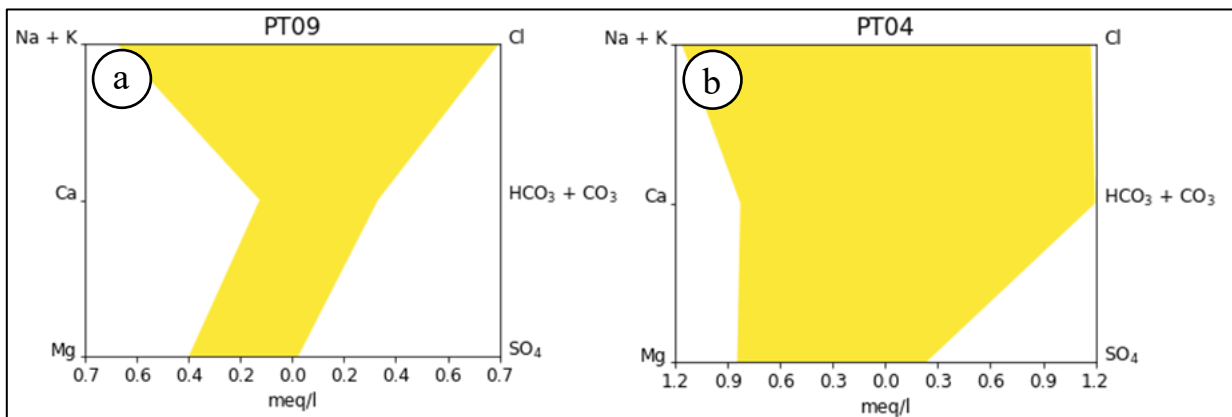
**Figura 6.2: Matriz de correlación de Spearman.** Se excluyen las muestras PT01, PT03, PT08, PT07 y PT11.

El diagrama de Gibbs (Gibbs, 1970) (Figura 6.3) permite tener una idea del tipo de proceso predominante que afecta a las aguas. Mediante este, se aprecia que las muestras se disponen entre los campos de las precipitaciones y la interacción agua - roca. Se sugiere así que en el área se observa la transición de aguas originalmente meteóricas, que aumentan progresivamente su contenido de mineralización a medida que interactúan con los materiales de la zona de recarga.



**Figura 6.3: Diagrama simplificado de Gibbs.** Línea segmentada naranja indica límite entre procesos. Muestras con error en el balance iónico superior al 5% se muestran con transparencia.

Si se consideran los diagramas de Stiff (Anexo III), se advierte que aquellas muestras dominadas por las precipitaciones poseen un claro predominio de los iones Na y Cl (Figura 6.4a). Por otra parte, el Ca y el HCO<sub>3</sub> adquieren una presencia mucho más significativa en el campo de la interacción agua - roca (Figura 6.4b). Esta idea se refuerza por la excelente correlación de la CE con el Ca y el HCO<sub>3</sub> (Figura 6.2), lo que evidencia el aumento progresivo de estos iones con la evolución de las aguas.



**Figura 6.4: Comparación de diagramas de Stiff para muestras en campos distintos del diagrama de Gibbs.**  
a) Muestra dominada por precipitaciones. b) Muestra dominada por la interacción agua - roca.

### 6.1.2. Interacción agua - roca y contaminación antrópica

Dado que uno de los procesos que controla la química de las aguas es la interacción agua - roca, es oportuno establecer los minerales que están involucrados. Se considera que durante este proceso diversos iones pueden ser incorporados al agua, donde la cantidad de cada uno de ellos dependerá de la mineralogía de la roca y la temperatura del agua (Hounslow, 1995; Appelo y Postma, 2005). En el área, las litologías están representadas por filitas de la Serie Occidental y monzogranitos del Plutón Hualpén, y en la Tabla 6.2 se resume la fórmula química de sus minerales mayoritarios.

**Tabla 6.2: Minerales de las rocas del área.**

Mineral	Fórmula química
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
Ortoclasa	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Oligoclasa	(Ca,Na)(Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>
Muscovita	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub>
Biotita	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Epidota	Ca <sub>2</sub> (Fe,Al)Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )O(OH)
Clorita	(Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (Mg,Fe) <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub>

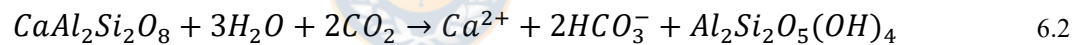
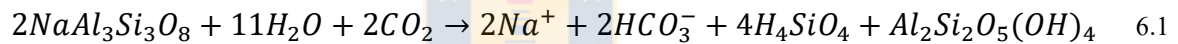
La geología del área, el tipo de ambiente, y la ausencia de SO<sub>4</sub> en la mayoría de las muestras permiten descartar una participación relevante de la disolución de evaporitas (ej. yeso, halita) en la hidrogeoquímica de las aguas. Por otro lado, la meteorización de minerales silicatados permite explicar una gran parte de las concentraciones y relaciones entre iones mayores, además de otros parámetros como el pH, esto en consideración que el consumo de ácido y la liberación de cationes y HCO<sub>3</sub> son comunes en la mayoría de este tipo de reacciones (Appelo y Postma, 2005). La ocurrencia de este fenómeno se respalda también en la razón HCO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, para la cual un valor < 5 señala aguas donde existe meteorización de silicatos (Hounslow, 1995), lo que coincide con los valores registrados en el área estudiada (Tabla 6.3).

Entre los minerales involucrados, una de las reacciones más relevantes es probablemente la meteorización de la plagioclasa debido a su susceptibilidad a este proceso. Esta reacción es descrita por las fórmulas 6.1 y 6.2, que muestran el paso a caolinita de los sistemas Na - Si y Ca - Si,

respectivamente. Aquellos miembros intermedios de la solución sólida albita - anortita liberarán cantidades variables de cationes,  $\text{HCO}_3$  y  $\text{SiO}_2$ , que dependerán de sus respectivas composiciones.

**Tabla 6.3: Razones iónicas en muestras.** Valores en meq/L para iones y mmol/L para  $\text{SiO}_2$ .

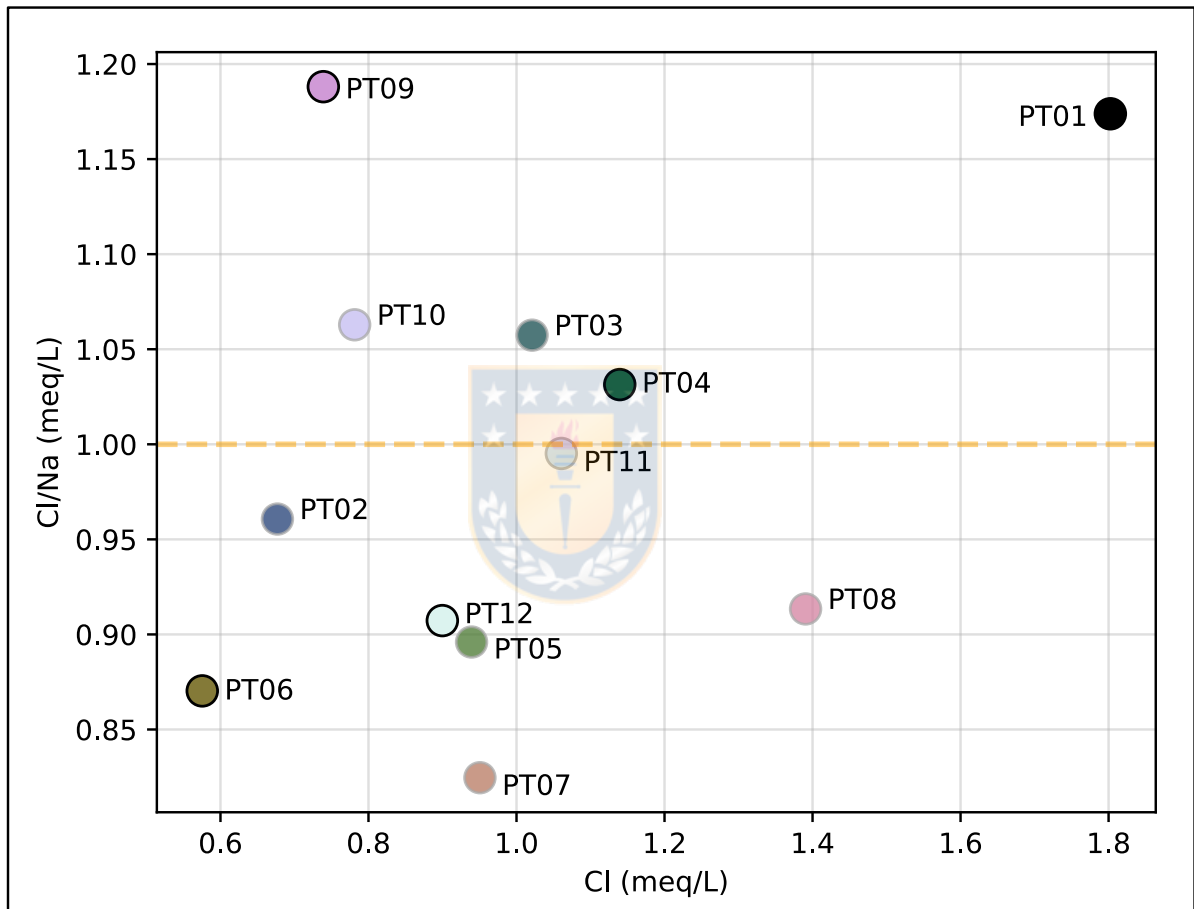
Código	$\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$	Cl/Na	Mg/Ca
PT01	4.06	1.17	1.03
PT02	0.84	0.96	3.55
PT03	1.21	1.06	2.96
PT04	4.56	1.03	1.01
PT05	2.65	0.90	1.52
PT06	1.48	0.87	1.29
PT07	3.96	0.82	0.46
PT08	0.97	0.91	2.26
PT09	1.46	1.19	3.14
PT10	1.48	1.06	6.87
PT11	0.81	1.00	5.60
PT12	3.24	0.91	0.78



La meteorización de la albita (Formula 6.1) o la oligoclasa del área permite explicar los valores de la razón Cl/Na (Tabla 6.3, Figura 6.5), en la que se identifica un exceso de Na en la mayoría de las muestras que es posible atribuir a procesos de meteorización de silicatos (Appelo y Postma, 2005). Por otro lado, los contenidos de Cl mayores al Na pueden ser el resultado de procesos de intercambio de bases o contaminación antrópica (Srinivasamoorthy y otros, 2014), o simplemente un error en el análisis para las muestras que superan el error en el balance iónico. Se observa que las muestras donde existe un exceso de Cl comparten una relación espacial, ocurriendo en los pares PT03 - PT04 y PT09 - PT10 ubicados en las mismas cuencas y en las cercanías del área urbana en una zona de alta densidad demográfica (INE, 2017), por lo que se sugiere un origen común de tipo antrópico para el excedente de Cl, el que se asocia directamente a desechos de tipo doméstico.

Si se considera la meteorización de las plagioclasas cálcicas (Formula 6.2), se tiene que esta libera cationes y  $\text{HCO}_3$ , pero sin un aumento en la concentración de  $\text{SiO}_2$ . De este modo, este

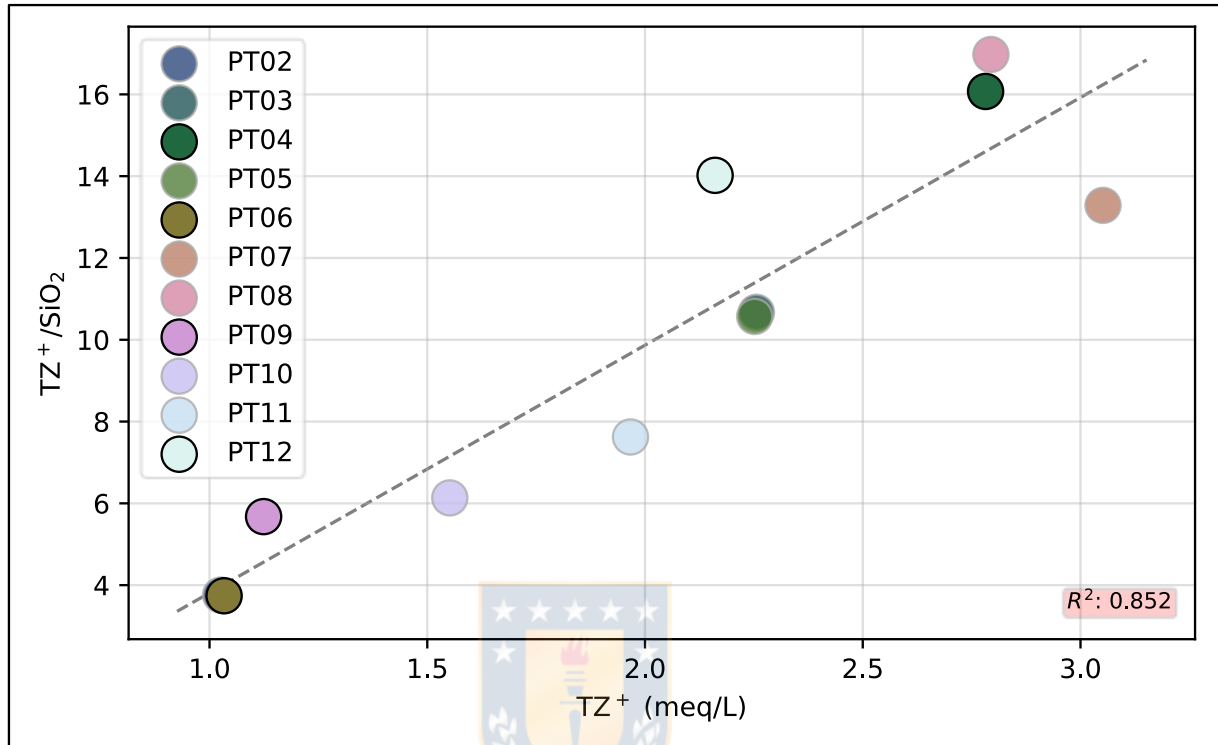
proceso puede explicar la excelente correlación entre el  $\text{HCO}_3^-$  y el Ca observado en la matriz. Más aún, a partir de esta reacción se espera que la razón entre cationes totales ( $\text{TZ}^+$ ) y el  $\text{SiO}_2$  aumente (Anazawa y Ohmori, 2005). La Figura 6.6 sugiere el aumento de esta razón, mostrando que la meteorización de plagioclasa cálcica, plagioclasas de composiciones intermedias y/o otros silicatos que liberen proporciones menores de  $\text{SiO}_2$  (ej. biotita) podrían jugar un rol relevante en la evolución de las aguas.



**Figura 6.5: Razón Cl/Na.** Concentraciones en meq/L. Línea punteada corresponde a la razón 1:1. Muestras con error en el balance iónico superior al 5% se representan con transparencia.

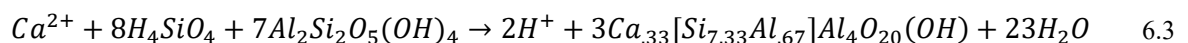
Otra posible explicación para este comportamiento puede atribuirse a la disminución de la concentración absoluta del  $\text{SiO}_2$  respecto a los demás parámetros, donde se destaca la fuerte correlación negativa observada con la CE (Figura 6.2). Esta reducción del  $\text{SiO}_2$  podría estar asociada al aumento de pH que se registra con la evolución de las aguas, pero en consideración de que el pH no posee una influencia significativa en la solubilidad del  $\text{SiO}_2$  para valores entre 2 - 9

(Krauskopf, 1956), además de la relación débil que se observa con el  $\text{SiO}_2$ , resulta complejo explicar satisfactoriamente este comportamiento exclusivamente a través de este fenómeno.



**Figura 6.6:** Evolución de la razón de cationes totales ( $\text{TZ}^+$ ) respecto al  $\text{SiO}_2$ . Muestras con error en el balance iónico superior al 5% se muestran con transparencia.

Por esta razón, se considera la posibilidad del consumo de  $\text{SiO}_2$  en otro tipo de reacciones durante el proceso de interacción agua - roca. Se propone así la formación de montmorillonita desde caolinita según lo indicado por la Fórmula 6.3. Este proceso es factible al observar la disposición de las muestras en los campos de estabilidad termodinámica para el sistema Ca -  $\text{SiO}_2$  (Figura 6.7), las que se encuentran cercanas a la línea que separa entre ambos minerales. Se sugiere, de este modo, la necesidad de un análisis de las arcillas presentes en los suelos del área para determinar con claridad el rol de este proceso.



El Mg, por otra parte, no posee una relación clara con el  $\text{HCO}_3$  y el Ca según la matriz de correlación, a diferencia de su estrecha relación con el Cl y la conductividad eléctrica (CE). La razón Mg/Ca (Tabla 6.3), según la cual la mayoría de las muestras poseen un valor superior a 1,



indica un aporte adicional de Mg por disolución de minerales ferromagnesianos (Hounslow, 1995). Estos hechos coinciden de buena manera si se contempla a la fuente del Mg como el resultado de la meteorización de biotita y clorita registrada en las rocas del área (Vásquez, 2001).

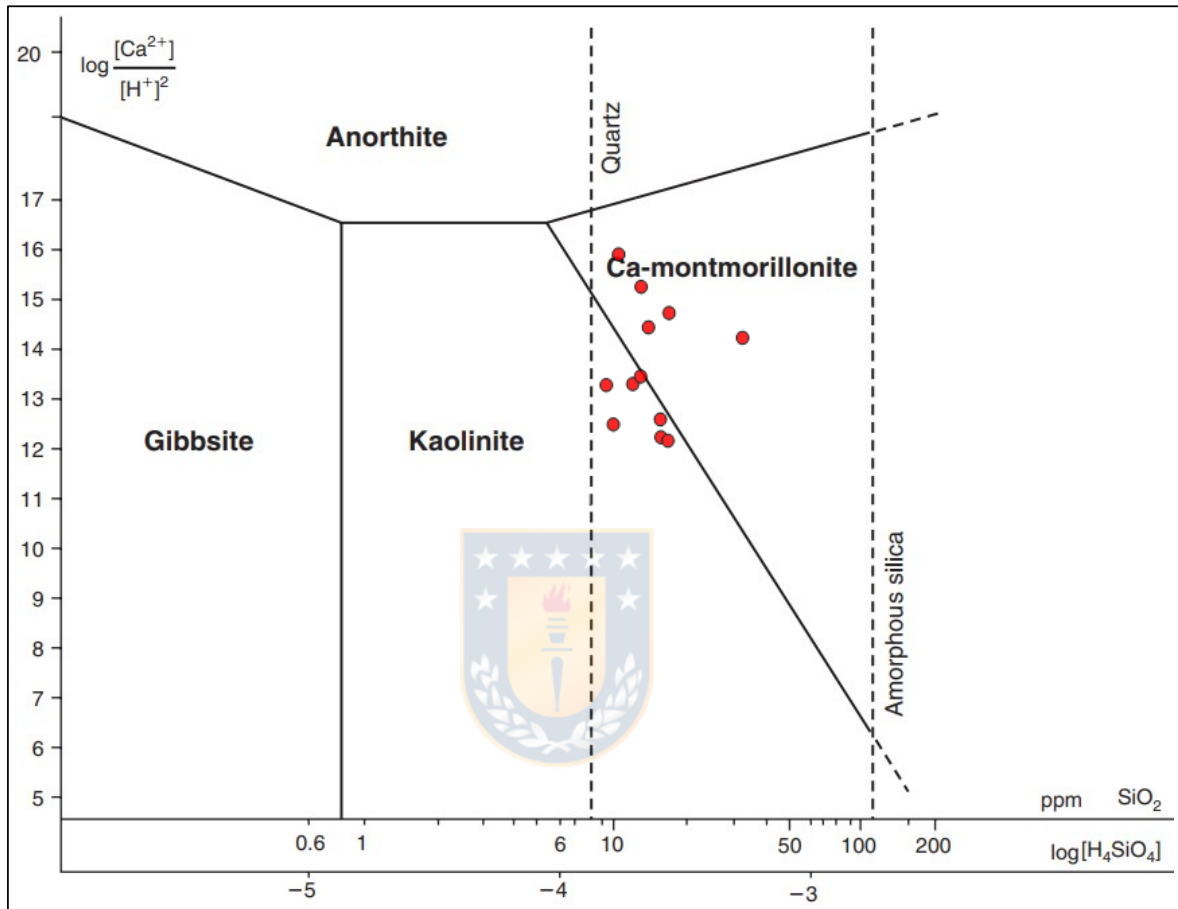


Figura 6.7: Muestras del área respecto a la estabilidad termodinámica de la anortita. Modificado de Appelo y Postma (2005).

En contraste con los demás iones, el  $\text{SO}_4$  está ausente en gran parte de las muestras, y no existe además un registro de minerales que puedan constituir fuentes directas de este. Por esta razón no es posible asociar su origen como un resultado de la interacción agua - roca, en su defecto, se propone como su fuente a contaminantes de tipo antrópico. Entre algunos de los posibles contaminantes que pueden explicar el origen de este ion se consideran: fertilizantes, emisiones de automóviles y desechos domésticos (Subbarao y otros, 1996), donde estos últimos representan la opción más plausible debido a la estrecha cercanía de las vertientes con el área urbana.

La incorporación del  $\text{SO}_4$  podría ocurrir en el transcurso superficial del agua, como parecen indicar las muestras PT04, PT05, que se encuentran alejadas de los orígenes de las vertientes y que

presentan concentraciones que alcanzan hasta 14 mg/L (Figura 6.8). Sin embargo, también es posible su proveniencia directa desde el agua subterránea como en el caso de PT12, la que muestra un valor aún más elevado de 39,7 mg/L y que además posee una anomalía en la concentración de K. Para este caso, se atribuyen ambos iones a la existencia de contaminación por pozos negros y alcantarillados cercanos, y que se respalda con contaminación de coliformes fecales registrada más al S en estudios anteriores (Saavedra, 2013).

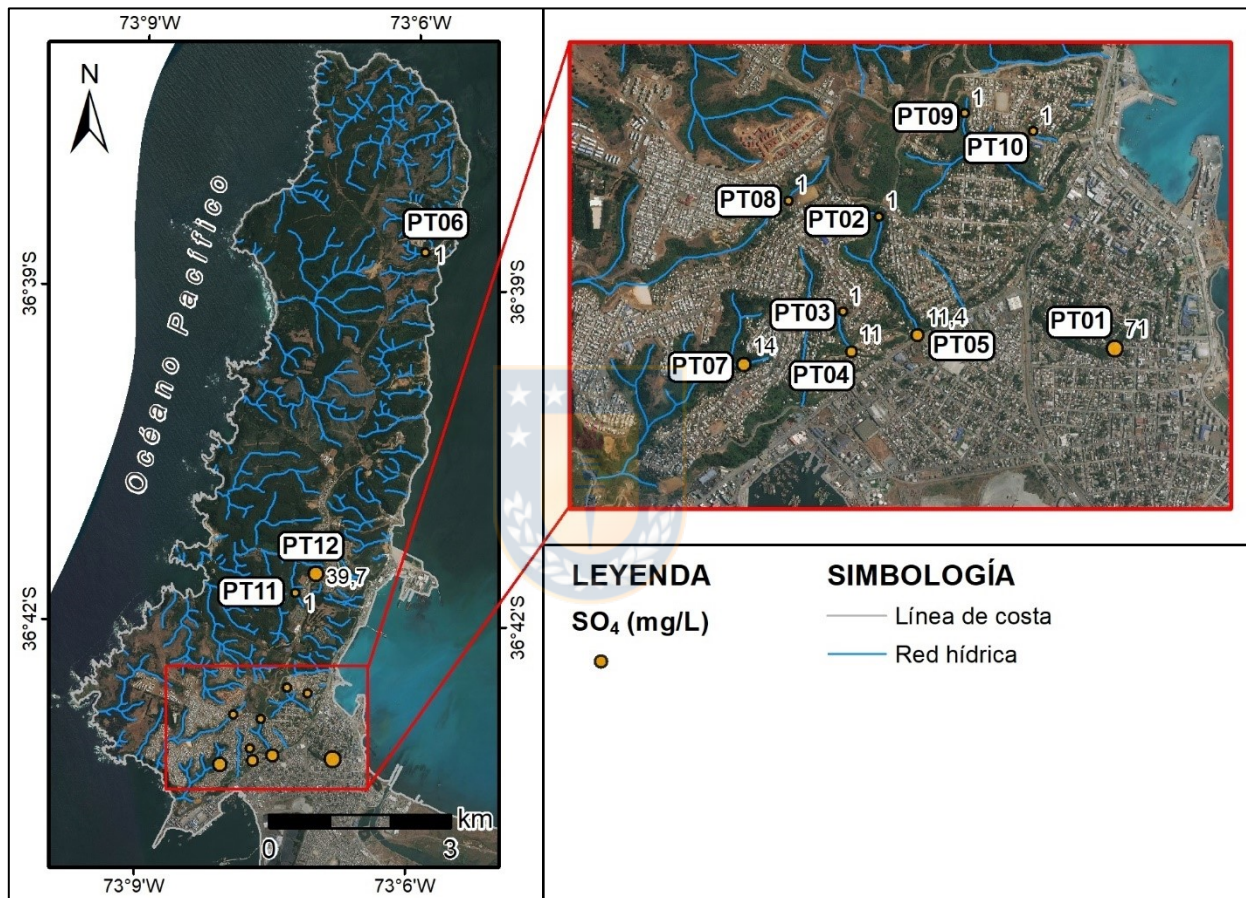


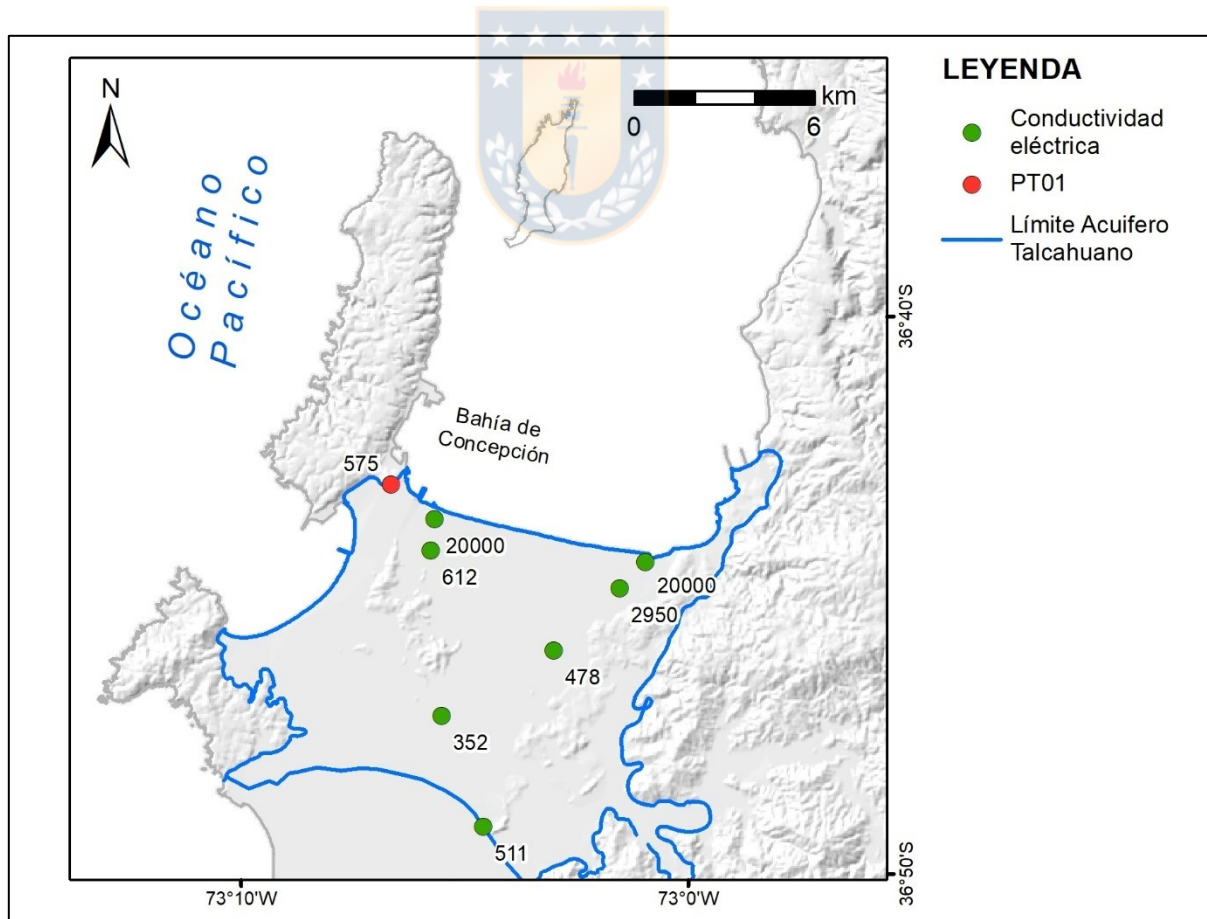
Figura 6.8: Mapa de distribución de  $\text{SO}_4$ . Concentraciones en mg/L. Muestras que no registran  $\text{SO}_4$  se etiquetan con un valor de 1, correspondiente a la mitad del límite de detección.

### 6.1.3. Origen de las aguas de los cerros islas de Talcahuano

La muestra PT01 ubicada en las areniscas de las rocas sedimentarias del cerro David Fuentes, pese a su cercanía espacial con la península, muestra una diferencia significativa en la hidrogeoquímica de sus aguas. Esta diferencia se expresa en valores de CE y concentraciones de elementos mayores y  $\text{SiO}_2$  notablemente superiores en relación con aquellas originadas en la

península. Adicionalmente, el diagrama de Stiff posee un patrón distintivo respecto a las demás muestras (Anexo III), con un orden único en la concentración de los cationes donde  $Mg > Ca > Na$ .

El origen de esta vertiente podría estar asociado a aguas subterráneas locales albergadas en las fracturas o fallas de las rocas sedimentarias desde las que se origina, o en su defecto, corresponder a afloramientos de las aguas subterráneas pertenecientes al acuífero detrítico Talcahuano, sobre el que se disponen los cerros isla del área. En este contexto, las CE anteriormente medidas en el acuífero (Aqualogy Medioambiente, 2013), que oscilan entre los 350 y 610  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , concuerdan con el valor de 575  $\mu\text{S}/\text{cm}$  registrado en la muestra (Figura 6.9). Los valores de CE permiten además descartar la influencia de una intrusión marina, la cual es registrada en algunas partes del borde norte del acuífero que alcanzan hasta 20 mS/cm (Aqualogy Medioambiente, 2013), es decir, 2 órdenes de magnitud por sobre las mediciones de este estudio. Evidentemente, para determinar con claridad la naturaleza de estas vertientes es necesario un análisis más detallado de la geoquímica del acuífero Talcahuano y de los otros cerros islas del área.



**Figura 6.9:** Conductividades eléctricas en acuífero Talcahuano y muestra PT01. Modificado de Aqualogy Medioambiente (2013).

### 6.1.4. Calidad del agua

#### 6.1.4.1. Agua potable

Debido a que la norma chilena no establece límites para la CE, se consideran las recomendaciones del WHO (2011), que indica un máximo de 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , según el cual la totalidad de las muestras no poseen efectos perjudiciales para el consumo humano. En el caso del pH, 4 de las muestras están bajo los límites de la norma (6.5 a 8.5), estas corresponden a: PT02, PT08, PT10 y PT11 con valores de 6.07, 6.15, 6.27 y 6.07, respectivamente. Por otro lado, debido a la baja concentración general de los iones analizados, todas las muestras están dentro de los límites determinados por la norma chilena para algunos de los iones mayores (Tabla 6.4).

**Tabla 6.4: Comparación de las concentraciones máximas de iones respecto a límites de la norma chilena de agua potable. \* = Datos desde estudio anterior (Saavedra, 2013).**

Ion	Límite (mg/L) según NCh 409/1. Of2005	Concentración máx. (mg/L) registrada en muestras
Mg	125	22.00
Cl	400	63.90
SO <sub>4</sub>	500	71.00
Fe	0.3	0.24*
NO <sub>3</sub>	50	75.64*

A partir de los parámetros de calidad analizados en este estudio, solo el pH podría comprometer la potabilidad del agua. Sin embargo, si se consideran estudios anteriores que incluyen variables adicionales (Tabla 4, Anexo 1), se advierte que el NO<sub>3</sub> y parámetros microbiológicos (coliformes fecales) pueden sobrepasar los límites establecidos (Saavedra, 2013).

Se tiene, de esta manera, que son varios los elementos que tienen la capacidad de comprometer la potabilidad del agua en la península. Si se considera que el NO<sub>3</sub> y los coliformes fecales son de origen antrópico, el estudio de focos de contaminación puntuales es vital en la evaluación de la calidad del agua. Este hecho es de esperar al tener presente que las aguas analizadas se encuentran adyacentes al área urbana. Por esta misma razón, las aguas de la parte N de la península donde la zona urbana es reducida o ausente, tienen un mayor potencial de ser aptas para el consumo humano, lo cual es relevante para la comunidad considerando que estas ya han sido usadas con este fin durante períodos de emergencia, como se registró durante el período posterior al terremoto del 2010 (Saavedra, 2013).

#### 6.1.4.2. Agua para riego

La CE se encuentra en el rango adecuado para no producir efectos perjudiciales en los cultivos según la norma chilena para otros usos (Tabla 6.5). De igual manera, los valores de pH están en su totalidad dentro de los límites admisibles (5.5 - 9.0).

**Tabla 6.5: Clasificación del agua para riego según conductividad eléctrica (CE).**  
NCh1333.Of78.

Clasificación	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a 25°C
Generalmente no se observarán efectos perjudiciales.	CE < 750
Puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles.	750 < CE < 1,500
Puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos.	1,500 < CE < 3,000
Puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos.	3,000 < CE < 7,500

Según índices de calidad de riego adicionales, cuyos valores para cada muestra se resumen en la Tabla 6.6, se tiene que para la razón de adsorción de sodio (SAR), todas las muestras están en un rango que representa una excelente calidad (SAR < 10) (Sakram y Adimalla, 2018). Los valores de sodio porcentual (%Na) son más variables, los rangos según Wilcox (1955) indican que 2 de las muestras son de buena calidad (20 < %Na < 40), 7 están en el rango permisible (40 < %Na < 60) y 3 en el rango de calidad dudosa (60 < %Na < 80). En cambio, para este mismo indicador la norma chilena establece para todos los usos un máximo de 35%, por lo que la mayoría de las muestras excederían los valores óptimos. Por último, los valores de carbonato sódico residual (RSC) de las muestras permiten caracterizarlas como buenas para la irrigación (RSC < 1.25) (Richards, 1954).

De esta forma, se plantea que de modo generalizado las aguas poseen características buenas a aceptables para el riego considerando los parámetros tenidos en cuenta en este estudio, por lo que parecen ideales para este fin. Aun así, debido a la variabilidad que puede ser registrada, es recomendable evaluar cada punto de manera particular. Se debe tener en cuenta, además, que la calidad del agua puede ser disminuida considerablemente por prácticas no sustentables en los usos de suelo, y muchas de las actividades humanas tienen el potencial para afectar directa o indirectamente su calidad (Kresic y Stevanovic, 2009).



**Tabla 6.6: Valores de parámetros de calidad para agua de riego por muestra.**

Código	RAS	%Na	RSC
PT01	0.94	30.87	-1.35
PT02	1.66	71.21	-0.05
PT03	1.08	43.89	-0.99
PT04	1.00	41.18	-0.46
PT05	1.16	48.44	-0.48
PT06	1.35	67.49	0.09
PT07	0.93	39.92	-0.90
PT08	1.69	55.42	-1.07
PT09	1.13	56.58	-0.18
PT10	1.09	48.36	-0.41
PT11	1.50	55.62	-0.64
PT12	1.22	60.93	-0.32

## 6.2. HIDROGEOLOGÍA

### 6.2.1. Recarga

El estudio del balance hídrico de una cuenca permite hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua, y de este modo constituye en una herramienta útil en términos de control y utilización del recurso hídrico (SEA, 2012).

Los resultados de los modelos de recarga muestran un carácter discreto para la magnitud de la recarga en el área, el que constituye solo un pequeño porcentaje de las precipitaciones (4.1%) (Tabla 5.5). Adicionalmente, las disminuciones observadas en la recarga a partir de cambios discretos en superficie de los usos de suelo, sugieren que los usos de suelo son un factor a observar con detenimiento para la estimación de volúmenes de recarga en la península de Tumbes. De este modo, la disponibilidad de agua en pozos y el caudal de las vertientes podrían verse fuertemente afectados frente a disminuciones en las precipitaciones y/o aumentos de la T°, y puede también estar sujeta a posibles cambios en los usos de suelo, particularmente un aumento del área urbana, como lo muestran las zonas de extensión urbana en el plan regulador de Talcahuano (Anexo VIII).

Por este motivo, es importante determinar la distribución temporal y espacial de la recarga, de modo que se puedan establecer períodos en los cuales disminuciones en las precipitaciones y T° tendrían mayores influencias, y para determinar zonas donde la recarga se pueda concentrar espacialmente, en las cuales cambios en los usos de suelo podrían tener una relevancia estratégica para la recarga de la península de manera generalizada o para ciertas cuencas en particular.

### 6.2.1.1. Distribución espacial de la recarga

En consideración de la homogeneidad litológica de la península y, por lo tanto, de las características del suelo, las zonas de recarga preferencial quedarán determinadas por los usos de suelo y las pendientes del terreno. De este modo, es razonable considerar a aquellas áreas de menor escorrentía como lugares preferenciales para la recarga, las que son indicadas de manera cuantitativa por los valores más altos en el umbral de escorrentía (Figura 5.13c). A partir de esto, es posible observar que muchas de estas se disponen (donde los usos no correspondan a zonas urbanas) en zonas de superficie reducida, y dispuestas cercanas a las líneas divisorias de aguas de las múltiples cuencas de la península. A su vez, las líneas divisorias se distribuyen de manera importante en las zonas altas y planas ( $> \sim 90$  m y  $< 10^\circ$  de pendiente) de las terrazas de la península (Figura 6.10).

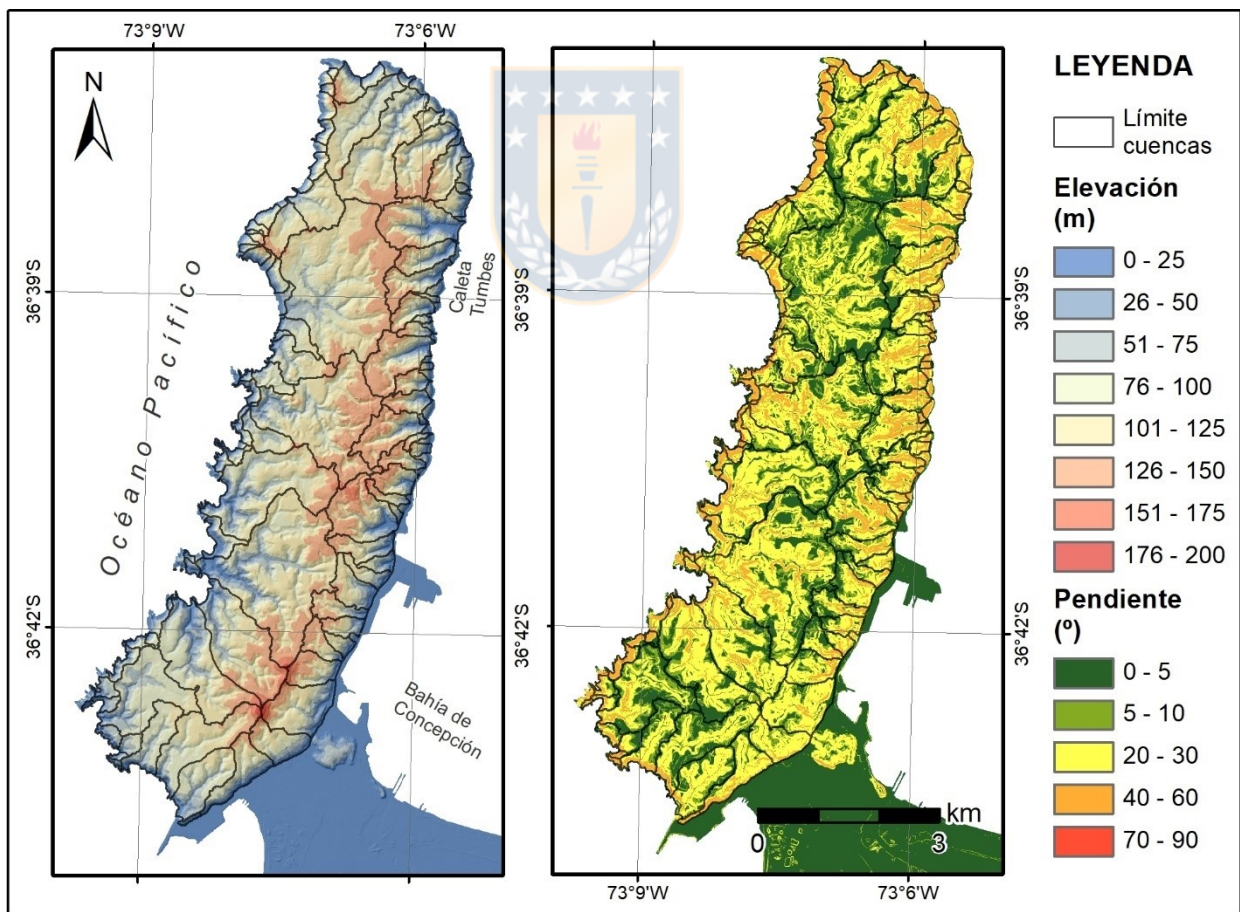
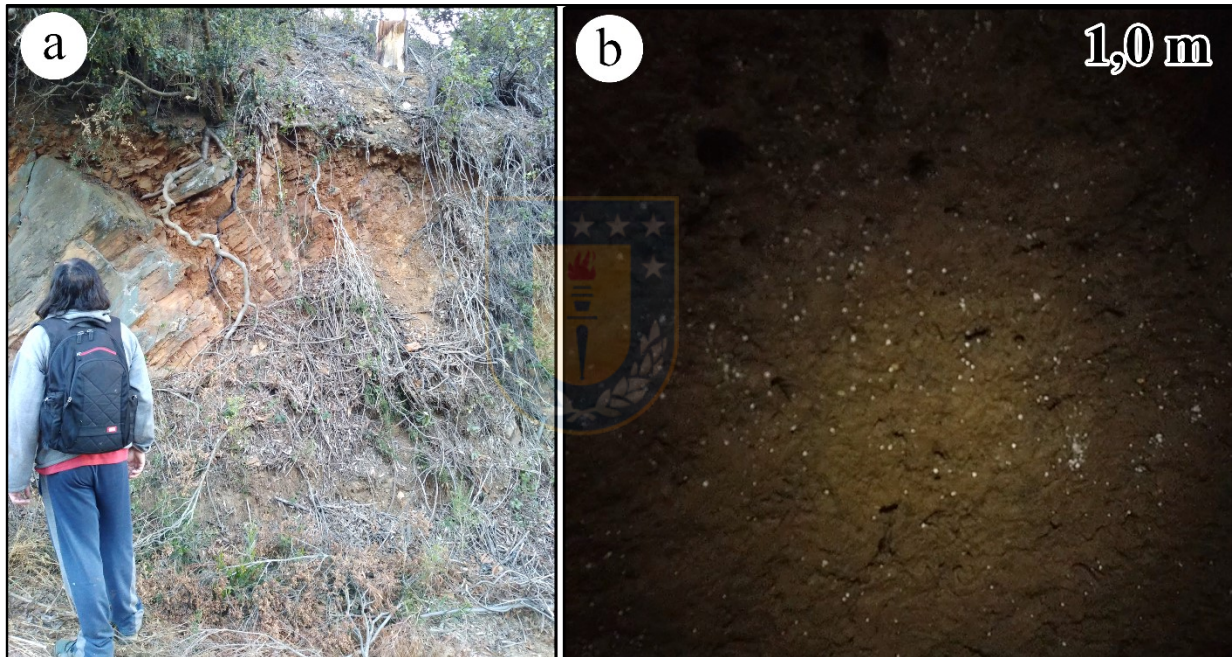


Figura 6.10: Ubicación de las líneas divisorias de aguas respecto a la elevación y la pendiente.

A la menor escorrentía en estas áreas se suma el hecho que, basado en las observaciones en terreno, la potencia del regolito y el suelo es pobre en las zonas de alta pendiente adyacentes a las quebradas (Figura 6.11a), a diferencia de algunas de las zonas de menor pendiente, en las que existe un mayor desarrollo de la capa meteorizada (Figura 6.11b). Esto permitiría un mayor almacenamiento de agua, como consecuencia de la mayor permeabilidad y porosidad del regolito respecto a la roca fresca (Acworth, 1987). Aun así, para poder afirmar que esto es un fenómeno generalizado en el área se requiere de estudios geofísicos y/o sondajes, que permitan determinar con claridad la ubicación a lo largo de las diferentes unidades geomorfológicas de los niveles freáticos, y de la disposición de los diferentes niveles del perfil de meteorización y la roca fresca.

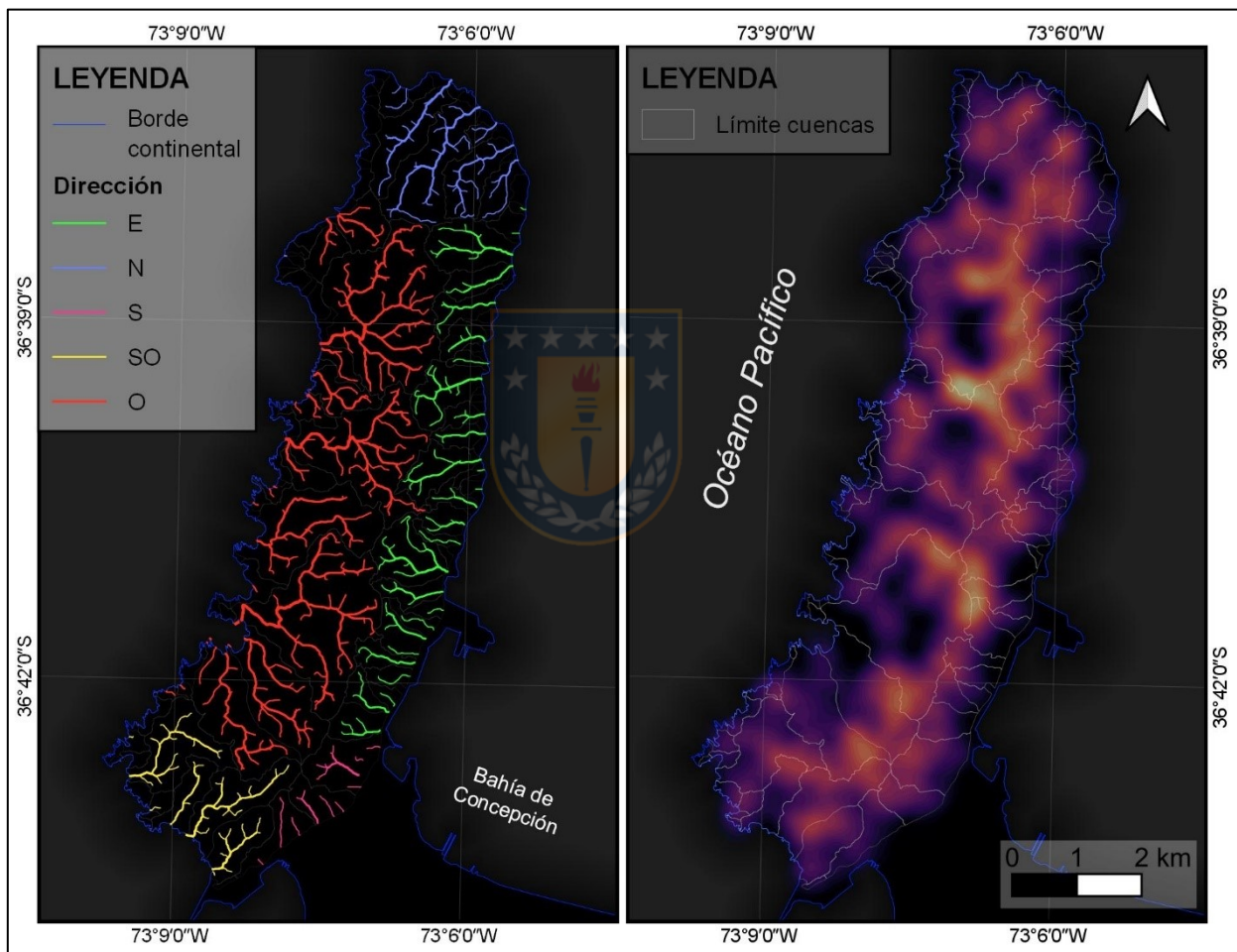


**Figura 6.11: Diferencias en los perfiles de meteorización del área.** a) Corte de camino adyacente a quebrada. b) Foto de pared de un pozo en zona de baja pendiente a 1 metro de profundidad.

Entre áreas de particular relevancia se destacan aquellas ubicadas en las franjas que separan las cuencas que desembocan hacia direcciones diferentes, como lo es el área angosta y de gran longitud que separa las cuencas que van al O y el E (Figura 6.12a). En estas áreas existe una elevada densidad de vertientes (Figura 6.12b), y representarían por tanto lugares donde se lleva a cabo una gran parte de la recarga directa que da origen a muchas de estas. Se destaca además el hecho de que aquí se disponen muchos de los caminos y zonas habitadas, por lo que existe un mayor potencial de accesibilidad y uso de las aguas por parte de la comunidad.



En consecuencia, cambios en los usos de suelo que se produzcan dentro de esta área reducida producirían una mayor escorrentía hacia áreas con menor potencial de almacenamiento. Esto se traduciría en disminuciones en el nivel freático y el caudal de descarga en vertientes adyacentes, y al encontrarse dentro de los límites de divisorias de aguas, se podrían ver afectadas simultáneamente varias de las vertientes y las cuencas a las que están asociadas. De la misma manera, cualquier elemento contaminante que se infiltre, sea de carácter industrial o doméstico, puede significar una disminución en la calidad del agua de varias cuencas al mismo tiempo.



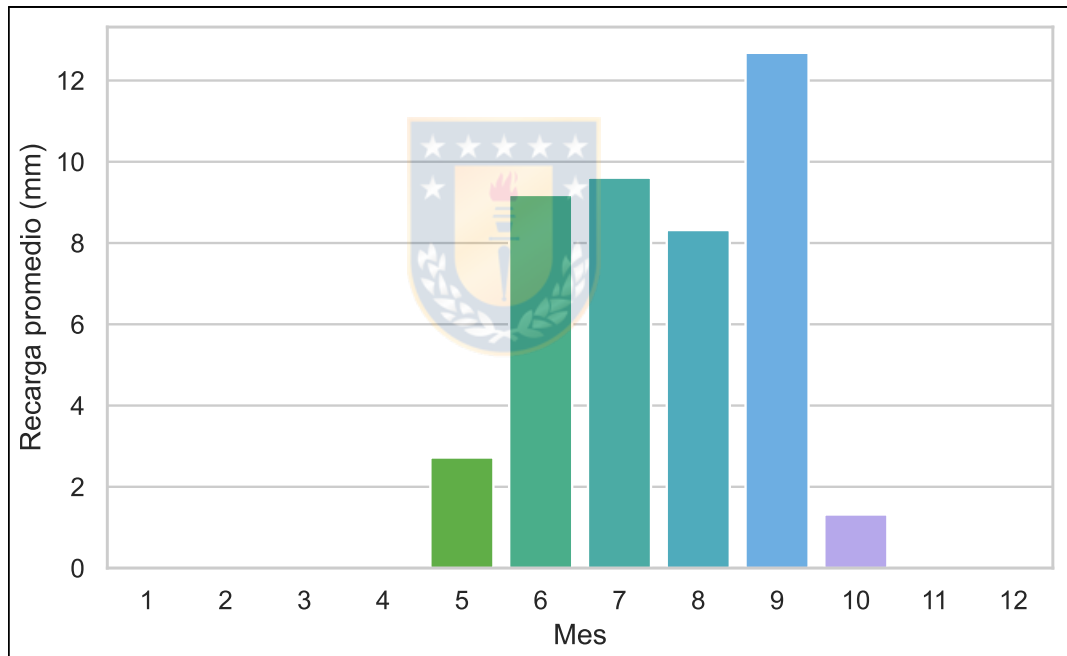
**Figura 6.12: Drenajes por dirección de desembocadura y densidad de vertientes.** a) Drenaje por dirección de desembocadura. Se consideran cuencas que desembocan al S aquellas que aportan al acuífero Talcahuano. b) Mapa de calor de vertientes para un radio de 500 m.

Por último, se debe tener cuenta que el valor de la recarga calculado en este estudio es un estimado ponderado para la totalidad del área, y que esta puede mostrar variaciones locales a lo largo de las diferentes cuencas, por lo que muchas de las cuencas individuales podrían experimentar

efectos más significativos en la disminución de la recarga. En este contexto, aquellas cuencas del S de la península; que son las con mayores posibilidades de verse sujetas a cambios en los usos de suelo, representan las cuencas más susceptibles a una disminución de la disponibilidad de agua en las vertientes y el agua que alimenta a las quebradas del área. Por esta razón se sugiere que para un estudio detallado del balance es relevante considerar cada cuenca de manera individual.

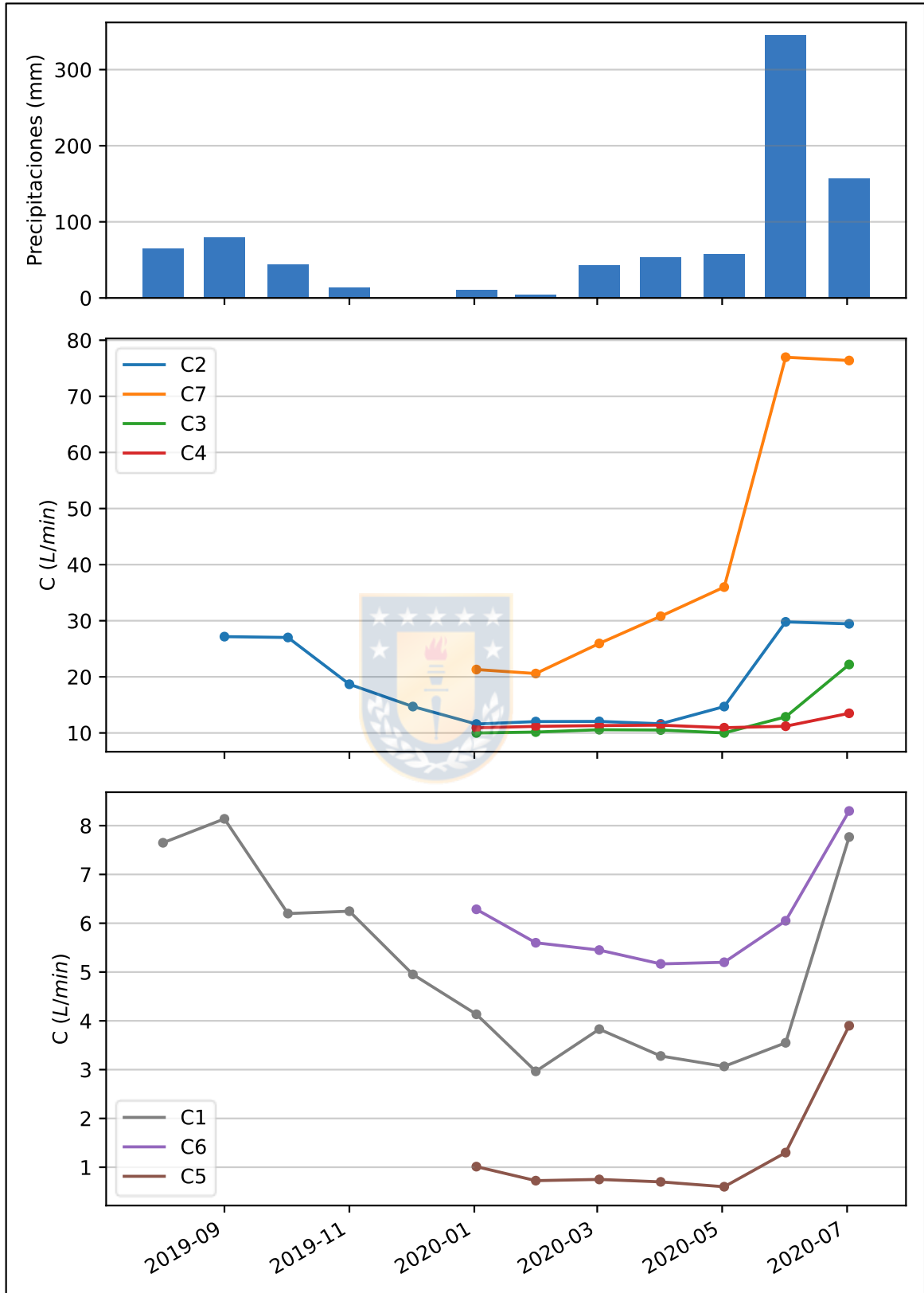
#### 6.2.1.1. Distribución temporal de la recarga

El análisis de la recarga mensual promedio a lo largo del período 1967 - 2019 (Figura 6.13) indica que prácticamente la totalidad de esta ocurre durante los meses de junio, julio y agosto y septiembre.



**Figura 6.13: Recarga promedio mensual para el período 1967 - 2019.** Datos desde modelo EASY BAL.

Esto hecho coincide a grandes rasgos con lo observado en las mediciones del nivel freático en el pozo, donde se observa un quiebre abrupto el 13 - 06 - 2020, y la tendencia de los caudales en las vertientes (Figura 6.14) que muestran una disminución progresiva de su caudal desde el mes de septiembre hasta la llegada del mes de junio.



**Figura 6.14: Caudal de descarga promedio mensual por vertiente.** Mediciones en los primeros días de agosto se consideran en julio para igualar el número de observaciones de cada mes. Se separan vertientes de orden 6° y mayor en el gráfico inferior para una mejor visualización.



Se debe tener en cuenta que, debido a lo limitado del período de estudio, es necesario un monitoreo más prolongado en el tiempo de los caudales en vertientes y niveles freáticos para establecer patrones concluyentes respecto al período de recarga.

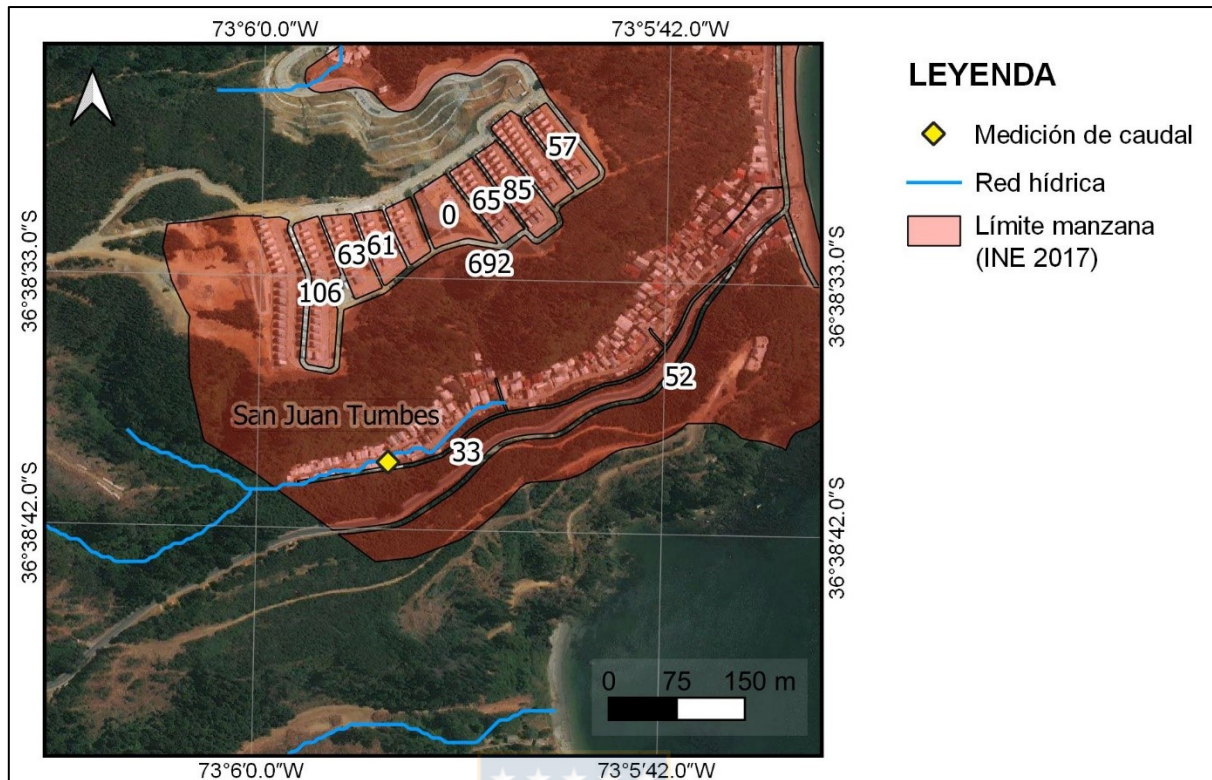
### **6.2.2. Disponibilidad y relevancia de los caudales medidos en vertientes**

Un conocimiento en las variaciones del caudal de descarga de las vertientes es necesario en el diseño de sistemas efectivos para el encausamiento y distribución del agua. Este tipo de información en conjunto con datos de la demanda hídrica, es fundamental en la planificación para la conservación y el uso adecuado del agua a corto y largo plazo (Tubman, 2007).

En el caso de las vertientes de la península de Tumbes, el volumen de descarga de las vertientes monitoreadas no es particularmente elevado si estas se consideran individualmente, mostrando órdenes de caudal en el espectro inferior de la clasificación de Meinzer. En el caso de las vertientes monitoreadas, la suma de los caudales mínimos y máximos para todas las vertientes asciende a  $80.61 \text{ m}^3/\text{día}$  ( $\sim 2,418 \text{ m}^3/\text{mes}$ ) y  $284.37 \text{ m}^3/\text{día}$  ( $\sim 8,531 \text{ m}^3/\text{mes}$ ), respectivamente.

De este modo, si se compara el volumen total de los caudales mínimos con el consumo promedio de un hogar de 5 personas en verano, que se acerca a  $25 \text{ m}^3/\text{mes}$  (SERNAC, 2003), se tiene que solo es posible abastecer a aproximadamente 97 hogares (485 personas). Estos números no son significativos, sobre todo en consideración de que la península de Tumbes posee una población de 36,001 personas (INE, 2017), por lo que sería posible abastecer a solo un 1.3% del total.

Incluso a nivel local los caudales parecen no ser suficientes para un suministro sustentable, por ejemplo, la vertiente San Juan Tumbes (C7) que registra el mayor valor de caudal mínimo ( $27.32 \text{ m}^3/\text{día}$  o  $819.60 \text{ m}^3/\text{mes}$ ), no puede suplir la demanda teórica promedio de las 692 personas censadas en la manzana adyacente (Figura 6.15), las que requerirían un suministro aproximado de  $3,460 \text{ m}^3/\text{mes}$ .



**Figura 6.15:** Población por manzana en área cercana a la vertiente San Juan Tumbes (C7). Datos demográficos desde INE (2017).

No obstante, se debe tener en cuenta que las vertientes monitoreadas son en general parte de redes de primer orden, cercanas a su origen, por lo tanto, los volúmenes en redes de mayor orden en cuencas de gran tamaño podrían alcanzar magnitudes significativamente mayores. Más aún, las vertientes monitoreadas representan solo una fracción menor del total de las vertientes de la península, sobre todo al considerar que la parte N carece de registros debido a formar parte de los terrenos de la Armada de Chile. En este sentido, si se incluyen mediciones adicionales de caudales para 2 vertientes en la parte N del área (Arumí, 2018), se tiene que es posible encontrar vertientes con una descarga mayor a las monitoreadas en este estudio (Tabla 6.7). Entre estas se destaca el “Estero Caleta Benavente”, que registra un valor considerablemente mayor a aquellos medidos en febrero para las vertientes estudiadas. Por esta razón, no se descarta que los volúmenes disponibles puedan ser significativamente superiores a lo estimado según los datos obtenidos en este estudio.

Por otro lado, debido al carácter constante del caudal de las vertientes monitoreadas, estas pueden representar fuentes de agua fiables para uso doméstico o potable en casos particulares, incluso durante el verano, como se registró durante el período que siguió al terremoto del 2010, en el que las vertientes fueron usadas por parte de la comunidad ante la falta de otras fuentes de agua

(Saavedra, 2013). De igual manera, también es posible su uso en actividades con fines industriales y/o agrícolas que no requieran de grandes demandas hídricas en el período de verano, como lo registra Arumí (2018).

**Tabla 6.7: Caudales aforados en vertientes de otro estudio.** Arumí (2018). Coordenadas N y E en sistema de coordenadas WGS84 UTM 18S.

Vertiente	Cota (m)	E	N	Q (m <sup>3</sup> /día)	Fecha
Estero Caleta Benavente	90	669158	5941169	96	18-02-2018
Estero Lote A	40	669871	5941705	18	18-02-2018

De esta manera se tiene que, a pesar del carácter continuado a lo largo del año del caudal de las vertientes la magnitud discreta de sus caudales restringe su uso. Adicionalmente, se debe considerar también que ante el hecho de que pueden existir grandes variaciones individuales en los caudales de las vertientes y sus cuencas asociadas, por lo que el estudio para la disponibilidad de agua en la península de Tumbes debe realizarse considerando las características específicas de la cuenca en estudio.



### 6.3. DIFUSIÓN

Las herramientas entregadas en la página web poseen el potencial de proporcionar a la comunidad un acceso fácil e interactivo a información de las vertientes y el agua subterránea, sirviendo directamente como forma de material educativo, siendo importante para una mejor comprensión de la importancia, estado actual y vulnerabilidad de los recursos hídricos locales.

Por otro lado, el conocimiento de la ubicación, características hidrogeoquímicas y magnitud de descarga de las vertientes pueden servir para el reconocimiento de las vertientes más cercanas. Esto tendría mayor potencial de utilidad en casos donde las vertientes deban ser usadas como fuente de agua de emergencia (ej. terremoto del 2010, cortes de agua prolongados) u otros fines (ej. riego, uso doméstico), facilitando así la determinación de las vertientes de mejor accesibilidad, mayor volumen de descarga y/o potencial de ser sometidas a procesos de tratamiento de aguas con base en sus características químicas.

## 7. CONCLUSIONES

El estudio de la hidrogeoquímica muestra que las aguas subterráneas de la península poseen una baja conductividad y mineralización, indicando un bajo tiempo de residencia de las aguas subterráneas. Se observa en las muestras una evolución desde aguas dominadas por los iones Na - Cl que sufren una transición a aguas mixtas con un aporte importante de Ca - HCO<sub>3</sub>. La composición de las aguas está determinada por procesos asociados a las precipitaciones y la interacción agua - roca, donde para este último es la meteorización de silicatos la que juega el rol más fundamental. El impacto antrópico es también relevante, y este se expresa principalmente en concentraciones anómalas SO<sub>4</sub>, K y NO<sub>3</sub>.

Se aprecia una clara diferencia entre las aguas de la península y aquella registrada en las areniscas de un cerro isla adyacente a esta, la que muestra valores de conductividad y concentración de iones significativamente mayores, además de proporciones iónicas distintivas. Se determina así, que pese a la cercanía espacial con la península esta posee un origen diferente, el cual podría estar relacionado al acuífero detrítico Talcahuano.

El análisis limitado de parámetros de calidad de las aguas muestra que, la evaluación de la potabilidad, las concentraciones de los iones mayores medidos se encuentran muy por debajo de lo establecido por la norma chilena. En el caso de los parámetros fisicoquímicos, sin embargo, es posible encontrar aguas ácidas bajo los límites de pH. Más aun, la potabilidad del agua puede verse comprometida también por otros iones y parámetros no considerados en este estudio, como el ion NO<sub>3</sub> y los coliformes fecales. Las vertientes requieren de este modo un extensivo estudio para establecer con confianza su potabilidad. Por otro lado, las características de las aguas permiten afirmar que estas poseen características buenas a aceptables para fines de irrigación, en donde el único índice que supera los límites recomendados es el porcentaje de sodio (%Na).

La recarga en el área se produce en su totalidad por la infiltración directa de las precipitaciones, y como consecuencia del carácter arcilloso de los suelos y los usos de suelo esta constituye una parte menor, representando sólo un 4% del volumen total de las precipitaciones. Se determina, además, que los cambios en los usos de suelo pueden tener un impacto significativo en los valores ponderados de la recarga.

Se establecen zonas reducidas de carácter estratégico que pueden tener efectos significativos en la recarga y la calidad del agua. Estas zonas se ubican principalmente cercanas a las líneas divisorias de aguas de las cuencas de la península, en zonas determinadas

geomorfológicamente como las terrazas del área, y en donde además posiblemente se desarrolla un perfil de meteorización de mayor magnitud.

Se identifica a través del modelo de recarga y las tendencias de las mediciones del nivel freático de un pozo y los caudales de descarga en vertientes, que la mayor parte de la recarga se concentra entre los meses de junio y septiembre. Se requieren, sin embargo, períodos más prolongados de monitoreo para patrones confiables.

El monitoreo de los caudales para las vertientes estudiadas indica que estos son de una magnitud discreta en volumen, y que poseen un carácter permanente a lo largo del año con una variabilidad estacional moderada de los caudales. La cuantificación de los volúmenes de descarga de las vertientes, indica que estas no podrían representar una fuente sustentable de agua para la población, sobre todo en consideración de la densidad poblacional de la península. A pesar de esto, existe aún un desconocimiento de la magnitud real de los volúmenes totales de descarga en el área, por lo tanto, la factibilidad y finalidad de uso debería ser estudiada para cada vertiente en particular.



## REFERENCIAS

- ACWORTH, R.I. 1987. The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. *Quatern. J. Eng. Geol.* Vol. **20**: 265-272.
- AGUIRRE, L., HERVÉ, F. & GODOY, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile, an outline. *Kristallinikum.* Vol. **9**: 7-19. Praga.
- ANAZAWA, K. & OHMORI, H. 2005. The hydrochemistry of surface waters in Andesitic Volcanic area, Norikura volcano, central Japan. *Chemosphere*, Vol. **59**, (5): 605-615.
- APPELO, C. A. J. & POSTMA, D. 2004. Geochemistry, groundwater and pollution. CRC press: 649 pp.
- ARUMÍ J. 2018. INFORME TÉCNICO SOBRE AGUAS SUPERFICIALES Y AGUAS SUBTERRÁNEAS - PROYECTO BORDEMAR - CRIANZA Y ENGORDA DE SALMÓNIDOS EN ESTANQUES EN TIERRA.
- AQUALOGY MEDIOAMBIENTE CHILE S.A. 2013. LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO EN CUENCAS PLUVIALES COSTERAS EN LA REGIÓN DEL LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O'HIGGINS Y REGIÓN DEL BIOBÍO.
- BIRÓ, L. 1982. Revisión y redefinición de los Estratos de Quiriquina, Campaniano-Maastrichtiano, en su localidad tipo, en la Isla Quiriquina a 36°27' Lat. Sur, Chile, Sudamérica, con su perfil complementario en Cocholgue. Congreso Geológico Chileno N°3. Actas **I**: 29-64. Concepción.
- BREDEHOEFT, J. 2007. It is the discharge. *Ground Water.* Vol. **45**, (5): 523 p.
- BUATOIS, L. A., & ENCINAS, A. 2011. Ichnology, sequence stratigraphy and depositional evolution of an Upper Cretaceous rocky shoreline in central Chile: Bioerosion structures in a transgressed metamorphic basement. *Cretaceous Research*, Vol **32**, (2): 203-212.
- BUDHIEWIJATNA, A., SUDARMADJI, S., & HENDRAYANA, H. TRACING THE ORIGIN OF SPRING WATER BY USING ENVIRONMENTAL ISOTOPES IN THE SOUTHERN SLOPE OF MOUNT MERAPI, INDONESIA.
- CIREN. 1999. Descripción de Suelos, Materiales y Símbolos. Estudio Agrológico VIII Región. Publicaciones CIREN N°121. Tomo **I** y **II**. 475 p. Concepción.
- CREIXELL, C. 2001. Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30'S y 38°00'S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp., Concepción.



COURTOIS, N., LACHASSAGNE, P., WYNS, R., BLANCHIN, R., BOUGAÏRE, F.D., SOME, S. & TAPSOBA, A. 2009. Large-scale mapping of hard-rock aquifer properties applied to Burkina Faso. *Ground Water*. Vol **48**. 269-283.

CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. R. 1976. *Hidrología subterránea*. Vol. **2**. Barcelona.

DECKART, K., HERVÉ ALLAMAND, F., FANNING, M., RAMÍREZ, V., CALDERÓN, M. & GODOY, E. 2014. U-Pb geochronology and Hf-O isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, south-central Chile. *Andean geology*. Vol. **41**, (1): 49-82.

ERRÁZURIZ, A. M., CERECEDA, P., GONZÁLEZ, J. I., GONZÁLEZ, M., HENRÍQUEZ, M., & RIOSECO, R. 1998. *Manual de geografía de Chile*. Editorial Andrés Bello: 443 pp. Santiago.

FRUTOS, J., MENCARINI, P., PINCHEIRA, M., BOURRET, Y. & ALFARO, G. 1982. GEOLOGÍA DE LA ISLA QUIRIQUINA. Congreso Geológico Chileno N°3. Tomo **III**: 307-338. Concepción.

GALLI, C. 1967. *Geología Urbana y Suelo de Fundación de Concepción y Talcahuano, Chile*. Informe Final del Proyecto de Investigación N° 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción, Universidad de Concepción (Inédito): 248 pp., Concepción.

GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2020. GEOLOGÍA DEL SECTOR NORTE DE LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN ENTRE LOS 36°31' – 36°50' LATITUD SUR Y 72°55' – 73°13' LONGITUD OESTE, REGIÓN DEL BIOBÍO, Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 192 pp. Concepción.

GIBBS, R. J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry: *Science*. Vol. **170**: 795-840.

HAINES, T. S., & LLOYD, J. W. 1985. Controls on silica in groundwater environments in the *United Kingdom*. *Journal of Hydrology*. Vol. **81**, (3-4): 277-295.

HERVÉ, F. 1977. Petrology of crystalline basement of the Nahuelbuta mountains, south central Chile. *Comparative Studies on the Geology on the Circumpacific Orogenic Belts in Japan-Chile*. T. Ishikawa y L. Aguirre (Eds.). Japan Society for the Promotion of Science: 51 pp. Tokio.

HERVÉ, F. 1988. Late Palaeozoic Subduction and accretions in Southern Chile. *Episodes*. Vol. **11**, (6): 183-188.

HERVÉ, F.; GODOY, E.; PARADA, M.A.; RAMOS, V.; RAPELA, C.; MPODOZIS, C. & DAVIDSON, J. 1987. A general view on the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early History. *Circum Pacific orogenic belts and the evolution of the Pacific Ocean Basin*. Vol **18**: 97-114.

HERVÉ, F.; FAÚNDEZ, V.; CALDERÓN, M.; MASSONE, H. & WILLNER, A. 2007. Metamorphic and plutonic basement complexes. *The Geology of Chile*. Moreno, T. & Gibbons, W. (Eds). The Geological Society of London: 5-19. Londres.

HUNTER, J. D. 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*. Vol. **9**, (3): 90-95.

HOUNSLOW, A. 1995. Water Quality Data: Analysis and Interpretation. CRC Press: 416 pp.

JAMES, D. W., HANKS, R. J. & JURINAK, J. J. 1982. Modern irrigated soils. John Wiley & Sons: 235 pp. New York.

KAMTCHUENG, B. T., FANTONG, W. Y., WIRMVEM, M. J., TIODJIO, R. E., TAKOUNJOU, A. F., NGOUPAYOU, J. R. N. & HELL, J. V. 2016. Hydrogeochemistry and quality of surface water and groundwater in the vicinity of Lake Monoun, West Cameroon: approach from multivariate statistical analysis and stable isotopic characterization. *Environmental monitoring and assessment*. Vol. **188**(9): 524 pp.

KRAUSKOPF, K. B. 1956. Dissolution and precipitation of silica at low temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol **10**, (1-2): 1-26.

KRESIC, N. & STEVANOVIC, Z. 2009. Groundwater hydrology of springs: Engineering, theory, management and sustainability. Butterworth-heinemann: 592 pp.

KÖPPEN, W. 1936. Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie (W. Köppen & R. Geiger editores). Vol. **1**: 1-44. Berlin.

LACHASSAGNE, P., AHMED SH., B. DEWANDEL, COURTOIS, N., F. LACQUEMENT, MARÉCHAL J.C., PERRIN J., WYNS R. 2005. From a new hydrogeological conceptual model for hard rock aquifers to enhanced practical applications (survey, management of the water resource, modeling, protection, etc.).

LACHASSAGNE, P., WYNS, R., & DEWANDEL, B. 2011. The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*. Vol. **23**, (3): 145-161.

LACHASSAGNE, P., DEWANDEL, B. & WYNS, R. 2014. Hydrogeology of Hard Rock Aquifers. Handbook of Engineering Hydrology: Fundamentals and Applications. Taylor and Francis. 289-305.

LÓPEZ, P. 2013. Evaluación de peligrosidad por procesos de remoción en masa en los cerros La Unión y Zaror. Comuna de Talcahuano, Región del Biobío (Chile). *Revista Geográfica del Sur*. Vol. **4**, (6): 59-82.

MANGA, M. 2001. Using springs to study groundwater flow and active geologic processes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. Vol. **29**, (1): 201-228.

MARDONES, M. 1978. El sitio geomorfológico de las ciudades de Concepción y Talcahuano. Universidad de Concepción, Departamento de Geografía. Concepción, Chile.

- MARDONES, M., RODRIGUEZ, A., SOTO, J. 1994. Los riesgos naturales en la comuna de Talcahuano. 7° Congreso Geológico Chileno, N°1: 653-656.
- MEINZER, O.E. 1923. The occurrence of ground water in the United States with a discussion of principles. *U.S. Geological Survey Water-Supply*. Vol. **50**.
- MILOJEVIC, N., 1966. Hidrogeologija. Univerzitet u Beogradu, Zavod za izdavanje udžbenika Socijalističke Republike Srbije, Beograd.
- MORENO, E. 1964. Libro de oro de Talcahuano: Bicentenario 1764-1964. Escuela Tipográfica Salesiana: 332 pp. Talcahuano.
- MUÑOZ, J.; FERNÁNDEZ, B.; VARAS, E.; PASTÉN, P.; GÓMEZ, D.; RENGIFO, P.; MUÑOZ, J.; ATENAS, M. & JOFRÉ, J. 2005. Chilean water resources and related environmental issues. *Geology of Chile* (Moreno, T. & Gibbons, W. editores). Geological Society of London: 215-230 pp. Londres.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NCR). 1996. Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications. National Academies Press: 568 pp. Washington, DC.
- NAS, B. & BERKTAY, A. 2010. Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. *Environ. Monit. Assess.* Vol. **160**: 215-227.
- NGOUPAYOU, J.R., BON, A.F., MBOUDOU, G.E., ABDU, N.N. & EKODECK, G.E. 2019. Hydrogeological Characteristics of Shallow Hard Rock Aquifers in Yaounde (Cameroon, Central Africa). *Groundwater Hydrology*.
- OMAR, L. CALIDAD Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN EL AGUA DE LA REGIÓN METROPOLITANA: ESTUDIO DEL ÁREA CONCESIÓN SMAPA. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile (Inédito): 88 pp., Santiago.
- QUEZADA, J. 1996. Geología urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 143 pp., Concepción.
- QUEZADA, J., CECIONI, A., ESTERIO, H. & PINEDA, V. 1997. Geología urbana de Talcahuano. Congreso Geológico Chileno N° 8. Actas, Vol. **1**: 785-789.
- RICHARDS, L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline alkali soil. *Agriculture Handbook*. Vol. **160**.
- SAAVEDRA C. 2014. INFORME ACTUALIZACIÓN DEL ESTADO DE VERTIENTES CERROS DE TALCAHUANO.
- SAAVEDRA, C., LARA, F., TREBILCOCK, F. & SOTTOLICHIO, R. 2013. INFORME DIAGNÓSTICO AMBIENTAL VERTIENTES SECTOR CERROS DE TALCAHUANO.

- SARAVANAN, K., SRINIVASAMOORTHY, K., PRAKASH, R., GOPINATH, S. & SUMA, C. 2015. An Evaluation of hydrogeochemistry of groundwater in upper vellar sub-basin using mineral stability and solute transport modelling. *Aquat. Procedia*. Vol. 4: 1119-1125.
- SAKRAM, G. & ADIMALLA, N. 2018. Hydrogeochemical characterization and assessment of water suitability for drinking and irrigation in crystalline rocks of Mothkur region, Telangana State, South India. *Applied Water Science*. Vol 8(5): 143.
- SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J.; ROSEMBERG, J.S. & PAPENDICK, R.I. 1986. Estimating generalized soilwater characteristics from texture. *Sci. Soc. Am. J.* Vol. 50, (4): 1031-1036.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL (SEA). 2012. GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SEIA. Santiago.
- SHARP, J. M. 2014. *Fractured Rock Hydrogeology*. CRC Press: 408 pp.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). 1986. Urban hydrology for small watersheds. *Technical Release*. Vol. 55, (2-5): 17-21.
- SRINIVASAMOORTHY, K., GOPINATH, M., CHIDAMBARAM, S., VASANTHAVIGAR, M. & SARMA, V. S. 2014. Hydrochemical characterization and quality appraisal of groundwater from Pungar sub basin, Tamilnadu, India. *Journal of King Saud University-Science*. Vol: 26, (1): 37-52.
- SRINIVASAMOORTHY, K., NANTHAKUMAR, C., VASANTHAVIGAR, M., VIJAYARAGHAVAN, K., RAJIVGANDHI, R., CHIDAMBARAM, S. & VASUDEVAN, S. 2011. Groundwater quality assessment from a hard rock terrain, Salem district of Tamilnadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 4(1-2): 91-102.
- STINNESBECK, W. 1986. Zu den faunistischen und palökologischen Verhältnissen in der Quiriquina Formation (Maastrichtium) Zentral-Chiles. *Palaeontographica*. Part A. Vol. 194, (4-6): 99-237. Stuttgart.
- SUBBARAO, C., SUBBARAO, N. V. & CHANDU, S. N. 1996. Characterization of groundwater contamination using factor analysis. *Environmental Geology*. Vol 28: 175-180.
- TARDY, Y. 1971. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. *Chemical Geology*. Vol. 7: 253-271.
- TAYLOR, R. & HOWARD, K. 2002. A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: Evidence from Uganda. *Hydrogeology Journal*. Vol. 8: 79-294.
- TUBMAN, S. C. 2013. SPRING DISCHARGE MONITORING IN LOW-RESOURCE SETTINGS: A CASE STUDY OF CONCEPCIÓN CHIQUIRICHAPA, GUATEMALA. Report for the degree of Master of Science. Michigan Technological University (Inédito): 59 pp.

TUME, P., GONZÁLEZ, E., KING, R. W., CUITIÑO, L., ROCA, N., & BECH, J. 2018. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for potentially toxic elements in urban soils of Talcahuano, Chile. *Journal of soils and sediments*. Vol. **18**, (6): 2335-2349.

UNIÓN TEMPORAL DE PROVEEDORES (UTP). 2017. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL, PROYECCIONES FUTURAS Y CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CHILE.

VÁSQUEZ, P. 2001. PETROLOGÍA Y GEOTERMOBAROMETRÍA DEL BASAMENTO METAMÓRFICO DE LA CORDILLERA DE LA COSTA DE CHILE, ENTRE LOS 36°30'S Y 38°00'S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 170 pp., Concepción.

VÁSQUEZ, P., GLODNY, J., FRANZ, G., FREI, D. & ROMER, R. L. 2011. Early Mesozoic Plutonism of the Cordillera de la Costa (34–37 S), Chile: constraints on the onset of the Andean Orogeny. *The Journal of Geology*. Vol. **119**, (2): 159-184.

Wilcox, L.V. 1955. Classification and use of irrigation water. USDA Circular N° 969. Washington.

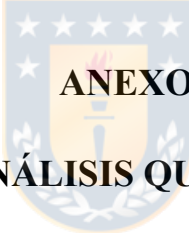
WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). 2011. Guidelines for drinking-water quality.

WYNS, R., BALTASSAT, J.M., LACHASSAGNE, P., LEGTCHENKO, A. AND VAIRON, J. 2004. Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, Vol. **175**, (1): 21-34.

WYNS, R., DEWANDEL, B., & LACHASSAGNE, P. 2017. Origin of fracturing in hard-rock aquifers: what are the factors controlling the properties of the fractured layer?. *Flowpath 2017*, IAH Italian. Chapter. 14-16. Cagliari, Italy.



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANEXOS**  
**I ANÁLISIS QUÍMICOS**



**Tabla 1: Detalle de la ubicación de los puntos muestreados.** Coordenadas N y E en sistema de coordenadas WGS84 UTM 18S.

Código	Nombre de la vertiente	E (m)	N (m)	Latitud	Longitud	Cota (m)	Tipo de muestra	Fecha
PT01	Serrano Cerro David Fuentes	668458	5934513	36°43'13"S	73°6'49"W	5.6	Superficial	10/01/2020
PT02	Santa Julia	667273	5935176	36°42'52"S	73°7'38"W	104.4	Superficial	10/01/2020
PT03	Baroa Bajo	667092	5934698	36°43'7"S	73°7'44"W	91.5	Superficial	10/01/2020
PT04	Juan Chavez	667134	5934497	36°43'14"S	73°7'43"W	44.0	Superficial	10/01/2020
PT05	La Torre	667467	5934581	36°43'11"S	73°7'29"W	15.2	Superficial	10/01/2020
PT06	San Juan Tumbes	669992	5942898	36°38'40"S	73°5'54"W	33.9	Superficial	10/01/2020
PT07	La Gloria	666594	5934432	36°43'16"S	73°8'4"W	70.0	Superficial	13/01/2020
PT08	Los Cipreses	666821	5935257	36°42'49"S	73°7'56"W	103.3	Superficial	13/01/2020
PT09	Vista Hermosa	667706	5935697	36°42'35"S	73°7'21"W	104.3	Superficial	13/01/2020
PT10	28 de Octubre Cerro Cornou	668050	5935607	36°42'37"S	73°7'7"W	61.3	Superficial	13/01/2020
PT11	Estrella Azul	667842	5937264	36°41'44"S	73°7'16"W	97.7	Superficial	13/01/2020
PT12	Pozo Tola	668185	5937578	36°41'33"S	73°7'3"W	125.0	Subterránea	13/01/2020

**Tabla 2: Concentración de iones en miliequivalentes por litro (meq/L).** SiO<sub>2</sub> en mmol/L. N.D. = Concentración bajo el límite de detección.

Código	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Sr <sup>+2</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>
PT01	1.75	1.81	0.05	1.53	N.D.	1.80	1.48	2.20	N.D.	0.54
PT02	0.06	0.23	0.03	0.70	N.D.	0.68	N.D.	0.23	N.D.	0.27
PT03	0.32	0.95	0.02	0.97	N.D.	1.02	N.D.	0.26	N.D.	0.21
PT04	0.81	0.82	0.04	1.10	N.D.	1.14	0.23	0.79	0.39	0.17
PT05	0.46	0.70	0.04	1.05	N.D.	0.94	0.24	0.56	0.12	0.21
PT06	0.15	0.19	0.04	0.66	N.D.	0.57	0.00	0.41	N.D.	0.28
PT07	1.26	0.58	0.07	1.15	N.D.	0.95	0.29	0.91	N.D.	0.23
PT08	0.38	0.86	0.03	1.52	N.D.	1.39	N.D.	0.16	N.D.	0.16
PT09	0.12	0.37	0.01	0.62	N.D.	0.74	N.D.	0.29	N.D.	0.20
PT10	0.10	0.70	0.02	0.73	N.D.	0.78	N.D.	0.38	N.D.	0.25
PT11	0.13	0.74	0.03	1.07	N.D.	1.06	N.D.	0.21	N.D.	0.26
PT12	0.47	0.37	0.32	0.99	N.D.	0.90	0.83	0.50	N.D.	0.15

**Tabla 3: Detalle del porcentaje de error en el balance iónico.** Color rojo representa un porcentaje de error sobre el 5%.

Muestra	$\Sigma$ Cationes	$\Sigma$ Aniones	% error
PT01	5.15	5.47	3.04
PT02	1.03	0.91	6.20
PT03	2.26	1.28	27.76
PT04	2.78	2.55	4.39
PT05	2.25	1.86	9.54
PT06	1.03	0.98	2.41
PT07	3.05	2.15	17.31
PT08	2.79	1.55	28.67
PT09	1.12	1.03	4.45
PT10	1.55	1.16	14.62
PT11	1.97	1.27	21.55
PT12	2.16	2.22	1.47

**Tabla 4: Análisis físicos y químicos en vertientes de la península de Tumbes.** Saavedra y otros (2013).

Nombre de la vertiente	Año	Color verdadero	pH (25°C)	Fe (mg/L)	NO <sub>3</sub> (mg/L)	Turbidez (NTU)	Coliformes fecales	Coliformes totales
Santa Julia	2012	< 5	7.42	0.038	9.670	24	1600	> 1600
Los Lobos	2012	32	7.16	0.243	19.423	31	1600	> 1600
Cornou	2013	< 5	6.08	0.004	22.96	< 1	4	11
Hermosa Vista	2013	25	6.09	0.144	6.64	59	> 1600	> 1600
Badarán	2013	22	6.20	0.079	6.16	18	240	> 1600
Los Cipreses	2013	6	5.90	0.015	75.64	30	540	920
Antinao bajo	2013	< 5	5.49	0.023	46.72	6	> 1600	> 1600
La Gloria	2013	< 5	5.61	0.006	59.83	36	33	920



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANEXOS**

**II MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES Y**  
**PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS**

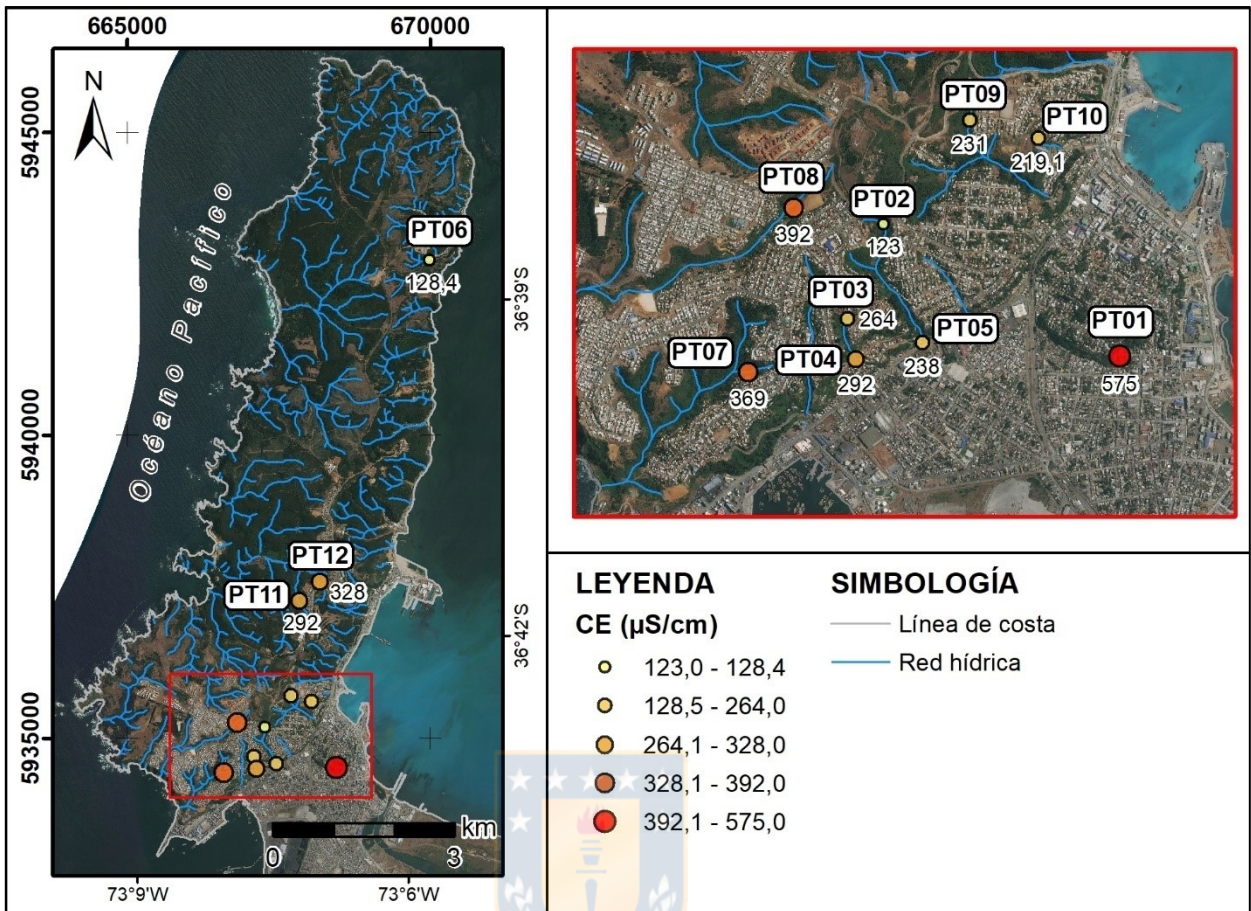


Figura 1: Distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE). Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.

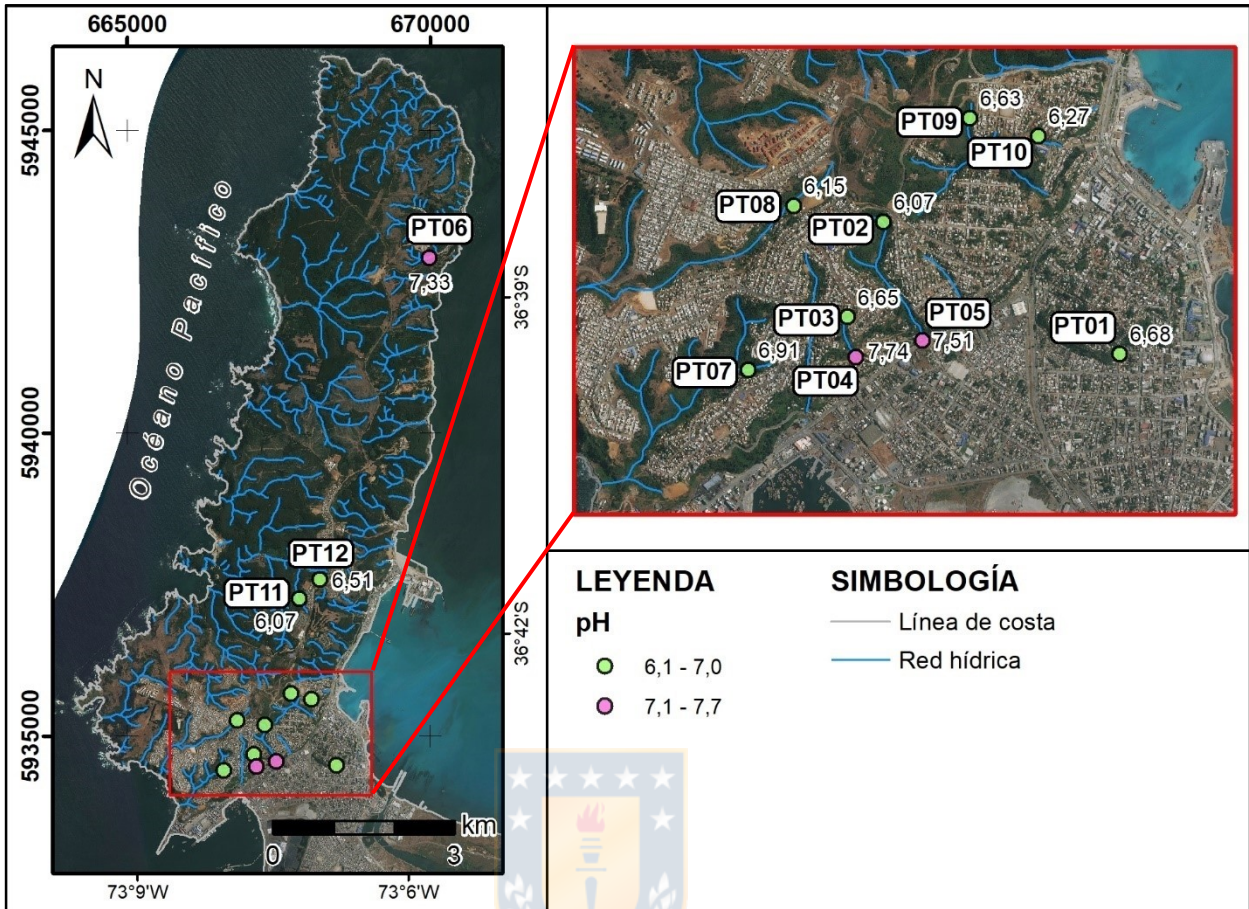


Figura 2: Distribución espacial del pH. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.



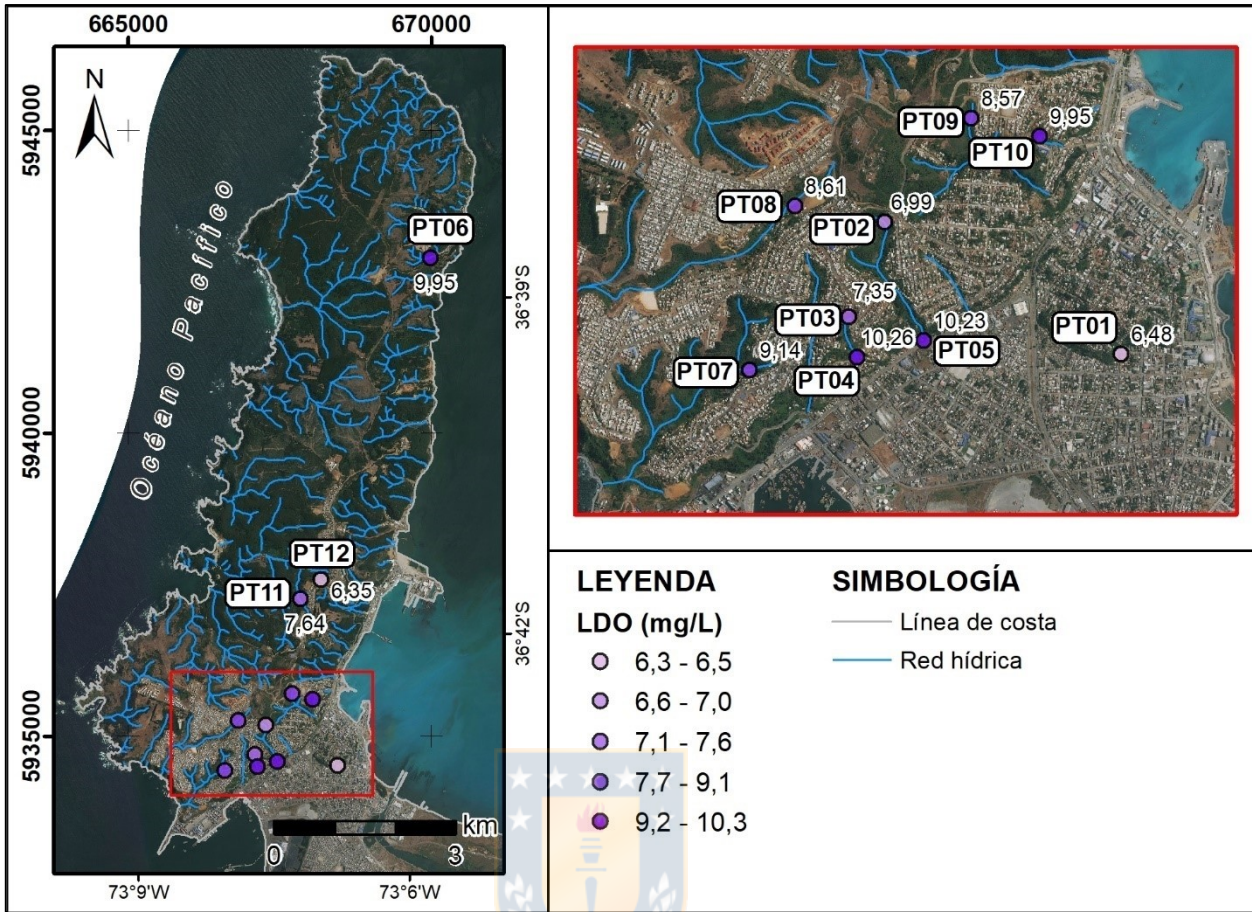
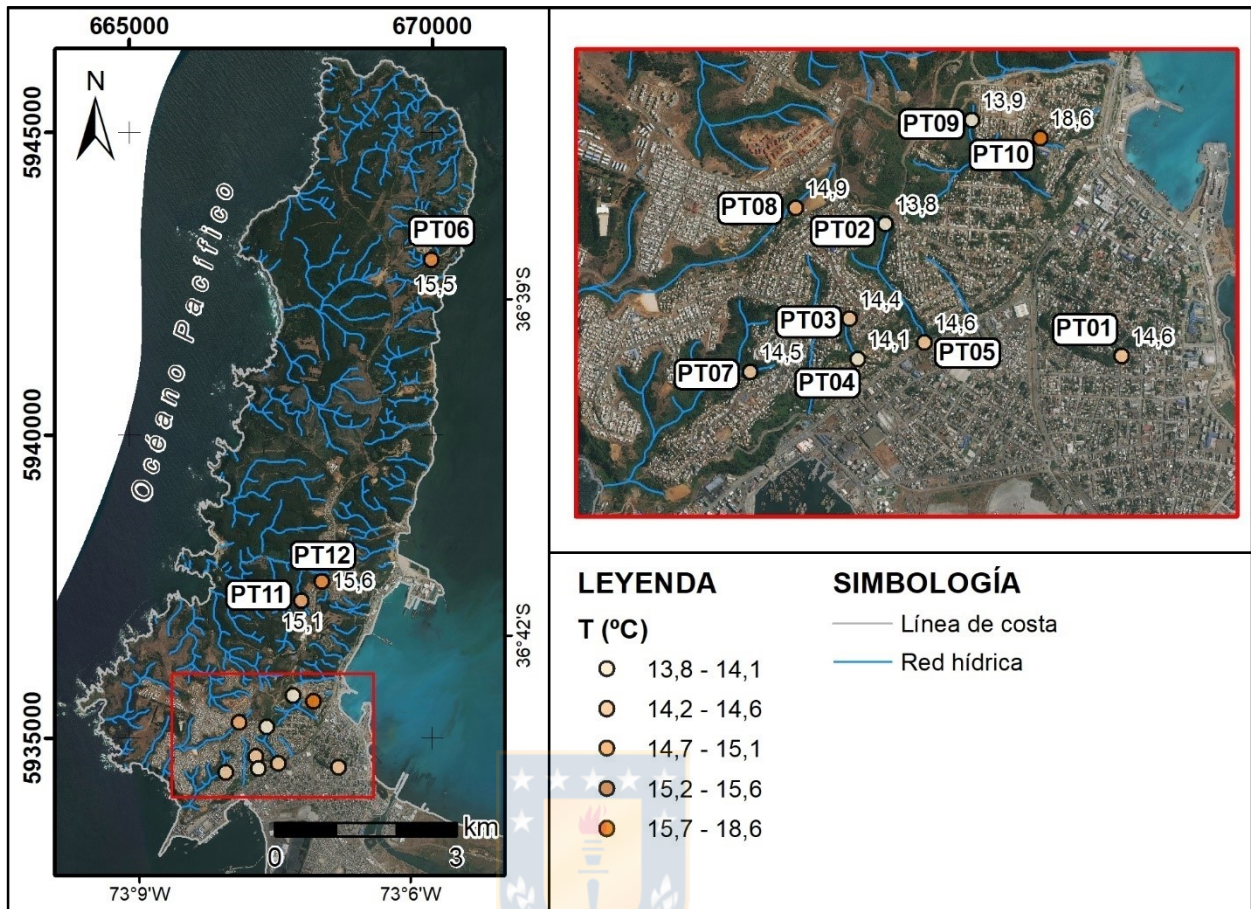


Figura 3: Distribución espacial del oxígeno disuelto (LDO). Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.





**Figura 4: Distribución espacial de la temperatura (T).** Valores en grados Celsius (°C). Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.

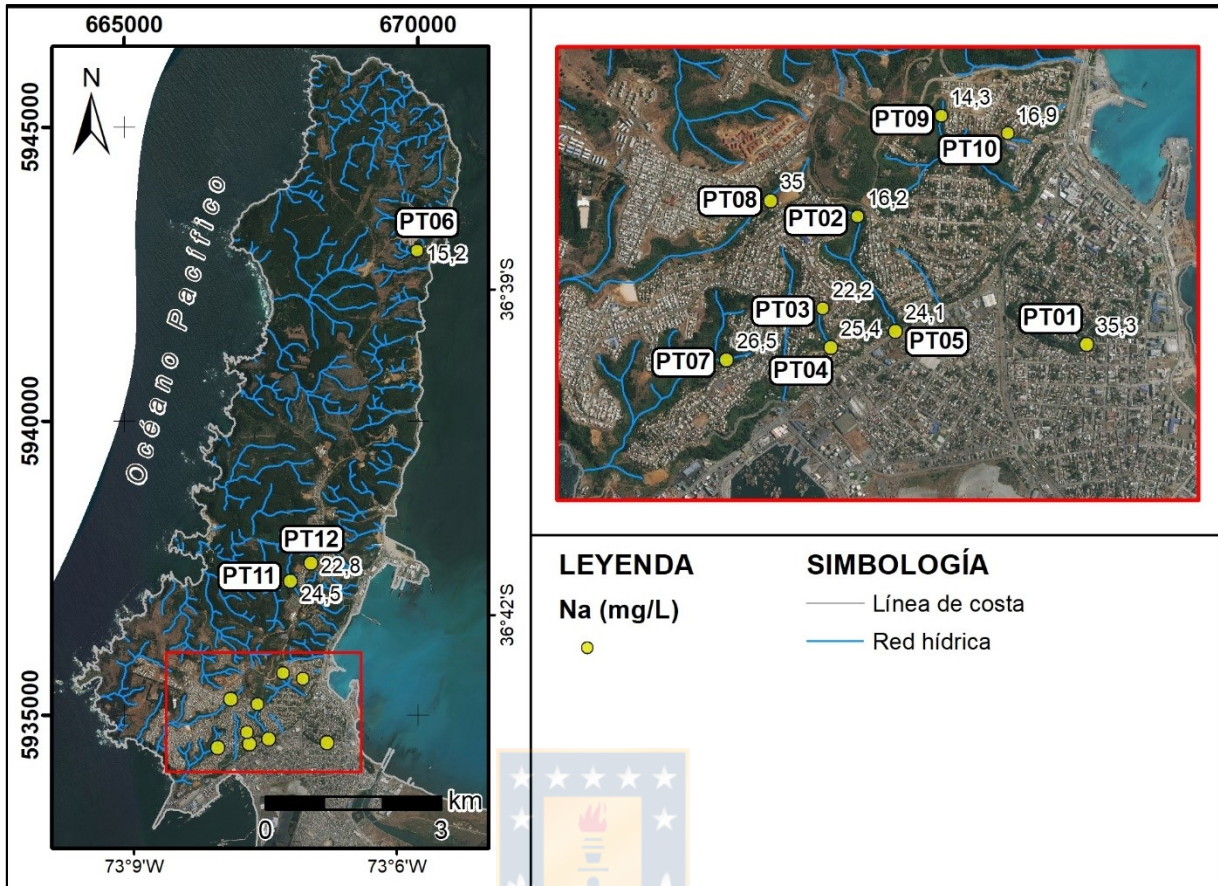
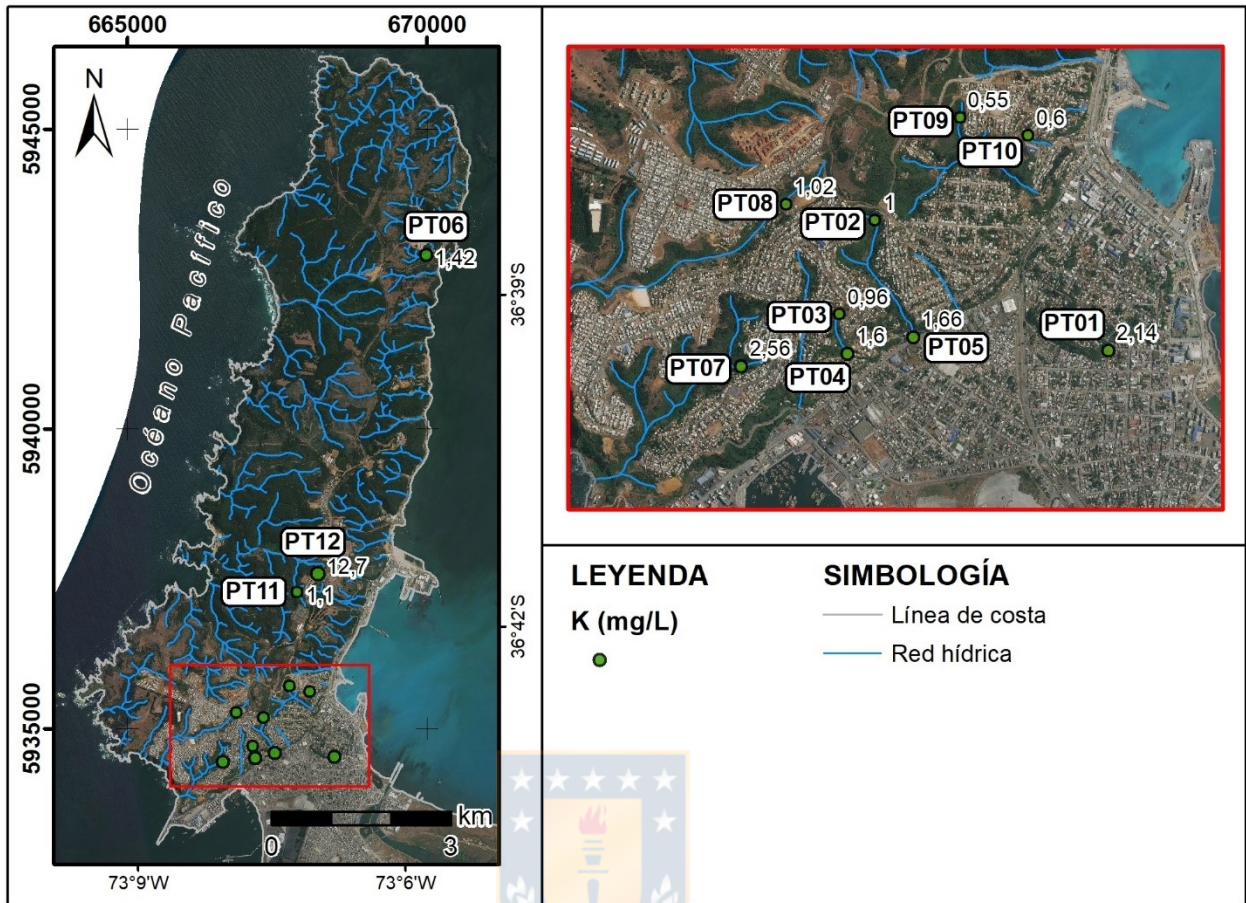
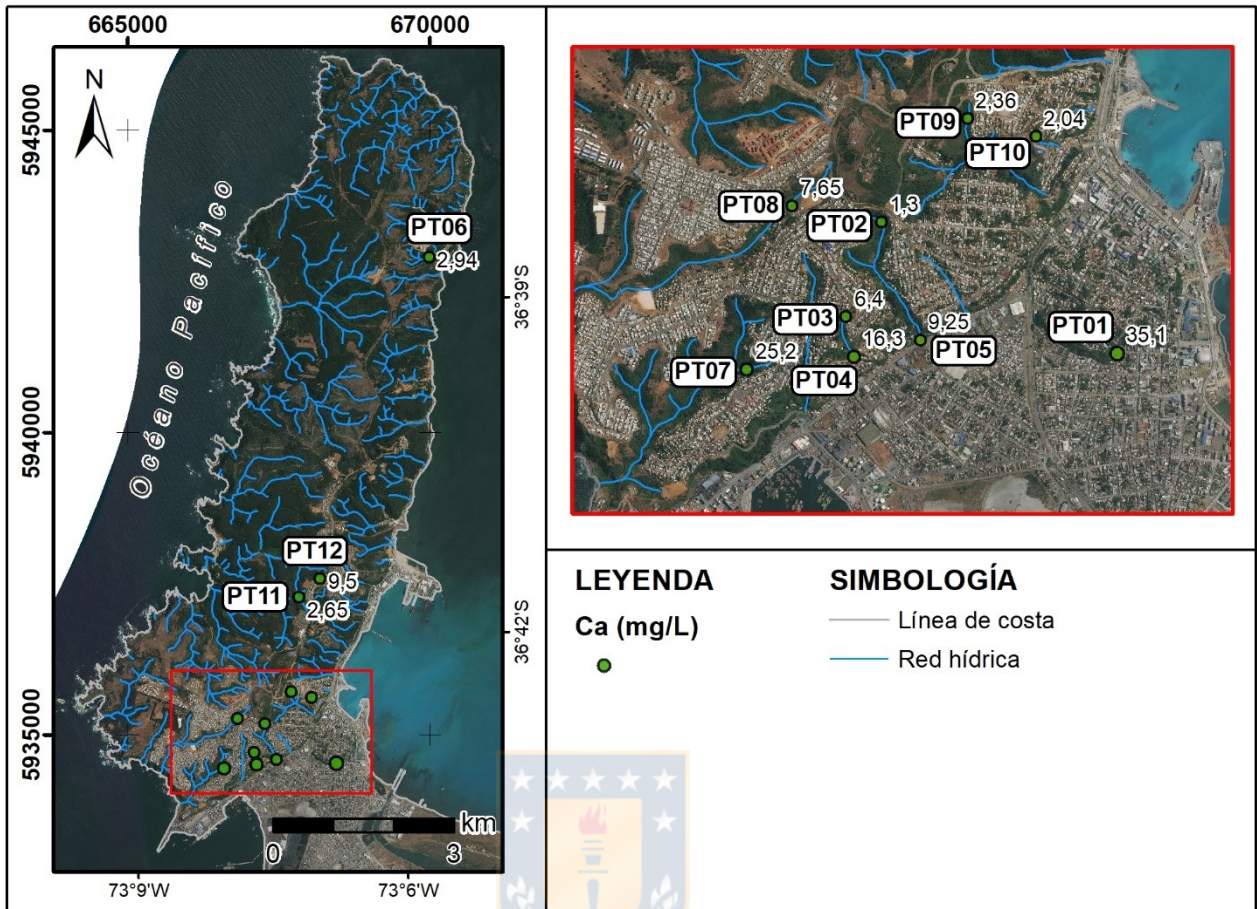


Figura 5: Distribución espacial del sodio (Na). Las etiquetas indican los valores de concentración en mg/L. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.





**Figura 6: Distribución espacial del potasio (K).** Las etiquetas indican los valores de concentración en mg/L. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.



**Figura 7: Distribución espacial del calcio (Ca).** Las etiquetas indican los valores de concentración en mg/L. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.



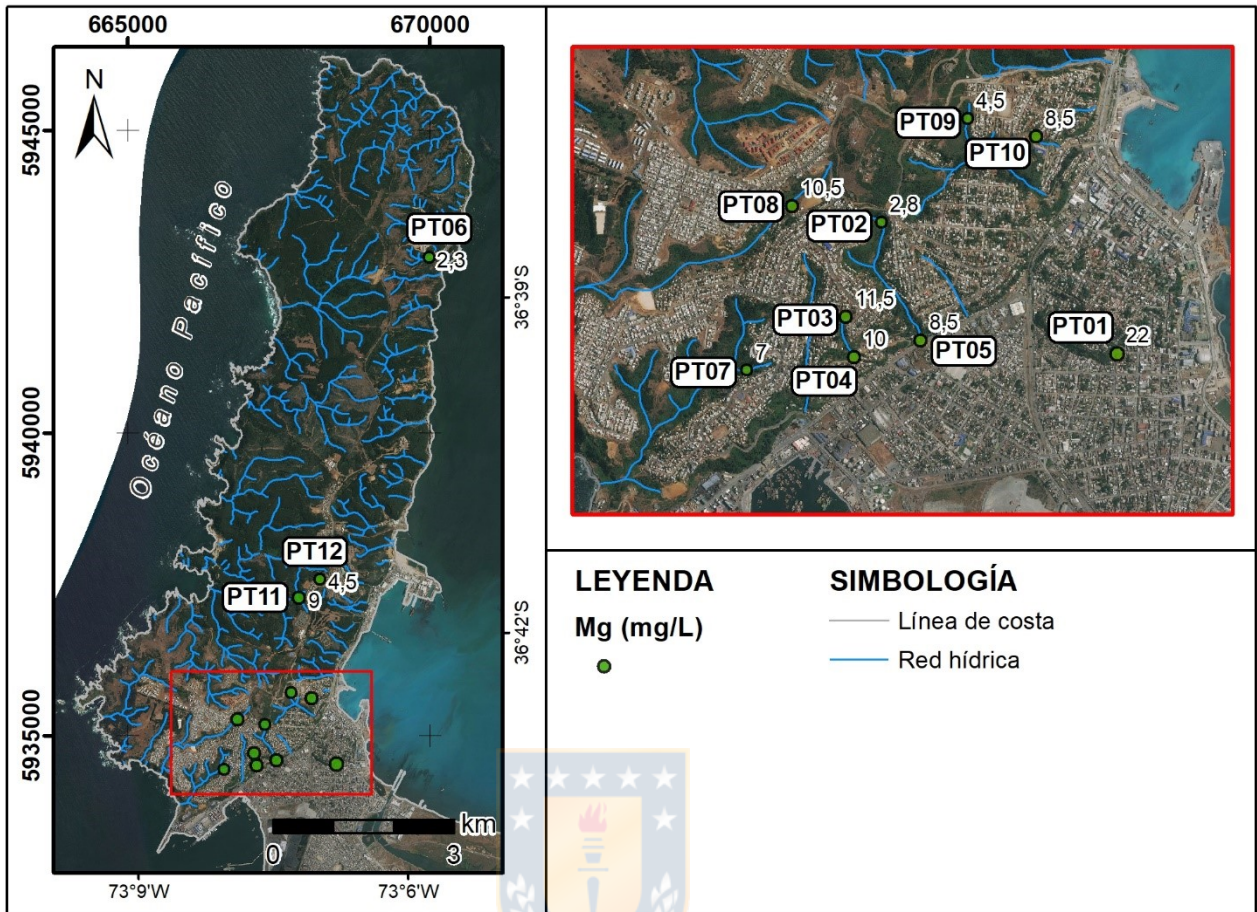
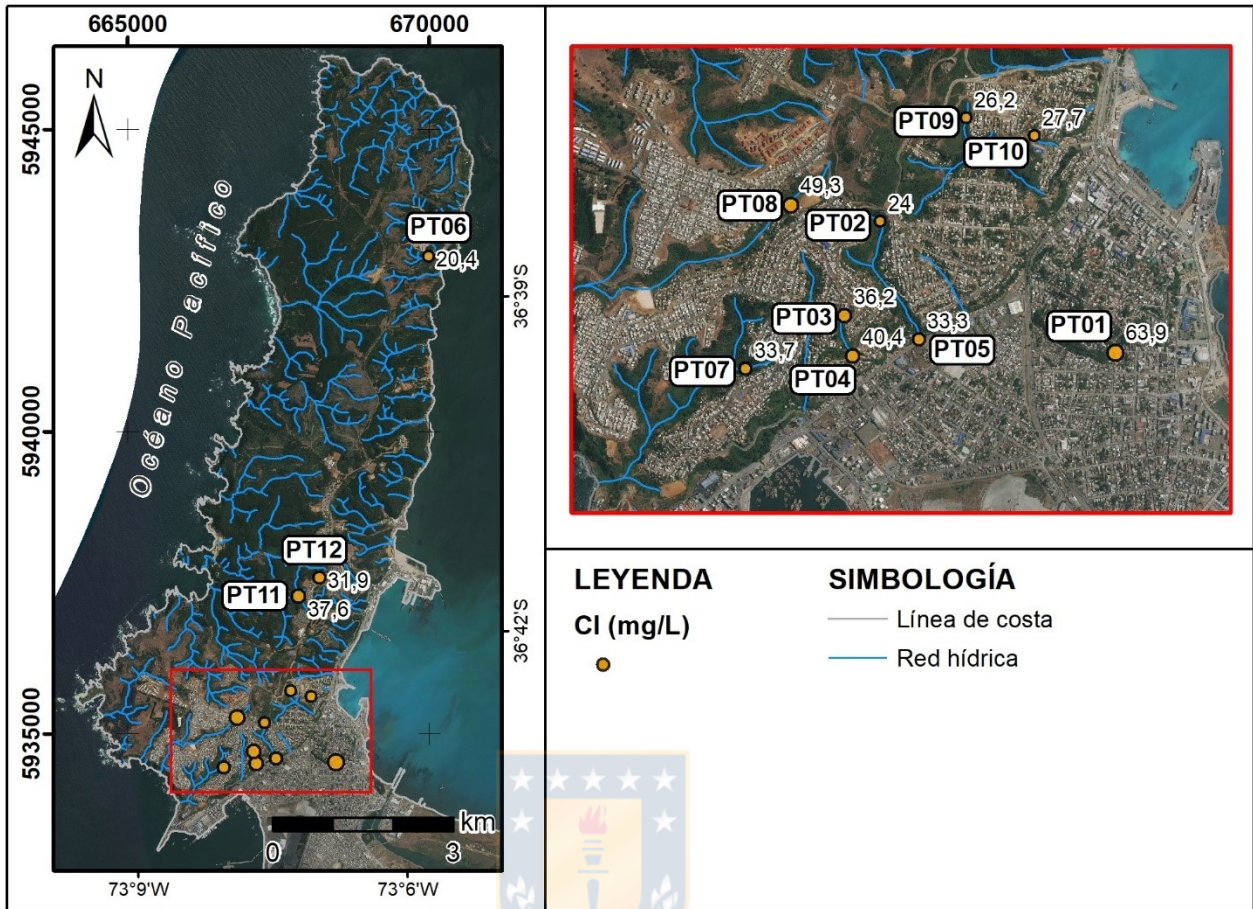
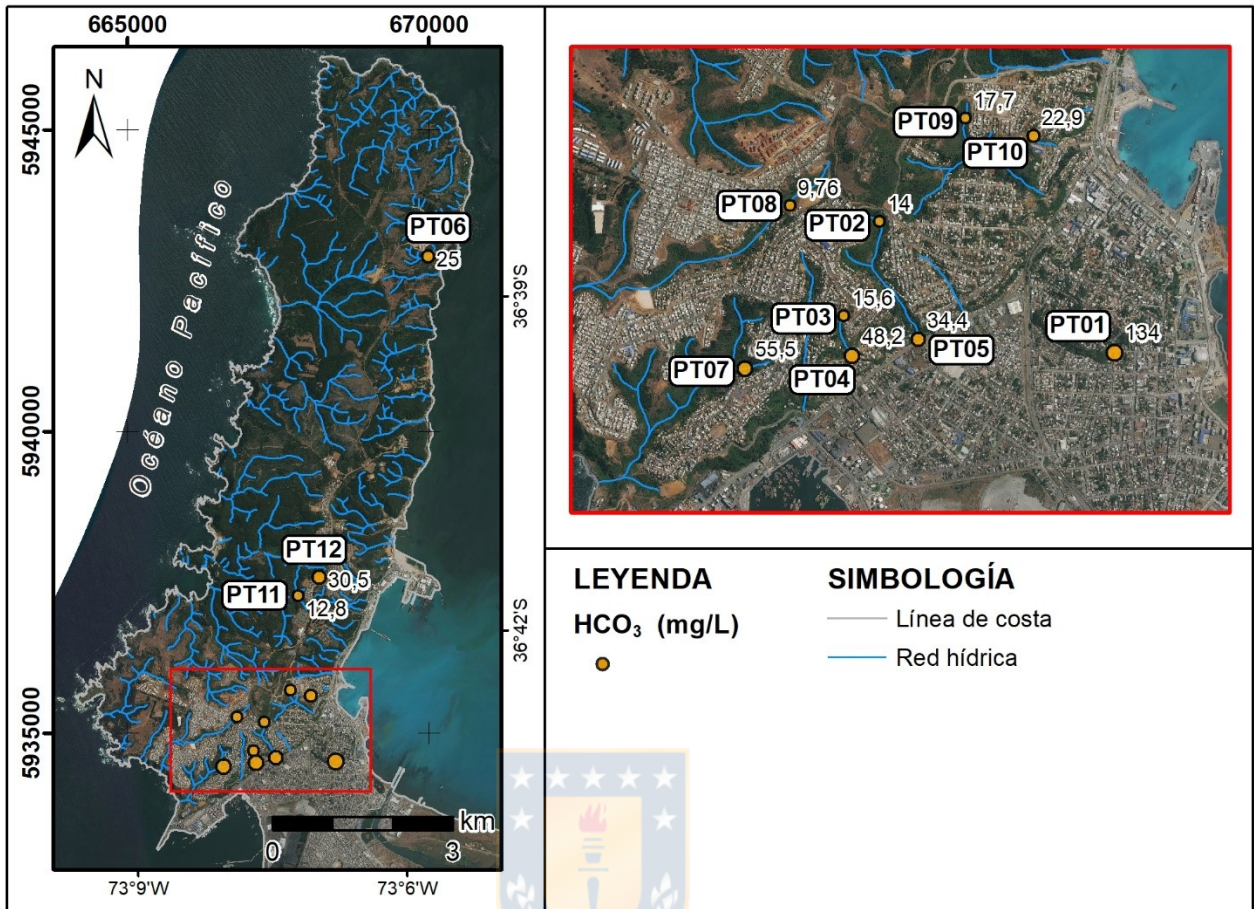


Figura 8: Distribución espacial del magnesio (Mg). Las etiquetas indican los valores de concentración en mg/L. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.

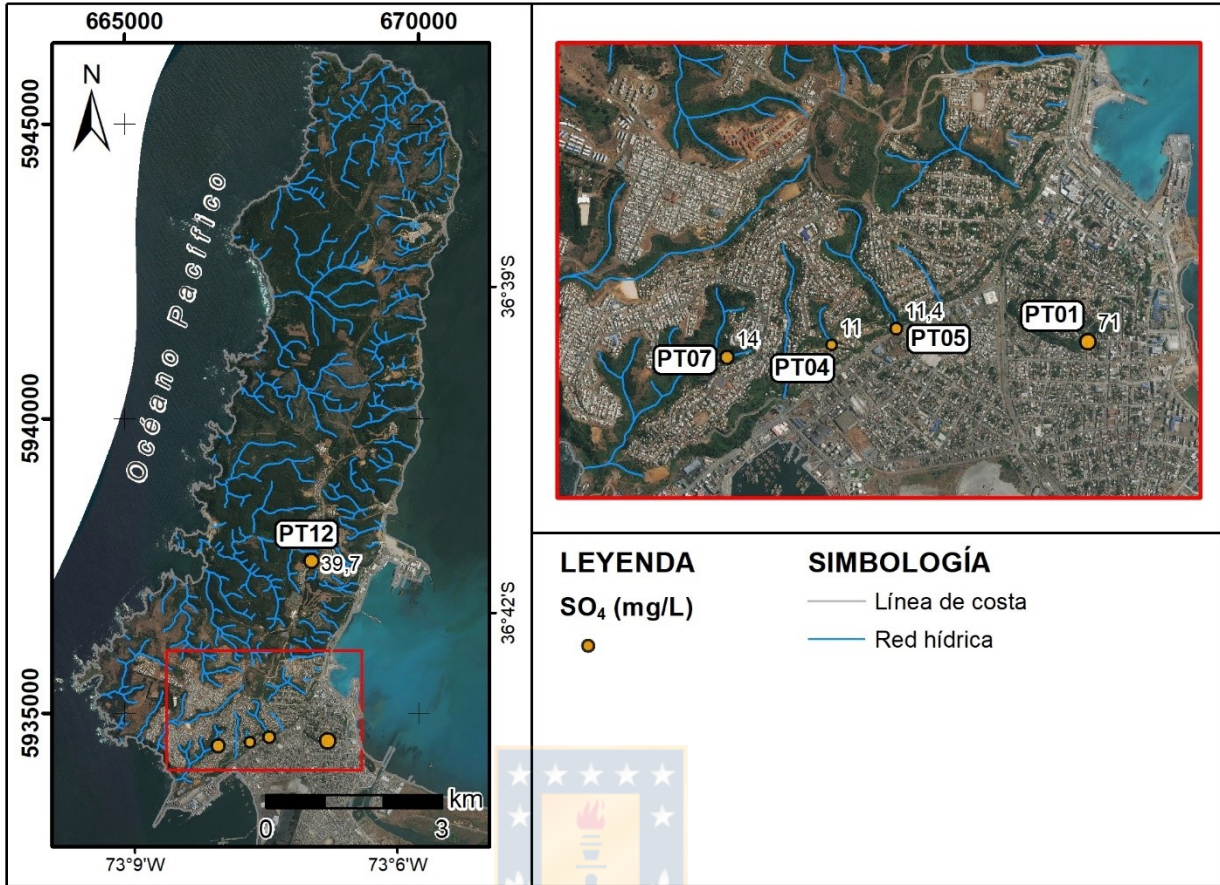


**Figura 9: Distribución espacial del cloro (Cl).** Las etiquetas indican los valores de concentración en mg/L. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.



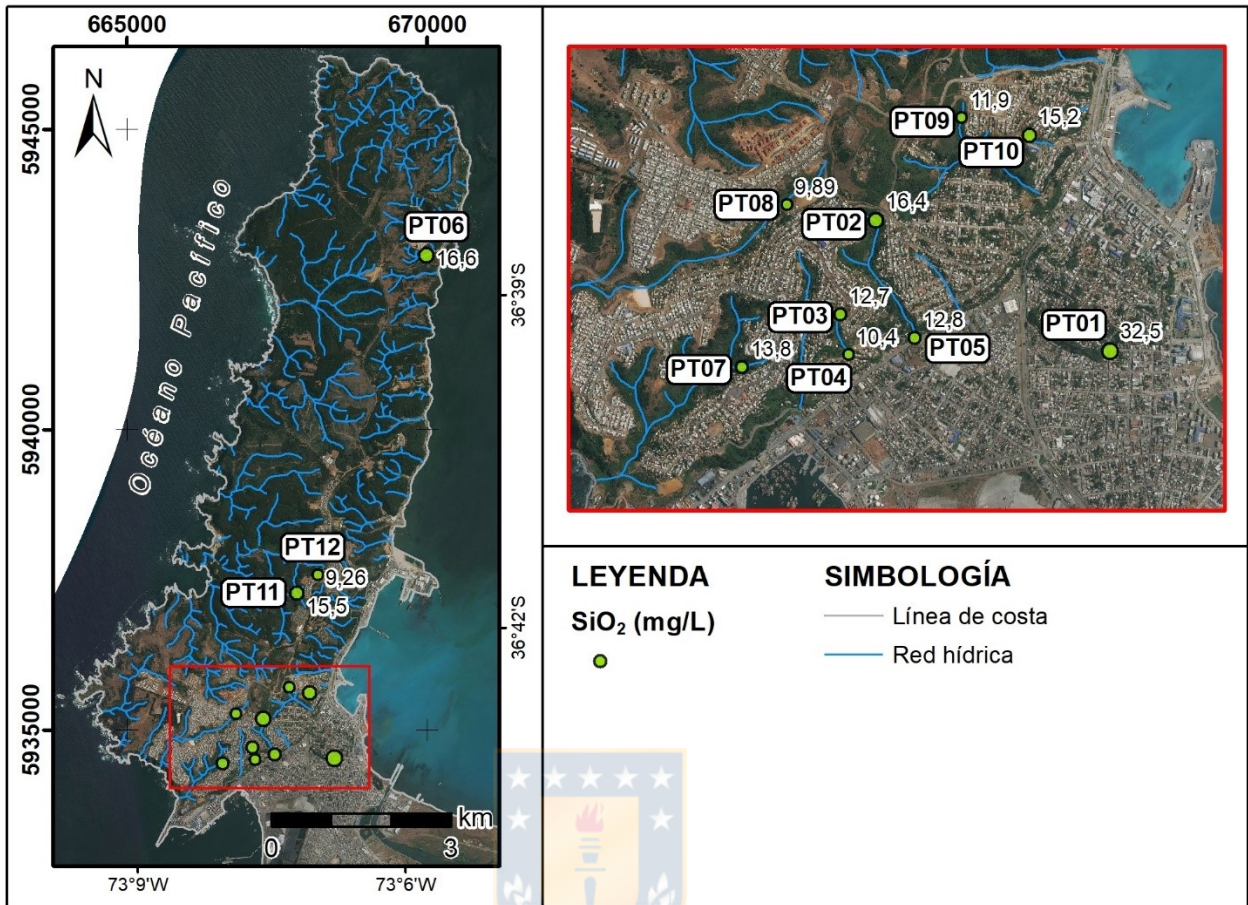


**Figura 10: Distribución espacial del bicarbonato (HCO<sub>3</sub>).** Las etiquetas indican los valores de concentración en mg/L. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.



**Figura 11: Distribución espacial del sulfato (SO<sub>4</sub>).** Las etiquetas indican los valores de concentración en mg/L. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.





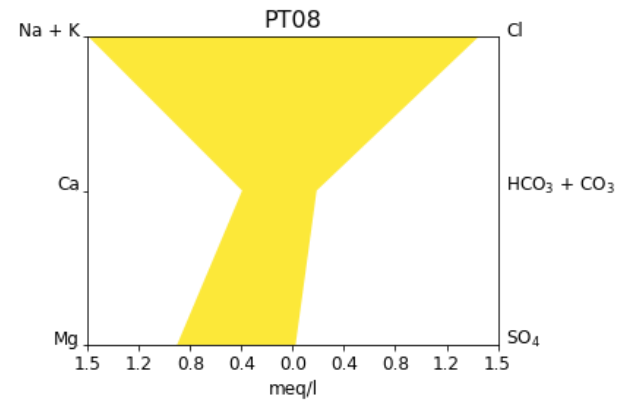
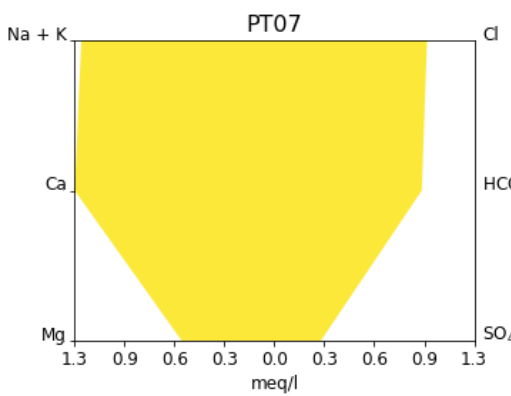
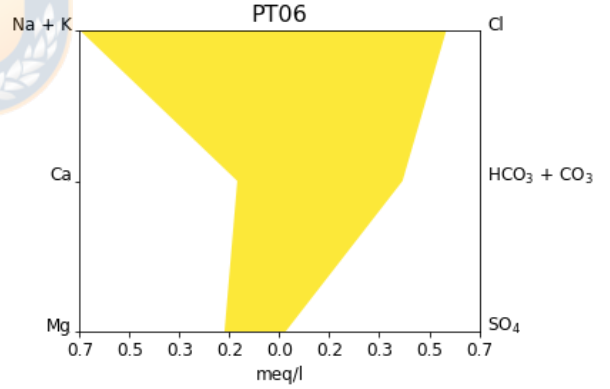
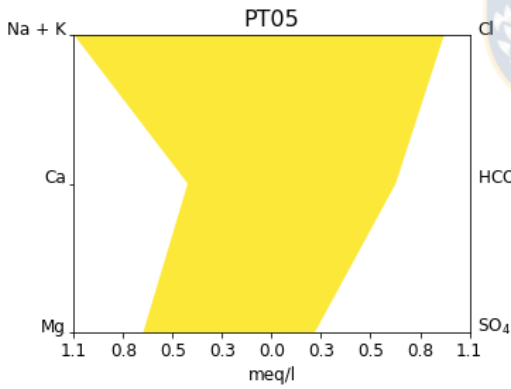
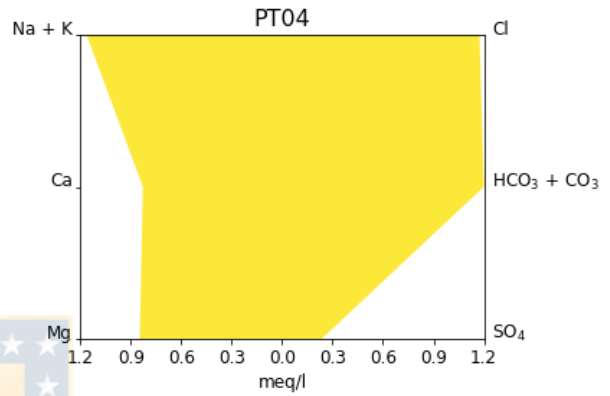
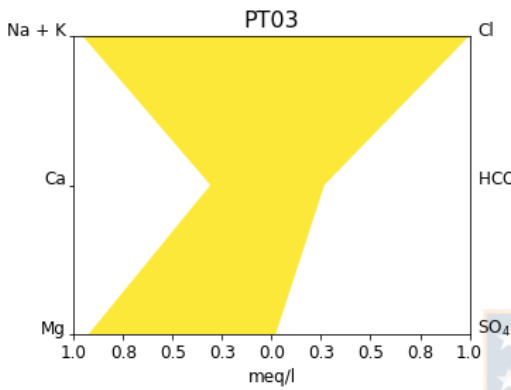
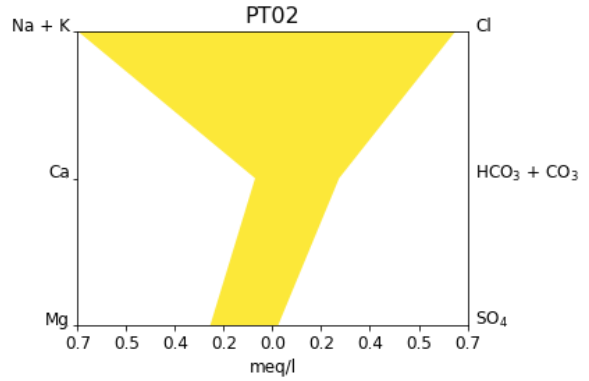
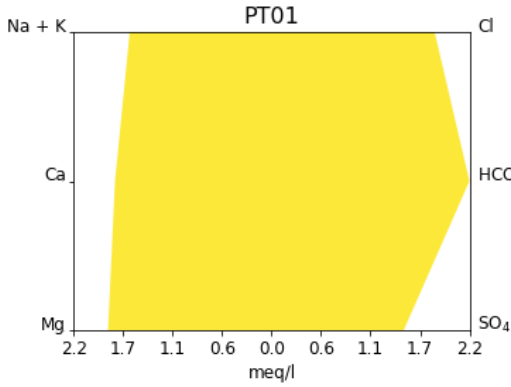
**Figura 12: Distribución espacial de la sílice (SiO<sub>2</sub>).** Las etiquetas indican los valores de concentración en mg/L. Cuadro rojo corresponde a acercamiento a la derecha.



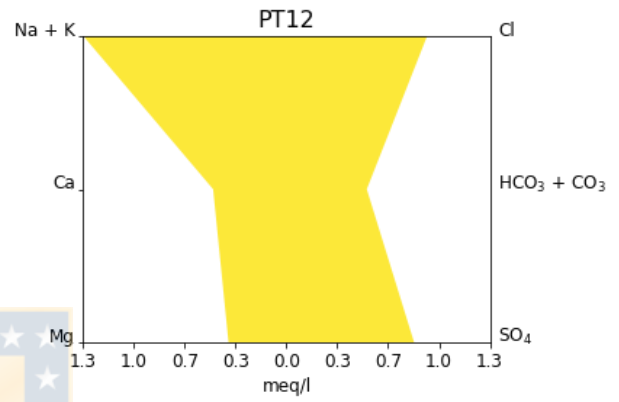
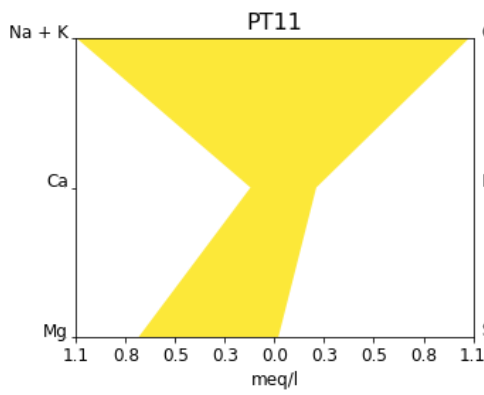
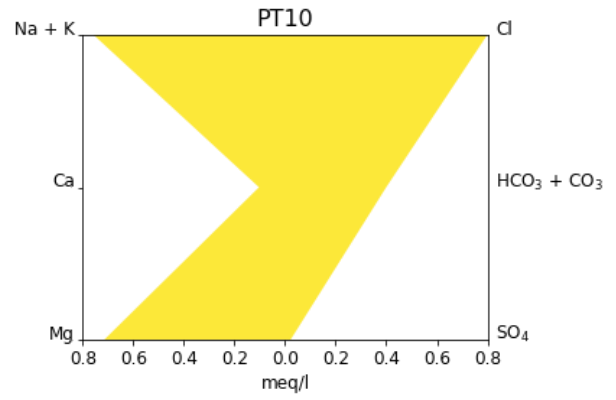
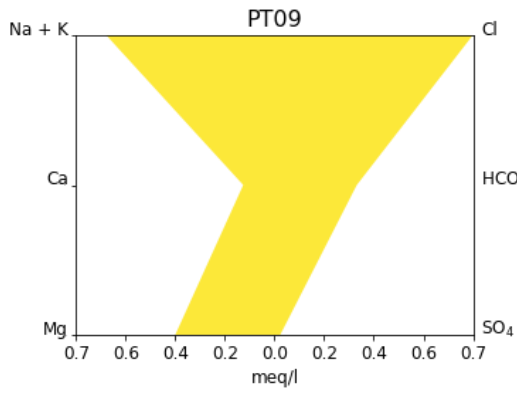
**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANEXOS**  
**III DIAGRAMAS DE STIFF**









**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANEXOS**

**IV MONITOREO DE CAUDALES EN VERTIENTES Y NIVEL FREÁTICO  
EN POZO**

**Tabla 1: Detalle de puntos de medición de caudal.** Coordenadas N y E en sistema de coordenadas WGS84 UTM 18S.

Código	Nombre de la vertiente	E (m)	N (m)	Latitud	Longitud	Cota (m)
C1	Estrella Azul	667842	5937264	36°41'44"S	73°7'16"W	97.7
C2	Pino Huacho	667802	5937904	36°41'23S	73°7'18W	63.7
C3	28 de Octubre Cerro Cornou	668050	5935607	36°42'37"S	73°7'7"W	61.3
C4	El Chilco	668140	5935572	36°42'38S	73°7'3W	38.0
C5	Los Cipreses	666821	5935257	36°42'49"S	73°7'56"W	103.3
C6	Baroa Bajo	667092	5934698	36°43'7"S	73°7'44"W	91.5
C7	San Juan Tumbes	669992	5942898	36°38'40"S	73°5'54"W	33.9

**Tabla 2: Caudal C1 (Vertiente Estrella Azul).**

Fecha	C (L/min)	C (m <sup>3</sup> /día)
27-08-2019	7.65	11.01
02-09-2019	6.68	9.61
06-09-2019	8.00	11.52
07-09-2019	7.78	11.20
10-09-2019	9.27	13.35
13-09-2019	9.16	13.19
16-09-2019	8.68	12.50
24-09-2019	7.83	11.28
29-09-2019	7.71	11.10
11-10-2019	5.88	8.47
21-10-2019	6.59	9.50
29-10-2019	5.98	8.61
31-10-2019	6.34	9.13
04-11-2019	6.27	9.03
10-11-2019	6.32	9.09
19-11-2019	6.41	9.23
27-11-2019	5.99	8.63
04-12-2019	5.59	8.06
17-12-2019	3.57	5.15
24-12-2019	5.54	7.98
26-12-2019	5.18	7.45
31-12-2019	4.87	7.01
07-01-2020	4.54	6.53
16-01-2020	4.70	6.76
21-01-2020	3.86	5.56
29-01-2020	3.44	4.95
04-02-2020	2.20	3.16
11-02-2020	2.70	3.89

18-02-2020	4.00	5.76
03-03-2020	3.70	5.33
11-03-2020	3.90	5.62
19-03-2020	3.67	5.28
25-03-2020	4.05	5.83
01-04-2020	4.07	5.86
15-04-2020	2.92	4.21
29-04-2020	2.85	4.10
14-05-2020	3.07	4.42
27-05-2020	3.07	4.42
13-06-2020	3.20	4.61
25-06-2020	3.90	5.62
15-07-2020	7.80	11.23
31-07-2020	7.73	11.14

**Tabla 3: Caudal C2 (Vertiente Pino Huacho).**

<b>Fecha</b>	<b>C (L/min)</b>	<b>C (m<sup>3</sup>/día)</b>
15-09-2019	29.55	42.55
24-09-2019	25.76	37.09
29-09-2019	26.19	37.71
11-10-2019	24.52	35.30
29-10-2019	29.52	42.50
04-11-2019	22.31	32.12
10-11-2019	18.74	26.98
19-11-2019	17.15	24.69
27-11-2019	16.52	23.79
04-12-2019	16.09	23.17
17-12-2019	15.26	21.98
24-12-2019	14.21	20.46
31-12-2019	13.26	19.09
07-01-2020	11.43	16.45
14-01-2020	13.17	18.97
21-01-2020	11.94	17.19
29-01-2020	9.81	14.13
04-02-2020	11.58	16.68
11-02-2020	12.50	18.00
18-02-2020	12.00	17.28
03-03-2020	12.55	18.07
11-03-2020	11.27	16.22
19-03-2020	10.65	15.34
25-03-2020	13.77	19.82

01-04-2020	10.17	14.64
15-04-2020	11.43	16.45
29-04-2020	13.30	19.15
14-05-2020	15.00	21.60
27-05-2020	14.40	20.74
13-06-2020	20.93	30.13
25-06-2020	38.67	55.68
15-07-2020	31.20	44.93
01-08-2020	27.70	39.89

**Tabla 4: Caudal C3 (Vertiente 28 de Octubre Cerro Cornou).**

<b>Fecha</b>	<b>C (L/min)</b>	<b>C (m<sup>3</sup>/día)</b>
12-04-2019	9.80	14.11
03-01-2020	9.42	13.57
17-01-2020	10.57	15.22
01-02-2020	10.42	15.00
14-02-2020	9.90	14.26
02-03-2020	9.75	14.04
20-03-2020	11.40	16.42
02-04-2020	10.40	14.98
16-04-2020	11.10	15.98
30-04-2020	10.07	14.50
14-05-2020	10.80	15.55
28-05-2020	9.20	13.25
13-06-2020	10.40	14.98
25-06-2020	15.33	22.08
15-07-2020	21.60	31.10
03-08-2020	22.80	32.83

**Tabla 5: Caudal C4 (Vertiente El Chilco).**

<b>Fecha</b>	<b>C (L/min)</b>	<b>C (m<sup>3</sup>/día)</b>
03-01-2020	10.94	15.75
17-01-2020	10.89	15.69
01-02-2020	11.15	16.06
14-02-2020	11.20	16.13
02-03-2020	10.93	15.74
20-03-2020	11.70	16.85
02-04-2020	11.27	16.22
16-04-2020	11.57	16.66
30-04-2020	11.33	16.32



14-05-2020	11.00	15.84
28-05-2020	10.87	15.65
13-06-2020	10.60	15.26
27-06-2020	11.80	16.99
15-07-2020	13.80	19.87
03-08-2020	13.20	19.01

**Tabla 6: Caudal C5 (Vertiente Los Cipreses).**

Fecha	C (L/min)	C (m <sup>3</sup> /día)
05-01-2020	1.17	1.68
17-01-2020	0.86	1.24
01-02-2020	0.75	1.08
01-02-2020	0.70	1.01
02-03-2020	0.90	1.30
20-03-2020	0.60	0.86
02-04-2020	1.00	1.44
16-04-2020	0.50	0.72
30-04-2020	0.60	0.86
14-05-2020	0.40	0.58
28-05-2020	0.80	1.15
11-06-2020	0.70	1.01
25-06-2020	1.90	2.74
15-07-2020	4.00	5.76
03-08-2020	3.80	5.47

**Tabla 7: Caudal C6 (Vertiente Baroa Bajo).**

Fecha	C (L/min)	C (m <sup>3</sup> /día)
05-01-2020	6.26	9.02
17-01-2020	6.31	9.08
01-02-2020	5.60	8.06
14-02-2020	5.60	8.06
02-03-2020	5.50	7.92
20-03-2020	5.40	7.78
02-04-2020	5.70	8.21
16-04-2020	4.80	6.91
30-04-2020	5.00	7.20
14-05-2020	5.20	7.49
28-05-2020	5.20	7.49
11-06-2020	5.30	7.63
25-06-2020	6.80	9.79

15-07-2020	7.60	10.94
03-08-2020	9.00	12.96

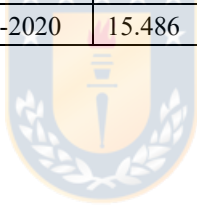
**Tabla 8: Caudal C7 (Vertiente San Juan Tumbes).**

Fecha	C (L/min)	C (m <sup>3</sup> /día)
03-01-2020	22.60	32.54
17-01-2020	20.01	28.82
01-02-2020	22.20	31.97
14-02-2020	18.98	27.32
02-03-2020	25.95	37.37
02-04-2020	27.20	39.17
16-04-2020	31.20	44.93
30-04-2020	34.00	48.96
14-05-2020	36.00	51.84
28-05-2020	36.00	51.84
13-06-2020	54.00	77.76
25-06-2020	99.94	143.91
15-07-2020	73.35	105.62
03-08-2020	79.41	114.35

**Tabla 9: Nivel estático en pozo.**

Fecha	Nivel estático (m)
07-09-2019	14.452
08-09-2019	14.450
10-09-2019	13.933
13-09-2019	14.325
24-09-2019	14.321
29-09-2019	14.361
11-10-2019	14.521
21-10-2019	14.763
29-10-2019	14.907
31-10-2019	14.947
04-11-2019	14.998
10-11-2019	15.162
19-11-2019	15.368
27-11-2019	15.556
04-12-2019	15.703
17-12-2019	15.977
24-12-2019	16.130
31-12-2019	16.271

07-01-2020	16.417
14-01-2020	16.549
21-01-2020	16.677
29-01-2020	16.822
04-02-2020	16.928
11-02-2020	17.046
18-02-2020	17.150
03-03-2020	17.376
11-03-2020	17.494
19-03-2020	17.599
25-03-2020	17.687
01-04-2020	17.794
15-04-2020	17.979
29-04-2020	18.101
14-05-2020	18.213
27-05-2020	18.284
13-06-2020	18.315
25-06-2020	17.369
15-07-2020	16.184
03-08-2020	15.486







**Figura 1: Fotografía referencial de vertiente C1 (Estrella Azul).**



**Figura 2: Fotografía referencial de vertiente C2 (Pino Huacho).**





**Figura 3: Fotografía referencial de vertiente C3 (Cerro Cornou).**





**Figura 4: Fotografía referencial de vertiente C4 (El Chilco).**





**Figura 5: Fotografía referencial de vertiente C5 (Los Cipreses).**





**Figura 6: Fotografía referencial de vertiente C6 (Baroa Bajo).**





**Figura 7: Fotografía referencial de vertiente C7 (San Juan Tumbes).**



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANEXOS**  
**V BALANCE HÍDRICO**



**Tabla 1: Número de curva (NC) según uso y tipo hidrológico de suelo.** Modificado de SCS (1986).

Uso de suelo	Grupo hidrológico de suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Pastizales	68	79	86	89
Matorral abierto	48	67	77	83
Matorral semiabierto	35	56	70	77
Matorral denso	30	48	65	73
Vegas de ríos	30	58	71	78
Bosques	45	66	77	83
Bosque mezclados con matorrales o árboles frutales	57	73	82	86
Áreas abiertas, césped, parques	49	69	79	84
Áreas comerciales con impermeabilización 85%	89	92	94	95
Distritos industriales	81	88	91	93
Residencial de impermeabilización 65% / 20%	77 / 51	85 / 68	90 / 79	92 / 84
Pavimentos, techos	98	98	98	98
Calles de Tierra / de grava	76 / 72	85 / 82	89 / 87	91 / 89



**Tabla 2: Estimación del umbral de escorrentía (Po).** Simplificado de Aqualogy Medioambiente (2013).

Uso de la tierra	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Rotación de cultivos pobres	>3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	< 3	R / N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	> 3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	< 3	R / N	47	25	16	13
Praderas	> 3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	70	33	18	13
		Muy buena	80	41	22	15
	< 3	Pobre	58	25	12	7
		Media	80	35	17	10
		Buena	12	55	22	14
		Muy buena	250	100	25	16
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	> 3	Pobre	62	26	15	10
		Media	80	34	19	14
		Buena	100	42	22	15
	< 3	Pobre	75	34	19	14
		Media	95	42	22	15
		Buena	120	50	25	16
		Muy clara	40	17	8	5
		-	-	-	-	-
Masas forestales (bosques, monte bajo...)	-	Clara	60	24	14	10
		Media	75	34	22	16
		Espesa	90	47	31	23
		Muy espesa	120	65	43	33
Barbecho	> 3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	< 3	R/ N	20	14	11	8
Cultivos en hilera	> 3	R	23	13	8	6
Rocas permeables	> 3	-	3			
Rocas impermeables	> 3		5			
	> 3		2			
			4			

**Tabla 3: Recarga mensual para el para península según usos de suelo actuales.** Valores obtenidos mediante planilla EASY BAL.

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1967	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.89	12.80	9.15	19.93	0.50	0.00	0.00
1968	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.07	20.07	14.30	12.84	9.82	0.00	0.00
1969	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	6.69	5.49	5.32	18.44	7.51	0.00	0.00
1970	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.71	9.89	9.97	19.73	0.00	0.00	0.00
1971	0.00	0.00	0.00	0.00	11.64	11.88	2.85	4.59	18.14	0.00	0.00	0.00
1972	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.36	11.83	1.39	17.53	8.46	0.00	0.00
1973	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.88	12.08	7.35	0.53	4.23	0.00	0.00
1974	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.73	11.22	4.59	19.68	0.00	0.00	0.00
1975	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.20	7.52	8.47	4.90	6.37	0.00	0.00
1976	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.16	12.51	3.74	17.27	0.11	0.00	0.00
1977	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	7.98	1.25	15.61	0.00	0.00	0.00
1978	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.28	20.78	6.65	15.84	5.13	0.00	0.00
1979	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.31	9.32	20.47	21.89	0.00	0.00	0.00
1980	0.00	0.00	0.00	0.00	9.31	8.49	8.35	20.42	20.71	0.00	0.00	0.00
1981	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.92	4.36	2.04	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.71	4.17	0.77	11.51	2.93	0.00	0.00
1983	0.00	0.00	0.00	0.00	7.75	15.97	13.06	2.82	17.35	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21	17.50	8.27	6.24	13.68	1.37	0.00	0.00
1985	0.00	0.00	0.00	0.00	14.57	21.34	9.01	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00
1986	0.00	0.00	0.00	0.00	4.77	6.21	6.91	0.59	17.25	0.00	0.00	0.00
1987	0.00	0.00	0.00	0.00	1.64	7.00	2.88	2.57	19.98	0.00	0.00	0.00
1988	0.00	0.00	0.00	0.00	3.09	7.85	10.95	4.57	19.91	0.00	0.00	0.00
1989	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.39	7.42	4.82	0.00	0.00	0.00	0.00
1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.13	8.61	21.82	14.10	0.00	0.00	0.00
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	8.90	7.35	6.78	15.96	5.38	0.00	0.00
1992	0.00	0.00	0.00	0.00	6.47	11.04	12.84	3.08	17.09	1.31	0.00	0.00
1993	0.00	0.00	0.00	0.00	6.87	3.58	11.76	5.49	0.00	0.00	0.00	0.00
1994	0.00	0.00	0.00	0.00	4.98	2.16	6.60	0.00	5.24	0.00	0.00	0.00
1995	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.13	14.24	6.75	0.00	0.00	0.00	0.00
1996	0.00	0.00	0.00	0.00	8.58	16.77	5.55	21.03	0.00	0.00	0.00	0.00
1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.75	6.69	1.93	14.57	3.66	0.00	0.00
1998	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.92	10.15	5.74	16.33	0.00	0.00	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.55	11.83	20.69	14.02	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.89	11.91	21.87	19.38	0.00	0.00	0.00
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.44	6.95	2.23	6.75	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	0.00	0.00	10.75	13.96	9.95	0.84	16.38	1.12	0.00	0.00
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	2.71	0.02	12.44	3.67	18.33	0.00	0.00	0.00
2004	0.00	0.00	0.00	0.00	5.24	7.41	5.77	2.51	17.61	3.83	0.00	0.00

2005	0.00	0.00	0.00	0.00	2.05	7.37	6.20	1.93	18.72	0.00	0.00	0.00
2006	0.00	0.00	0.00	0.00	13.01	1.17	4.63	21.64	0.00	0.41	0.00	0.00
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	9.92	13.75	11.11	13.23	16.60	0.00	0.00	0.00
2008	0.00	0.00	0.00	0.00	4.88	9.79	4.45	5.76	16.60	0.00	0.00	0.00
2009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.91	10.86	21.72	10.43	0.00	0.00	0.00
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.40	10.21	2.71	0.00	0.00	0.00	0.00
2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.41	12.10	3.28	16.17	0.00	0.00	0.00
2012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.79	18.95	5.49	0.00	0.00	0.00	0.00
2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.06	9.27	6.31	6.34	0.00	0.00	0.00
2014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.41	7.27	21.89	14.74	0.00	0.00	0.00
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.74	7.14	22.28	18.09	0.00	0.00	0.00
2016	0.00	0.00	0.00	0.00	1.46	0.00	19.59	20.07	0.00	0.00	0.00	0.00
2017	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	8.48	10.67	6.31	21.26	3.06	0.00	0.00
2018	0.00	0.00	0.00	0.00	8.67	13.12	9.98	18.60	15.21	3.78	0.00	0.00
2019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.15	4.42	3.15	19.47	0.00	0.00	0.00

**Tabla 4: Recarga mensual para la península según usos de suelo teóricos con zonas de extensión urbana utilizadas. Valores obtenidos mediante planilla EASY BAL.**

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1967	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.34	8.53	4.87	15.66	0.00	0.00	0.00
1968	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	16.57	17.80	8.57	5.54	0.00	0.00
1969	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.65	1.21	1.04	14.16	3.24	0.00	0.00
1970	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.66	5.61	5.69	15.46	0.00	0.00	0.00
1971	0.00	0.00	0.00	0.00	3.09	7.60	21.07	0.32	13.93	0.00	0.00	0.00
1972	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.81	7.56	19.62	13.26	4.18	0.00	0.00
1973	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.83	7.80	3.07	0.53	0.00	0.00	0.00
1974	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.68	6.95	0.59	15.40	0.00	0.00	0.00
1975	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.79	3.24	4.19	4.90	2.10	0.00	0.00
1976	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.11	8.23	21.96	12.99	0.00	0.00	0.00
1977	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.94	3.70	19.47	11.33	0.00	0.00	0.00
1978	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.23	16.50	2.37	11.56	0.86	0.00	0.00
1979	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.26	5.05	16.20	17.62	0.00	0.00	0.00
1980	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	4.22	4.07	16.15	16.44	0.00	0.00	0.00
1981	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.37	0.09	20.27	3.26	0.00	0.00	0.00
1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.66	22.39	19.00	7.23	0.00	0.00	0.00
1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.90	8.79	21.05	17.35	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.17	3.99	1.97	9.41	0.00	0.00	0.00
1985	0.00	0.00	0.00	0.00	6.02	17.07	4.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.65	2.63	18.82	12.97	0.00	0.00	0.00
1987	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	21.11	20.79	15.70	0.00	0.00	0.00
1988	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.39	6.68	0.30	15.64	0.00	0.00	0.00
1989	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	3.15	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00

1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	4.34	17.55	9.83	0.00	0.00	0.00
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.94	3.07	2.51	11.75	1.11	0.00	0.00
1992	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.69	8.56	21.31	12.81	3.01	0.00	0.00
1993	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.13	7.49	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00
1994	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.81	2.33	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00
1995	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.93	9.97	2.47	0.00	0.00	0.00	0.00
1996	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	12.50	1.27	16.76	0.00	0.00	0.00	0.00
1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.20	2.42	20.16	10.30	0.00	0.00	0.00
1998	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.37	5.88	1.47	16.33	0.00	0.00	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.50	7.55	16.41	9.74	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.34	7.63	17.59	15.11	0.00	0.00	0.00
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.39	2.68	20.46	6.75	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	0.00	0.00	2.20	9.69	5.68	19.07	12.10	0.00	0.00	0.00
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.68	8.17	21.90	14.05	0.00	0.00	0.00
2004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.45	1.50	20.74	13.34	0.00	0.00	0.00
2005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	1.93	20.16	14.44	0.00	0.00	0.00
2006	0.00	0.00	0.00	0.00	4.46	19.40	0.35	17.36	0.00	0.00	0.00	0.00
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	1.37	9.47	6.84	8.95	16.40	0.00	0.00	0.00
2008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	5.52	0.17	1.49	12.32	0.00	0.00	0.00
2009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.86	6.59	17.45	10.43	0.00	0.00	0.00
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	5.94	20.94	0.00	0.00	0.00	0.00
2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	7.83	21.51	11.89	0.00	0.00	0.00
2012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.25	18.95	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00
2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.01	5.00	2.04	6.34	0.00	0.00	0.00
2014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.36	2.99	17.61	10.46	0.00	0.00	0.00
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.46	2.87	18.00	13.82	0.00	0.00	0.00
2016	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.23	18.87	0.00	0.00	0.00	0.00
2017	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	6.40	2.04	16.99	0.45	0.00	0.00
2018	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	8.85	5.71	18.60	10.94	0.00	0.00	0.00
2019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.10	0.15	21.38	15.20	0.00	0.00	0.00





**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANEXOS**  
**VI ESTACIÓN CARRIEL SUR**

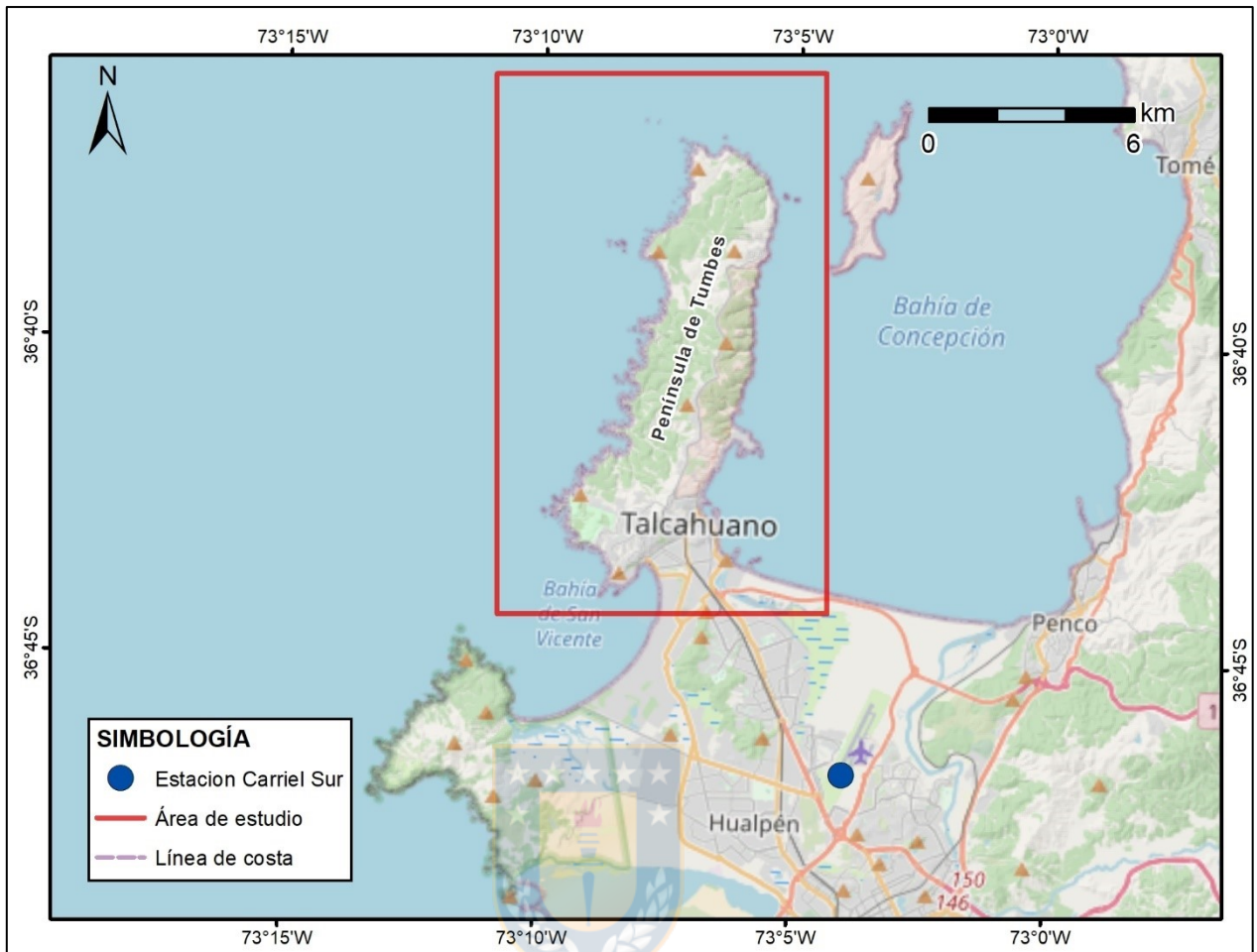


Figura 1: Mapa de ubicación de la estación Carriel Sur.

**Tabla 1: Precipitaciones mensuales acumuladas (mm) para el período 1957 - 2019.** Datos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile (2020).

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1967	29.9	38.6	14.1	15.7	419.7	195.8	236.4	204.5	85.2	75.1	19.9	18.7
1968	16.0	31.4	20.3	79.7	33.9	292.8	51.0	51.3	148.9	69.4	44.1	99.5
1969	0.0	23.7	9.8	123.0	247.0	337.3	312.4	274.3	112.3	100.8	55.1	0.0
1970	19.2	4.4	17.7	50.3	199.6	310.7	234.8	124.8	103.4	48.5	24.2	37.9
1971	12.4	34.1	8.6	64.5	230.8	286.7	320.7	188.0	62.4	33.7	4.7	56.6
1972	57.7	1.2	64.4	23.7	426.3	213.3	174.5	187.9	132.7	155.2	18.2	7.2
1973	5.5	1.1	10.9	32.2	155.9	231.5	153.0	74.2	37.8	161.0	0.0	23.5
1974	27.2	2.1	10.3	0.0	136.1	480.9	123.8	62.2	76.6	31.3	48.0	12.0
1975	3.9	41.4	7.5	114.4	278.8	274.0	258.0	96.2	46.5	82.8	41.8	10.4
1976	12.0	9.7	22.9	0.0	94.0	226.0	73.1	122.6	68.0	149.5	45.6	46.1
1977	43.7	0.0	35.5	44.6	205.0	297.1	431.4	147.9	77.7	166.5	127.5	6.5
1978	2.5	16.7	0.0	2.6	169.9	158.4	508.2	100.9	154.7	98.0	93.7	0.0
1979	41.7	0.9	3.3	52.6	158.1	124.0	238.6	261.6	163.3	18.7	52.8	69.1
1980	1.0	61.6	12.5	174.8	368.2	264.7	199.6	102.2	81.6	0.6	17.7	57.0
1981	78.1	7.9	34.5	98.7	501.0	93.9	195.5	104.4	39.4	27.1	3.4	2.6
1982	83.7	24.3	4.4	24.7	211.7	350.1	225.4	130.4	172.5	86.9	33.7	0.0
1983	24.3	6.7	20.0	67.8	115.9	225.6	204.2	126.1	57.3	24.9	0.0	28.1
1984	7.9	33.0	14.9	24.1	389.9	205.9	231.1	75.6	112.1	163.7	10.4	0.1
1985	45.1	1.2	19.1	80.3	185.1	167.2	211.4	26.2	92.0	67.0	44.2	0.5
1986	6.1	10.0	47.2	142.0	259.2	223.9	85.7	180.0	69.0	27.5	207.5	6.5
1987	0.0	4.0	58.7	55.1	137.1	113.3	436.0	207.1	127.6	37.3	20.3	1.4
1988	8.5	0.0	10.7	24.6	81.4	210.5	287.1	222.7	90.3	26.2	18.6	15.0
1989	3.3	3.3	28.3	2.5	36.8	259.8	225.8	176.0	35.4	33.3	4.9	88.2
1990	6.4	32.7	126.8	50.4	97.3	104.5	98.1	134.6	114.8	50.7	27.2	4.5
1991	8.7	3.1	9.0	115.5	267.3	142.8	234.2	87.7	62.4	64.0	50.6	97.1
1992	0.0	17.7	48.2	112.7	449.7	293.5	100.5	166.0	122.9	56.5	15.3	71.9
1993	2.7	0.0	17.4	96.7	283.1	309.0	210.1	99.5	21.0	45.4	40.0	21.3
1994	0.6	1.5	9.0	123.8	71.9	202.6	177.1	21.9	139.0	44.6	17.7	34.6
1995	4.1	0.1	14.4	139.2	57.0	219.1	252.9	197.3	9.9	55.6	3.3	0.0
1996	0.0	12.3	12.8	65.4	66.2	151.5	77.9	173.2	6.7	25.1	19.1	20.6
1997	23.2	25.9	0.3	239.3	218.7	360.4	231.6	127.5	82.7	162.4	89.4	3.6
1998	0.0	0.0	8.7	33.9	149.6	141.9	78.0	94.7	57.6	0.1	29.8	4.3
1999	13.2	16.8	20.8	21.1	198.8	273.0	148.6	213.9	155.8	15.5	1.8	11.9
2000	2.0	94.9	6.1	46.2	58.8	565.7	81.1	218.5	257.5	33.0	27.4	15.2
2001	58.2	7.2	44.3	40.0	293.7	235.8	375.5	195.4	49.6	24.4	34.5	0.0
2002	1.2	66.8	90.7	84.6	180.9	114.4	158.2	300.7	116.5	182.3	51.5	15.4
2003	9.0	0.0	9.2	18.6	73.1	309.5	109.8	64.4	129.6	60.8	76.7	11.0
2004	0.1	13.8	49.2	127.0	64.0	255.0	205.9	145.6	73.6	126.4	47.1	19.2

<b>2005</b>	1.0	0.4	22.8	9.4	357.5	431.9	165.8	177.7	74.4	28.6	48.6	64.8
<b>2006</b>	29.4	1.8	10.2	120.8	107.4	309.6	312.3	235.8	41.3	90.0	3.0	53.9
<b>2007</b>	24.4	36.6	9.0	132.8	73.0	89.2	175.9	118.8	58.4	31.7	4.0	25.6
<b>2008</b>	3.6	2.4	3.8	53.2	323.0	95.6	290.4	237.8	80.0	30.2	11.6	5.4
<b>2009</b>	8.4	10.9	6.8	14.2	133.2	280.3	118.2	215.4	51.4	52.0	43.8	0.6
<b>2010</b>	18.8	27.4	5.8	7.2	37.2	186.0	248.2	133.2	21.2	43.4	17.2	14.6
<b>2011</b>	20.2	6.4	33.0	82.2	31.6	143.8	124.0	190.2	71.4	30.0	27.6	2.0
<b>2012</b>	15.4	37.6	9.2	3.8	131.6	206.8	51.0	130.6	15.0	37.4	33.8	70.2
<b>2013</b>	2.0	23.0	2.4	10.0	195.8	102.0	79.8	103.4	45.4	25.0	11.0	0.0
<b>2014</b>	7.2	4.0	66.8	66.6	114.2	266.4	223.8	108.4	98.4	12.6	3.2	9.2
<b>2015</b>	0.0	2.0	1.2	27.8	56.4	107.0	165.0	177.0	115.2	42.2	17.2	4.4
<b>2016</b>	1.8	0.0	14.2	67.2	117.6	3.4	189.4	54.0	49.8	71.8	14.4	32.4
<b>2017</b>	7.6	13.6	31.8	71.6	96.2	156.8	90.2	277.4	72.0	75.8	29.2	7.6
<b>2018</b>	13.4	5.0	59.2	74.6	146.8	87.1	106.2	55.6	129.4	63.8	31.8	8.4
<b>2019</b>	9.2	0.2	8.4	4.2	135.4	251.2	105.4	65.0	79.4	43.8	13.4	0.0

**Tabla 2: Temperaturas mensuales promedio (°C) para el período 1957 - 2019.** Datos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile (2020).

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1967	16.9	16.1	14.8	12.9	12.1	7.1	8.1	8.4	10.1	12.2	14.3	16.4
1968	16.9	16.7	14.8	12.2	11.7	10.4	9.1	9.8	11.5	11	14.3	15.4
1969	16.9	15.9	14.9	13.3	11.5	10.1	9.9	9.4	10.6	11.4	14	16.8
1970	17.6	17.5	15.7	14.2	11.5	9.4	9.1	8.6	10.5	12	14.4	15.8
1971	16.3	15.6	14.1	11.7	11.2	8.8	10.3	9.4	10.5	12.9	15.4	16
1972	17.7	17.3	14.5	13.2	12.1	10.9	8.8	10.4	11	11.5	14.3	17.2
1973	17.3	16.6	14.9	12.8	10.6	9.5	8.1	8.6	9	11.5	13.2	14.8
1974	16.1	14.9	14.1	11.6	11.7	9.2	8.1	8.9	9.8	11.8	12.8	15.2
1975	16.5	16.1	14.9	13.6	11.2	10.4	9.2	8.5	9.9	11.3	13.1	15
1976	15.7	15.8	13.7	11.6	11.1	9.3	8	9.3	10.4	12.1	14	16.3
1977	17.3	16.4	14.3	12.8	12	10.5	9.6	10.4	11.3	13.1	14.2	16.9
1978	17.2	16.6	15.3	13.3	12	10.3	11.7	9.5	11.4	12.1	15	16.9
1979	17.1	17	15.1	12.2	11.4	8.6	9	10.7	9.9	11.5	13.9	16.2
1980	17.5	17.4	16.2	12	11.8	9.8	9.4	10.9	10.3	11.8	13.1	16
1981	16.6	16.2	14.8	14.4	13	10	10.2	10.1	10.6	11.8	13.5	15.1
1982	16.8	15.9	14.9	13.2	12.3	9.8	10.3	10.4	11.9	12.2	13.2	16.5
1983	17.6	16.7	14.7	13.1	10.5	7.9	8.2	9.8	9.8	12.8	14.7	16.5
1984	17.2	15.8	15	12.5	10.3	7.3	9	8.9	11.1	12	13.8	15.5
1985	16.6	16.7	14.7	11.7	11	11.8	9.2	10	12.3	12	14.2	15.5
1986	16.4	16.2	14.3	12.6	11.8	10.2	9.6	10.3	10.8	13.7	13.5	15.6
1987	16.3	17.1	16.5	13.4	10.8	10.3	10.7	10.2	10.6	12.9	14.9	15.9
1988	16	16.6	15.4	13.3	10	9.6	8.5	9.3	10.1	11.6	14.1	15.5

1989	17.3	16.8	14.2	12.7	10.5	10.6	9.5	9.5	10.5	12.1	14.4	16.5
1990	16.8	16.1	14.2	12.7	10.8	9.1	9	10.3	11.1	11.6	13.4	15.3
1991	17.2	17.1	15.5	13.6	11.7	9.7	9.6	9.2	11.1	11.8	14	15.6
1992	18.1	16.8	16.5	12.8	11.4	9.2	8.4	9.9	10.9	11.5	14.2	15.6
1993	17.1	17.5	16.5	13.2	11	10.9	8.7	9.5	10.4	12.2	14.2	15.5
1994	16.6	15.7	15.4	12.9	11.7	11.2	9.8	8.6	11.6	13	14.2	16.5
1995	16.8	16.2	14.4	13.9	11.6	10.2	8	9.1	10.5	12.3	14.1	16.9
1996	16.9	16.4	16	12.7	11.4	8	10.1	10.9	11.5	12.9	15	16.5
1997	18.2	16.2	15	14.7	13.2	10.6	10.1	10.5	11.7	12.4	14.4	16
1998	17	16.4	15.4	12.9	13.4	10.2	9	9.4	10.2	12.6	13.6	16
1999	16.5	16.2	14.6	12.7	11.3	9.5	8.6	10.8	11.4	13	15.1	15.9
2000	16.5	16.4	14.1	12.3	11.2	11	8.4	10.4	10.3	12.3	13.7	15.8
2001	16.1	16.2	14.3	11.6	10.9	9.7	9.3	9.7	10.1	12.2	13.4	16
2002	16.3	15.3	14.6	11.9	10.5	8	8.5	9.8	10.5	11.9	13.6	15.4
2003	17.4	16.1	15.5	12.2	10.3	11.5	8.4	9.7	10.6	12.5	14.8	15.2
2004	16.9	16.1	15.7	13.6	10.7	10	9.9	10	10.8	12	14	16.1
2005	16.5	17	15.6	12.2	10.4	9.9	9.7	10	10.5	11.9	14.5	15.5
2006	16.7	17.1	14.7	12.3	10.6	11.3	10.1	10.6	10.7	12	13.8	15.5
2007	16.4	15.9	15.4	12.3	9.9	7.9	8.1	7.2	9.6	11.8	13.3	15
2008	17.2	17.3	15.7	12.4	10.6	9.6	10.3	9.5	11.1	12.3	14.9	16.8
2009	16.8	16.3	15.7	14.1	11.4	9.3	8.6	10.4	9.9	11.7	12.3	15.1
2010	16.7	15.6	15.8	12.3	10	10.3	8.6	9.6	10.1	11.9	13.7	14.6
2011	16.7	15.7	14.8	12.8	10.6	10.4	8.3	9.6	10.8	11.7	14	15.8
2012	17.6	16.9	16.3	12.6	11.9	10.8	8	9.5	11.1	12	14.2	15.8
2013	16.8	17.2	14.8	13.5	11.7	9.7	9.1	9.2	10.6	11.9	14	15.9
2014	17.6	16.2	14.8	12.4	11.8	10.1	9.7	10.7	11.4	13.5	14	15.8
2015	17	16.4	16.9	14.2	11.5	10.7	9.9	10.8	11	12.5	14	16.1
2016	18.3	17.5	15.5	12.8	13.2	9.1	9.7	10.8	12.4	12.9	15.1	16.3
2017	18.6	17.5	15.6	14.2	10.9	9.9	9	9.4	10.3	12	14.3	15.8
2018	16.9	16.8	15.1	12.2	11.4	8.6	8.9	9.8	11.1	11.9	14.6	16.1
2019	16.4	17.1	14.8	13.1	11.8	10.4	10.3	10	10.6	12.2	15	16.4



**Tabla 3: Precipitaciones acumuladas por mes para el período de monitoreo. \*Incluye solo los días anteriores a la última medición.**

<b>Fecha</b>	<b>Precipitación acumulada (mm)</b>
<b>09-2019</b>	79.40
<b>10-2019</b>	43.80
<b>11-2019</b>	13.40
<b>12-2019</b>	0.00
<b>01-2020</b>	10.60
<b>02-2020</b>	4.20
<b>03-2020</b>	42.40
<b>04-2020</b>	53.60
<b>05-2020</b>	58.00
<b>06-2020</b>	344.80
<b>07-2020</b>	157.00
<b>08-2020*</b>	23.00





**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANEXOS**  
**VII DATOS DE SONDAJES (MINVU)**

SONDAJE N°  
 PROFUNDIDAD NAPA DE AGUA (m)  
 FECHA DE OBSERVACIÓN

1  
 No observada  
 Julio de 1999

OBSERVACIONES:

Cota Boca de Sonda = 94.914

HORIZONTE N°	PROFUNDIDADES LIMITES (m)		ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
	DESDE	HASTA		
1	0.00	2.80	2.80	Suelo fino, plástico, mezclas de arcillas, limos y arena, provenientes de la descomposición in situ de la roca metamórfica, localmente conocida como "Piedra Laja o Pizarra". Estrato de regular consistencia, color amarillo - rojizo.
2	2.80	5.25	Indefinido	Roca metamórfica (Pizarra), tenaz, con tendencia a partirse en el plano de foliación. Presenta buenas características como suelo de fundación

Sondaje N°		1							
Muestra N°		1	2	3	4	5	6	7	8
Horizonte N°		1	1	1	1	2	2 <sup>1</sup>	2	2
Profundidades (m)		0.45	0.95	1.45	2.35	2.80	3.50	4.25	5.10
		0.90	1.40	1.90	2.80	3.25	3.95	4.70	5.25
Granulometría. (% que pasa en peso)									
Tamiz	2 1/2"								
Tamiz	2"								
Tamiz	1 1/2"								
Tamiz	1"			100.0					
Tamiz	3/4"	100.0	100.0	77.2		100.0	100.0		100.0
Tamiz	3/8"	94.8	95.6	70.2	100.0	71.2	70.9	100.0	74.1
Malla	N° 4	87.1	86.5	61.6	91.9	60.1	57.6	71.2	60.6
Malla	N° 8	83.2	80.1	53.4	81.4	50.1	50.8	60.2	51.9
Malla	N° 30	68.3	66.1	39.6	66.6	40.2	39.1	48.1	41.0
Malla	N° 40	64.8	60.1	37.8	63.9	36.1	36.0	40.1	37.4
Malla	N°200	51.0	52.8	29.7	56.4	30.1	28.5	32.8	29.5
<u>Límites de Atterberg.</u>									
Límite Líquido (%)		44.0	47.1	50.5	40.7	51.5	50.1	53.4	50.9
Límite Plástico (%)		28.1	29.0	41.9	29.9	46.7	46.0	42.8	41.9
Ind. De Plasticidad (%)		15.9	18.1	8.6	10.8	4.8	4.1	10.6	9.0
Peso Específico (Kg/dm <sup>3</sup> )		2.70	2.70	2.80	2.71	2.80	2.78	2.80	2.78
Humedad Natural (%)		19.2	14.2	25.3	17.1	20.1	13.6	21.2	19.8
Clasificación U.S.C.S.		ML	ML	SC	ML	SM-SC	SMS-C	SC	SC

SONDAJE N° 2  
 PROFUNDIDAD NAPA DE AGUA (m) No observado  
 FECHA DE OBSERVACIÓN Julio de 1999  
 OBSERVACIONES: Cota Boca de Sonda = 48.214


HORIZONTE N°	PROFUNDIDADES LIMITES (m)		ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
	DESDE	HASTA		
1	0.00	3.50	3.50	Mezclas de limos, arcillas y arena, producidas por la descomposición de la roca metamórfica "Pizarra" en sitio.  Este estrato presenta buena consistencia como suelo de fundación. Color amarillo - rojizo
2	3.50	7.25	Indefinido	Roca metamórfica, conocida como "Piedra laja ó Pizarra", buena tenacidad, algo débil en los planos de foliación. Color gris a amarillo.

Sondaje N° 2									
Muestra N°		1	2	3	4	5	6	7	8
Horizonte N°		1	1	1	1	1	1	2	2
Profundidades (m)		0.40 0.85	0.90 1.35	1.45 1.90	2.10 2.55	2.70 3.15	3.50 3.95	4.30 4.75	5.20 5.65
Granulometría, (% que pasa en peso)									
Tamiz	2 1/2"								
Tamiz	2"								
Tamiz	1 1/2"								
Tamiz	1"		100.0	100.0					
Tamiz	3/4"		78.1	80.1	100.0				100.0
Tamiz	3/8"	100.0	74.0	72.2	95.6	100.0	100.0	100.0	98.6
Malla	N° 4	98.6	62.6	66.5	86.5	97.5	91.4	80.2	90.7
Malla	N° 8	90.5	55.1	50.5	83.2	90.4	81.3	76.2	84.5
Malla	N° 30	68.6	40.6	41.7	66.5	66.5	60.4	61.1	66.5
Malla	N° 40	64.2	36.8	37.1	60.2	62.4	57.3	50.4	60.1
Malla	N°200	57.4	30.1	33.4	52.3	53.5	52.1	47.1	47.5
<u>Límites de Atterberg.</u>									
Límite Líquido (%)		48.5	52.6	51.6	42.3	48.0	41.7	42.4	45.6
Límite Plástico (%)		39.2	42.9	41.6	29.2	39.8	30.9	31.4	29.9
Ind. De Plasticidad (%)		9.3	9.7	10.0	13.1	8.2	10.8	11.0	15.7
Peso Específico (Kg/dm <sup>3</sup> )		2.76	2.69	2.80	2.71	2.80	2.71	2.82	2.69
Humedad Natural (%)		24.9	36.8	23.7	26.2	25.2	17.4	18.2	19.1
Clasificación U S C S		ML	SC	SC	ML	ML	ML	SC	SC

SONDAJE N° 3  
 PROFUNDIDAD NAPA DE AGUA (m) No observada  
 FECHA DE OBSERVACIÓN Julio de 1999

OBSERVACIONES: Cota Boca de Sonda = 36.736

HORIZONTE N°	PROFUNDIDADES LIMITES (m)		ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
	DESDE	HASTA		
1	0.00	5.80	5.80	Mezclas de limos, arcillas y arenas provenientes de la descomposición de la roca metamórfica. Estrato de regular consistencia.  Este sondaje esta ubicado en zona de deslizamiento con un talud muy empinado.
2	5.80	7.55	Indefinido	Roca metamórfica (Pizarra o Piedra Laja) tenaz y buena como suelo de fundación, sin embargo en su plano de foliación es muy débil.

Sondaje N° 3										
Muestra N°		1	2	3	4	5	6	7	8	
Horizonte N°		1	1	1	1	1	1	1	2	
Profundidades (m)		0.65	1.20	1.75	2.25	2.80	3.35	4.00	4.85	
		1.10	1.65	2.20	2.70	3.25	3.80	4.45	5.30	
										
Granulometría. (% que pasa en peso)										
Tamiz 2 1/2"										100.0
Tamiz 2"										76.2
Tamiz 1 1/2"										69.1
Tamiz 1"										61.0
Tamiz 3/4"										53.5
Tamiz 3/8"		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	38.4
Malla N° 4		92.5	92.4	93.6	85.1	85.1	85.1	85.1	85.1	36.0
Malla N° 8		82.4	80.1	85.1	80.4	82.0	87.4	82.4	82.4	20.9
Malla N° 30		65.6	65.0	57.8	64.5	86.7	87.4	82.4	82.4	
Malla N° 40		64.0	59.5	55.4	60.1	85.8	81.0	75.5	75.5	
Malla N° 200		50.1	52.4	50.8	53.4	48.2	73.5	70.9	70.9	
<u>Límites de Atterberg.</u>										
Límite Líquido (%)		41.2	42.0	39.8	45.2	57.0	55.2	53.1	51.4	
Límite Plástico (%)		30.1	30.8	30.4	29.1	25.0	28.0	24.1	40.9	
Ind. De Plasticidad (%)		11.1	11.2	9.4	16.1	31.0	27.2	29.0	10.5	
Peso Especifico (Kg/dm <sup>3</sup> )		2.71	2.71	2.71	2.69	2.58	2.58	2.58	2.80	
Humedad Natural (%)		23.7	16.6	20.2	25.5	40.9	40.5	28.2	28.1	
Clasificación U.S.C.S		ML	ML	ML	ML	SC	CH	CH	SC	



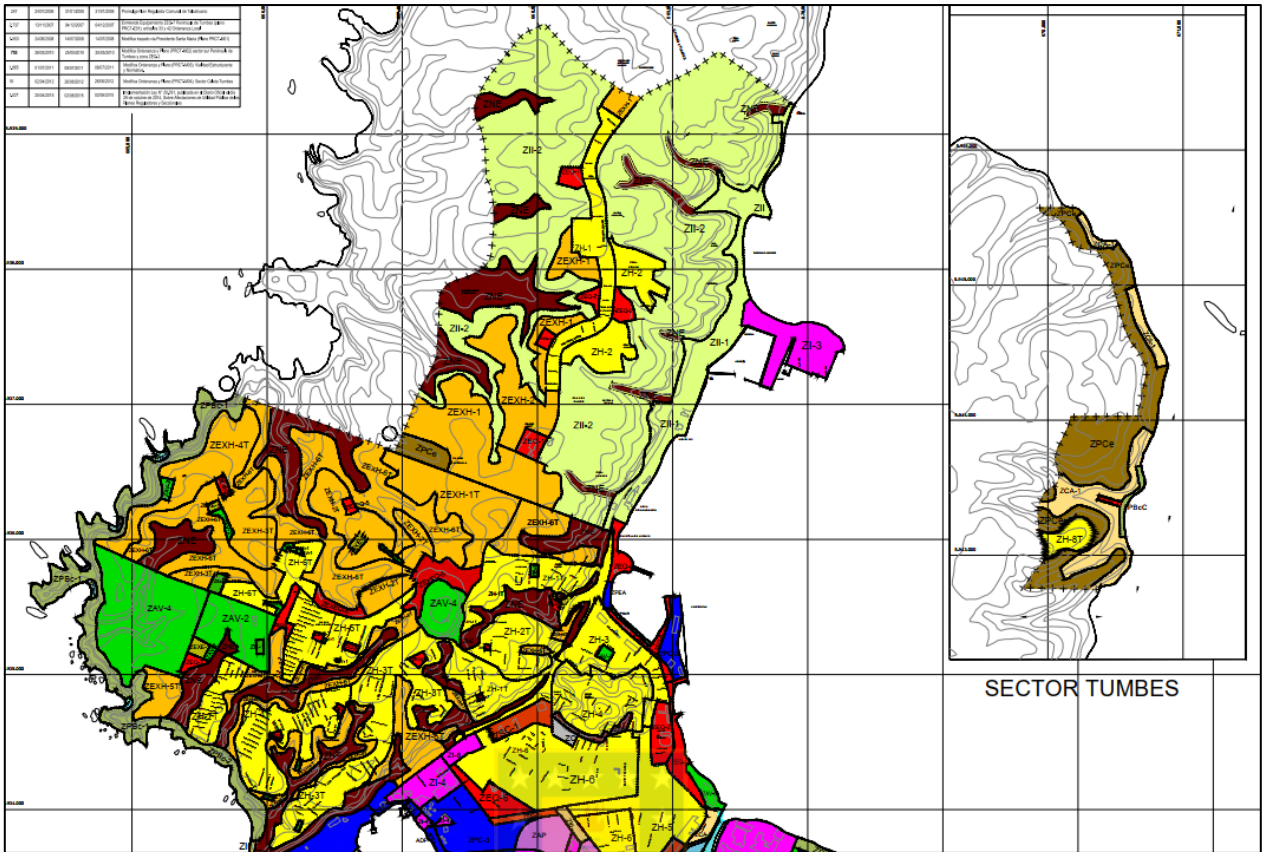


**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ANEXOS**

**VIII MAPA DEL PLAN REGULADOR PARA LA PENÍNSULA DE  
TUMBES**



	ZH	Zona Residencial		ZEXH	Zona de Extensión Residencial
	ZHEQ	Zona Residencial Equipamiento		ZEXEQ	Zona de Extensión Equipamiento
	ZEQ	Zona de Equipamiento		ZEXE	Zona de Extensión Esparcimiento
	ZE	Zona de Esparcimiento		ZEXI	Zona de Extensión Industrial
	ZCA	Zona de Caletas		ZEXPC	Zona de Extensión Portuaria
	ZAV	Zona de Áreas Verdes		ZEXAP	Zona de Extensión de Antepuerto
	ZI	Zona Industrial		ZEXSC	Zona de Extensión de Servicios Comerciales
	ZP	Zona Portuaria			
	ZAP	Zona de Antepuerto			