



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS DE CONECTIVIDAD DE FRACTURAS, Y
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA CORDILLERA DE
LA COSTA, ENTRE LOS 32°36' Y 33°57'S**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

TOMÁS ENRIQUE MARAMBIO SÁNCHEZ

PROFESORA GUÍA:

Dra. LINDA DANIELE

PROFESOR COGUÍA:

Dr. CRISTOBAL GIRARDI LAVIN

COMISIÓN:

Dr. MATIAS TAUCARE TORO

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Geólogo
POR: Tomás Enrique Marambio Sánchez
FECHA: 2022
PROFESORA GUÍA: Linda Daniele

ANÁLISIS DE LA CONECTIVIDAD DE FRACTURAS, Y EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA CORDILLERA DE LA COSTA, ENTRE LOS 32°05' Y 33°57'S

El presente trabajo corresponde a un estudio de los recursos hídricos subterráneos y superficiales de la cordillera de la costa de la región de Valparaíso, entre la desembocadura del río Aconcagua, y el estero Catapilco, correspondiente a parte de la cuenca baja del río Aconcagua, y la cuenca costera entre el río y el estero antes mencionados.

Las constantes forzantes climáticas y antrópicas presionan los sistemas hídricos, siendo necesario evaluar los efectos en los flujos subterráneos e incorporar a la gestión, y comprensión de los acuíferos la importancia de la recarga del bloque de montaña, factor determinante en sectores donde predominan las formaciones rocosas, y es posible identificar lineamientos morfoestructurales conectados, siendo estas montañas donde se concentran las mayores precipitaciones de la zona.

Los resultados de este estudio resaltan la fuerte influencia de estos 10 años de megasequía en los recursos hídricos. Las precipitaciones de la zona han registrado disminuciones de 20 a 40%, mientras que los caudales promedios anuales de los ríos de importancia regional, como es el río Aconcagua, presentan disminuciones de hasta el 70%. Se han registrado descensos en los niveles piezométricos entre 1 y 10 m en periodos inferiores a 10 años. Al mismo tiempo, han ido aumentando considerablemente los derechos consuntivos de agua subterránea, otorgados para toda la zona de estudio.

Después de un intenso análisis geológico y estructural, y la aplicación de metodología topológica, se proponen 2 zonas potenciales de recarga en bloque de montaña del área estudiada, a considerar en modelos conceptuales próximos a realizar.

Debido a la pandemia sanitaria no se realizaron trabajos de terreno, por lo cual es importante destacar la necesidad de una campaña de terreno que abarque tres temáticas centrales, un mapeo estructural en las direcciones preferenciales de los lineamientos identificados, con énfasis en el relleno de las estructuras, un muestreo de aguas subterráneas y superficiales, y una campaña geofísica para determinar límites entre el bloque de montaña y los acuíferos aluviales.

“He aprendido que son los detalles cotidianos, los gestos de la gente corriente los que mantienen el mal a raya. Los actos sencillos de amor”.

Gandalf el Gris, El Hobbit, J.R.R. Tolkien.

Agradecimientos

Primero agradecer a los miembros de mi comisión, a la Prof Linda Daniele, al Dr. Cristóbal Girardi, y al Dr. Matías Taucare, por cada reunión, pregunta, corrección y mensaje de aliento en esta etapa final.

Quiero agradecer a mi familia, partiendo por mi madre Cecilia, tan fuerte e incondicional, que me enseñó y formó más allá de lo que puedo entender, a amar sin medida, siempre cuidar de los suyos, y siempre buscar ser una persona íntegra, que busque mi felicidad, y luchar por lo que crea que es correcto. A mi hermano Simón, mi mejor amigo, más grande profesor, que me demostró que uno siempre puede cambiar su vida para mejor, que hay que amar hasta desbordar el alma, a aceptar y aprender de cada individuo en esta tierra, y nos dio la alegría más grande, con el sobrino más hermoso existente en este universo (Juliansin). A mi abuelo, que tantos años fue mi figura paterna, y sostén entre tanta adversidad, y a mi abuela, la persona más dulce de esta tierra, que me enseñó que un gesto o mirada valen tanto. A Héctor, el compañero de batallas de mi madre, que resignificó la palabra compañero en mi diccionario, dejando y ganando tanto por amor. Y también agradecer a mis tíos y tías, mis primos y primas hermanas y todo ese amor que siempre estuvo, está y estará.

No sería nada si no fuera por todas las amistades que forjé en estos años, a los cabres de la Araucanía, esos que viajaron cientos de kilómetros y siguen siempre ahí, a los patrocinianos, que gracias a dos años quedaron para siempre, y a todas las amistades de la juventud.

Todos estos años no hubiera sobrevivido si no fuera por tanto apañe, con los cabres de la sección, que decantó en el pasillo de tantos almuerzos, los años de revolución y batucada, con personas que llevaban el ritmo en la sangre, y me demostraron que podía hacer tantas cosas, toda la gente de geo, partiendo por la Blanquis, de tanto trabajo y buena voluntad, pasando por tanto funcionare que te recibía con esas sonrisas que dan fuerza, y todas las generaciones de geólogos, que me reenamoraron de las ciencias, y me mostraron lo importante que es aprender y enseñar.

A mis grandes amistades, el Men Alexis, un hermano de camino, y a toda su familia, que me reciben como uno más, a los geochipamoglis, de tanto apañe y de tanto aguante, a los sedex, un grupo de débiles, desgraciaos y demonios, que me hicieron disfrutar tanto, al Humo, por tanto carecaca, a mis amigas tan queridas, la Pilarcita, la ValeCaro (ya son 1), los cabres de las cletas, de los cerros, de los naranjos (tan amados naranjos), a los que nos apañamos trabajando en la desesperanza de ver que nunca terminaba, y a tantos otros y otras.

Agradecer a la Nacha, la que me escuchaba, me corregía, y me tiraba para arriba en los momentos complejos, en que todo se ve cuesta arriba y que más cuesta mostrar, a punta de amor, preguntas y enseñanzas.

Y finalmente agradecer a mi padre, que desde arriba siempre me ha guiado, sin él no sería nada, y gracias a él, y cada una de las personas con las que me pude cruzar, soy quien soy.

TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos.....	iv
Tabla de contenido.....	v
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	ix
1. Introducción.....	1
1.1 Formulación del problema	1
1.2 Caso de estudio	3
2. Objetivos.....	5
2.1 Objetivo General.....	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3. Metodología.....	6
3.1 Recopilación de antecedentes	6
3.2 Parámetros Hidrogeológicos.....	6
3.3 Lineamientos y Análisis Topológico	7
4. Zona de estudio.....	11
4.1 Clima y uso de suelo.....	11
4.2 Geología Regional	15
4.2.1 Contexto geodinámico.....	15
4.2.2 Contexto tectónico.....	16
4.2.3 Litoestratigrafía	18
4.2.4 Rocas Plutónicas	21
4.2.5 Rocas y Depósitos Cenozoicos	22
4.3 Hidrogeología	24
4.3.1 Cuencas hidrográficas	24
4.3.2 Estaciones DGA	26
4.3.3 Derechos de agua consuntivos	28
5. Resultados y Discusión.....	32
5.1 Análisis Hidrogeológico	32
5.1.1 Precipitaciones y temperatura	33
5.1.2 Caudal.....	36
5.1.3 Piezometría.....	40
5.2 Recarga en Bloque de Montaña	47

6. Conclusiones.....	56
7. Bibliografía.....	58
Anexos	62

Índice de figuras

Figura 1: Mapa de zona de estudio, recuadro rojo se destaca zona de estudio, con comunas y cauces principales. ...3	3
Figura 2: Esquema de trabajo para obtención de mapa densidad de fracturas7	7
Figura 3: Proceso de fotomontaje, de imágenes Alos Palsar (Resolución 12.5m por pixel), en rojo zona de estudio. a) Imágenes satelitales individuales. b) Mosaico de fotos. c) Ejemplo de mapa de sombras.....8	8
Figura 4: Ejemplo de mapa de sombras, con dos configuraciones de resalte de información. En negro lineamientos realizados, en rojo zona de estudio, y azul cauces principales.9	9
Figura 5: Nomenclatura topológica para caracterización de red de fractura (Sanderson y Nixon, 2015). a) Mapa de red de fracturas, y b) caracterización topológica. Extraído de Taucare (2020).9	9
Figura 6: División de Bioclimas para la Región de Valparaíso, más mapa de temperaturas y precipitaciones promedio. en rojo se destaca zona de estudio aproximada. Extraído y modificado de Luebert, F. & Pliscoff, P.(2012).11	11
Figura 7: Mapa uso de suelo en área de estudio. Datos obtenidos de clasificación uso suelo CIREN (2013).12	12
Figura 8: Superficie de uso de la tierra, para los años 2013 y 2001, con el cambio bruto en la superficie, para la región de Valparaíso. Extraído de CIREN (2013).14	14
Figura 9: Tasas de convergencia (mm/año) entre la Placa oceánica Farallón-Nazca y la Placa Sudamericana, extraída de Martinod et al. (2010).15	15
Figura 10: Mapa a escala regional de la Maipo Deformation Zone (MDZ) destacada en azul. Recuadro rojo referencia aproximada de la zona de estudio. Extraído y modificado de Piquer et. al. (2021).16	16
Figura 11: Fallas y lineamientos identificados al sur del área de estudio, extraído de Sabaj (2008).17	17
Figura 12: Mapa Geológico Regional, Modificado de Carta Geológica Quillota-Portillo, SERNAGEOMIN, RIVANO et al. (1993).18	18
Figura 13: A) Mapa División Cuencas DGA. B) Misma área con División Subcuencas DGA. En rojo recuadro zona de estudio.....24	24
Figura 14: Caudal Promedio Mensual, en estación Río Aconcagua en el Romeral, entre 1999 y 2020.25	25
Figura 15: Mapa de estaciones pluviométricas de la DGA.26	26
Figura 16: Mapa de estaciones fluviométricas, en círculo azul con cruz negra. Estación “Río Aconcagua en Romeral” y estación “Canal Las Vegas en Bocatoma” comparten punto aproximado, al estar a 50m de distancia.27	27
Figura 17: Mapa de los derechos consuntivos de agua subterránea otorgados por la DGA. A) derechos otorgados hasta 2009, y en B) derechos otorgados hasta 2020.28	28
Figura 18: Derechos consuntivos acumulados de agua subterránea otorgados para la cuenca baja del río Aconcagua, desde el año 1986 al 2020.29	29
Figura 19: Derechos consuntivos acumulados de agua subterránea otorgados para la cuenca costera entre estero Catapilco y río Aconcagua, desde el año 1986 al 2020.29	29
Figura 20: Derechos consuntivos acumulados de agua subterránea otorgados para la cuenca media y alta del río Aconcagua, desde el año 1986 al 2020.30	30
Figura 21: Derechos consuntivos acumulados de agua superficiales otorgados para la cuenca media y alta del río Aconcagua, desde el año 1986 al 2020.31	31
Figura 22: a) Registro del índice de precipitaciones regional (RPI), para Chile central. MD (megasequía por sus siglas en inglés), siendo definida una sequía para un periodo con RPI <80%. b) Histograma de 9 años promedio de RPI. Extraído de Garreaud et al (2020).32	32
Figura 23: Promedios mensuales de precipitación por estación, para periodo pre-2009 (En función de datos disponibles) y 2010-2019.34	34

<i>Figura 24: Mapa de perdida de precipitación media anual porcentual, entre el periodo 1990-2009 y el periodo 2010-2020.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 25: Caudal promedio mensual (m3/s) para estación “Río Aconcagua en Romeral”. En Azul periodo 1999-2009, y en naranja periodo 2010-2020.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 26: Caudal promedio mensual (m3/s) para estación “Estero Quintero en Valle Alegre”.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 27: Caudal promedio mensual (m3/s) para estación “Estero Catemu en puente Santa Rosa”.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 28: Caudal promedio mensual (m3/s) para estación “Canal las Vegas, en Bocatoma.”.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 29: Mapa de puntos de medida de nivel estático en agua subterránea. Se realiza división en zonas A-B-C-D, para mejorar la visualización de información.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 30: Piezometría Sector A, con dirección de flujo subterráneo en acuífero libre, con pozos sus respectivas cotas de agua subterránea en los últimos 10 años. En flecha azul, dirección a favor de la pendiente del río, y en flecha roja, dirección de flujo opuesta a la pendiente del río.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 31: Perfil topográfico de la traza del río Aconcagua, junto al nivel piezométrico estático, registrado por estaciones colindante</i>	<i>42</i>
<i>Figura 32: Estaciones piezométricas Callejón Zaravia y Fundo el Progreso, con información de piezometría, derechos consuntivos otorgados, y red de canales de riego.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 33: Piezometría en Bahía de Quintero, con diversos pozos y sus respectivas cotas de agua subterránea en los últimos 10 años. En azul línea de dirección de flujo subterráneo planteado.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 34: Piezometría Sector C, con dirección de flujo propuesta.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 35: Sector D, Tranque El Torito, con 3 pozos y su respectiva cota de agua subterránea en el último año.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 36: Mapa de Alturas sobre el nivel del mar de la Zona de estudio.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 37: Mapa de lineamientos morfoestructurales para la zona de estudio.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 38: Mapa de lineamientos con orientación definida, más diagrama de rosa, con intervalos de 10°.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 39: Caracterización topológica de red de fracturas obtenida a partir de complemento Network GT, con clasificación de ramas y nodos por tipo.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 40: Mapa de densidad de fracturas (km/km2), obtenido a partir de aplicación de complemento NetworkGT a red de fracturas.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 41: Mapa de Conexiones por Rama (Nc), obtenido a partir de aplicación de complemento NetworkGT a red de fracturas.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 42: Zonas propuestas con red interconectada,, que pueden presentar recarga por bloque de montaña.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 43: Zona A de potencial de recarga en bloque de montaña. En círculos se observan derechos consuntivos de agua subterránea otorgados, de sección 4.3.3.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 44: Zona B de potencial recarga en bloque de montaña. En círculos se observan derechos consuntivos de agua subterránea otorgados, de sección 4.3.3.</i>	<i>55</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Población total por comuna en censo 2002 y 2017, con respectivo aumento porcentual (INE, 2017)</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 2: Antecedentes bibliográficos principales, e información utilizada.</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 3: Uso de Suelos en área subcuencas aledañas a la zona de estudio, y dentro de las comunas de Quintero y Puchuncaví. Datos obtenidos de CONAF (2013).</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 4: División Subcuencas, con áreas respectivas.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 5: Estaciones pluviométricas DGA, más parámetros medidos</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 6: Estaciones fluviométricas DGA, más periodo de registro</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 7: Precipitaciones Medias en Estaciones Pluviométricas, para dos periodos, más disminución de precipitación porcentual periodo 2010-2019 con respecto a periodos anteriores.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 8: Temperaturas Medias en Estaciones Pluviométricas, para periodo 1990-2009, y post 2010.</i>	<i>35</i>

1. Introducción

1.1 Formulación del problema

El agua subterránea es fundamental para el desarrollo rural y urbano, siendo un recurso estratégico en zonas donde las diversas actividades antrópicas, sumado a los efectos del cambio climático, han mermado su cantidad y calidad, aumentando los costos de extracción, y generando un posible daño ecológico asociado (Custodio, 2002).

Aún más, si se considera un contexto actual, donde los recursos hídricos en Chile central se han visto constantemente presionados por una seguidilla de sequías, con descensos de 25 a 45% en las precipitaciones en los últimos 10 años (Garreaud et al., 2020).

En este contexto, la circulación, recarga y almacenamiento de agua subterránea se vuelve un tema de estudio de gran relevancia científica, donde generalmente se asocian los acuíferos a cuencas rellenas de sedimentos, delimitando sus dimensiones a las formaciones rocosas circundantes, atribuyendo a estas últimas características impermeables. (DGA 2009, 2016, 2020).

La recarga de acuíferos es definida como un flujo de agua descendente que alcanza al nivel freático y se suma al almacenamiento de agua subterránea, tanto mediante un mecanismo difuso, caracterizado por la percolación de agua meteórica a través del suelo, como focalizado, caracterizado por el movimiento de agua desde ríos, arroyos, canales o lagos, hasta un acuífero subyacente (Healy & Scanlon, 2010).

Pero la distribución de las precipitaciones no es homogénea en el territorio, está fuertemente controlada por un factor orográfico, resaltando lo importante de entender como interactúa la recarga efectuada en el bloque de montaña, y la recarga generada en los acuíferos aluviales contiguos, a partir de los procesos de recarga en frente de montaña (MFR), y recarga en bloque de montaña (MBR)(Markovich, et al., 2019; Walter et al., 2019; Wilson & Guan, 2013).

La recarga en frente de montaña generalmente se define como a toda agua que entra al acuífero aluvial, desde el bloque de montaña, mientras que la recarga en bloque de montaña, un componente de MFR, hace referencia al afluencia subsuperficial de agua subterránea que recarga el acuífero aluvial (Markovich et al., 2019).

Chile se transforma en laboratorio ideal para estudios de esta índole, al contar con una extensa costa de 6.435 km, acompañada de diversos grandes cordones montañosos, por lo que requiere esfuerzos adicionales para entender mejor las dinámicas de los flujos subterráneos y los tipos de recargas de acuíferos.

En el caso de la costa de la región de Valparaíso, presenta una extensa cordillera de la Costa, cortada por diversos valles transversales, en los cuales se centran las diversas actividades antrópicas, destacando los asentamientos urbanos, diversas industrias, forestales y agrícolas, siendo utilizados tanto los rellenos sedimentarios, como las laderas de los cerros aledaños, buscando aumentar el área utilizable para estas actividades.

En ese sentido, se vuelve relevante estudiar los efectos de la presión climática y antrópica en los sistemas hídricos, y no menos importante, el rol de las fracturas de los basamentos rocosos que forman la cordillera de la Costa, al considerar que el 30% del área de estudio son depósitos cuaternarios, mientras que el 70% restante corresponden a formaciones rocosas, especialmente si se considera la posibilidad de contar con una red de fracturas.

Una red de fracturas se caracteriza por una serie de fracturas que cuentan con una gama de orientaciones y un largo con el potencial de generar una red interconectada (Peacock et al., 2016). Esta interconexión puede ser analizada a partir de su geometría y topología, a través de modelos de dos dimensiones, que contemplan a las fracturas como líneas, y su conexión o término como nodos (Sanderson & Nixon, 2018).

Si bien existen estudios técnicos de los diversos cauces de la región, realizados principalmente por la Dirección General de Aguas (DGA, 2004, 2009, 2020), aún no existen estudios detallados donde se destaque la importancia de la roca fracturada en la cordillera de la Costa, ni menos su papel en el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos aledaños.

En esa dirección, esta memoria de título busca aportar en parte a este vacío de información, entregando un diagnóstico de las condiciones hidrogeológicas de un segmento de la cordillera de la Costa, direcciones de flujo en los valles transversales a ésta, y dando un pie inicial para la incorporación de los medios fracturados a los modelos conceptuales de gestión de cuencas, en el caso de la parte baja de la región de Valparaíso, en un contexto complejo de megasequía para Chile central.

1.2 Caso de estudio

El área de estudio se centra en la costa de la región de Valparaíso, limitada aproximadamente al norte por el estero Catapilco, a los 32°36'S, al sur por la desembocadura del río Aconcagua, a los 32°57'S, al este por la división aproximada de las altas cumbres, que separan las subsubcuencas y divisiones regionales dispuestas por organismos estatales, y al oeste el Océano Pacífico.

Las principales comunas estudiadas (Fig. 1), de forma parcial o total, corresponden a Calera, Concón, Hijuelas, La Cruz, Nogales, Puchuncaví, Quillota, Quintero y Zapallar.

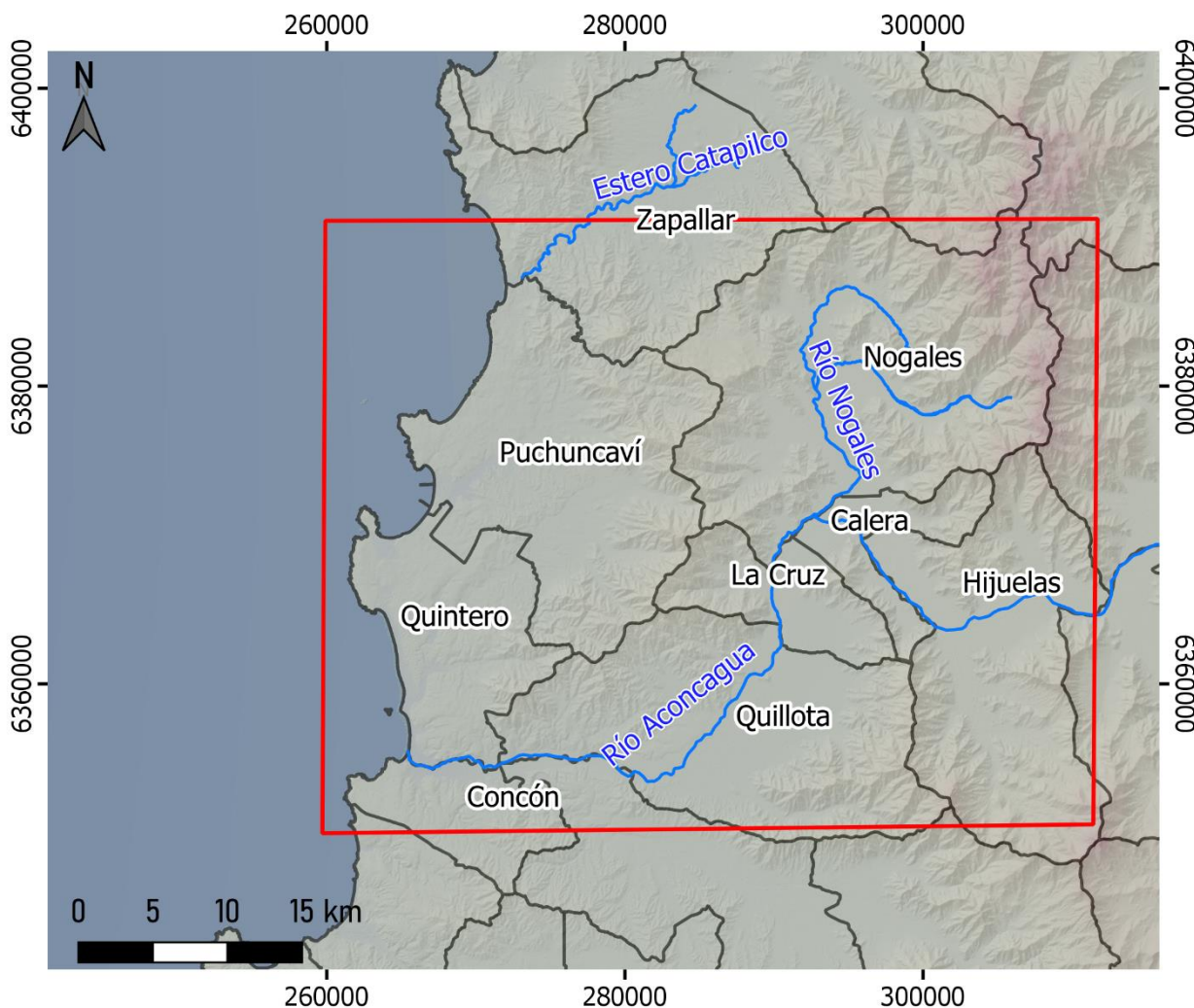


Figura 1: Mapa de zona de estudio, recuadro rojo se destaca zona de estudio, con comunas y cauces principales.

Estas son comunas de fácil acceso, a través de la Ruta 5, desvío Los Nogales hacia el este, o a través de la Ruta 68, a través de Viña del Mar, por carretera de la costa hacia el norte.

En estas comunas viven aproximadamente 303.000 personas (Censo 2017), y se ha evidenciado un aumento en la población de un 22.28% (Tabla 1), entre el registro anterior realizado en el Censo 2002, siendo las comunas de Quillota, Quintero y Concón las de mayor aumento numérico, y las comunas de La Cruz, Quintero y Puchuncaví, las comunas con el mayor aumento porcentual.

Tabla 1: Población total por comuna en censo 2002 y 2017, con respectivo aumento porcentual (INE, 2017)

Comuna	Censo 2002	Censo 2017	Aumento Poblacional	Aumento Porcentual
Calera	49,503	50,554	1,051	2.12%
Concón	32,273	42,152	9,879	30.61%
Hijuelas	16,014	17,988	1,974	12.33%
La Cruz	12,851	22,098	9,247	71.96%
Nogales	21,633	22,120	487	2.25%
Puchuncavi	12,954	18,546	5,592	43.17%
Quillota	75,916	90,517	14,601	19.23%
Quintero	21,174	31,923	10,749	50.77%
Zapallar	5,659	7,339	1,680	29.69%
Total	247,977	303,237	55,260	22.28%

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Teniendo en cuenta los efectos naturales y antrópicos en los sistemas hídricos de la zona de estudio, se plantean los siguientes objetivos generales:

1. Evaluar el funcionamiento hidrodinámico temporal de las aguas subterráneas en los depósitos cuaternarios de la cordillera de la costa de la región de Valparaíso, para el periodo de megasequía.
2. Proponer zonas potenciales de recarga y circulación de agua subterránea en bloque de montaña a incorporar en modelos conceptuales futuros.

2.2 Objetivos Específicos

Para cumplir con los objetivos generales, se consideran los siguientes objetivos específicos.

1. Describir las condiciones hidrológicas actuales y evaluar su evolución temporal para el periodo de megasequía.
2. Determinar la piezometría local actual y temporal en los sedimentos cuaternarios.
3. Identificar una red de lineamientos morfoestructurales en la cordillera de la Costa.
4. Evaluar la conectividad y frecuencia de estos lineamientos, estableciendo las zonas de posible recarga y circulación de flujo subterráneo.

3. Metodología

3.1 Recopilación de antecedentes

Con el fin de evaluar las condiciones hidrogeológicas actuales y temporales antes mencionadas, se realizó un levantamiento de información disponible, centrada en la información pública de la Red Hidrométrica de la Dirección General de Aguas (DGA), reportes individuales disponibles en el Sistema de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), información aportada por Fundación Chile, además de diversos mapas, artículos científicos, memorias y tesis, indicadas las más relevantes en la tabla 2.

Tabla 2: Antecedentes bibliográficos principales, e información utilizada.

Bibliografía Principal Utilizada	Información Utilizada
Rivano, S. (1996). Geología de las Hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería., 202.	Geología de la zona
Thomas, H. (1958). Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta de Barriga. Inst. de Investigaciones Geol.	
Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Águila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective.	Caracterización Climática de Chile central y uso de suelo.
Luebert, F., & Plischoff, P. (2012). Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile	
CONAF. (2016). Catastros de Uso de Suelo y Vegetación..	
Dirección General de Aguas (DGA). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Superintendencia del Medio Ambiente. SNIFA - Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental. Reportes de pozos aportados por Fundación Chile (s.f.).	Condiciones hidrogeológicas actuales y temporales de precipitación, caudal, temperatura, y nivel piezométrico
Nyberg, B., Nixon, C. W., & Sanderson, D. J. (2018). NetworkGT: A GIS tool for geometric and topological analysis of two-dimensional fracture networks. <i>Geosphere</i> , 14(4), 1618–1634. https://doi.org/10.1130/GES01595.1	Herramienta y conceptualización de topología para análisis de lineamientos morfoestructurales.
Sanderson, D. J., & Nixon, C. W. (2015). The use of topology in fracture network characterization. <i>Journal of Structural Geology</i> , 72, 55–66. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.005	

3.2 Parámetros Hidrogeológicos

A partir de estudios de piezometría de pozos de observación, se buscó determinar la evolución de los niveles estáticos de aguas subterráneas, en los rellenos cuaternarios principales que cuentan con información disponible y continua. Para esto, se generó una base de datos piezométricos en las zonas aledañas al área de estudio, a partir de la Red Hidrométrica de la Dirección General de Aguas (DGA), los reportes individuales de los distintos pozos de observación disponibles en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), de diversos proyectos y empresas de la zona, además de informaciones de pozos aportados por Fundación Chile.

A partir de los datos de precipitaciones, caudales y temperaturas, se realizó un análisis comparativo entre los parámetros medidos antes del 2009 y entre el periodo 2010-2020, para evaluar mejor las condiciones actuales de los sistemas hídricos locales para el periodo de megasequía registrado para la zona central del país.

Esto se realizó mediante gráficos precipitación-temperatura v/s tiempo, con series de datos mensuales promedio, y gráficos caudal promedio mensual v/s tiempo, para los periodos antes señalados, en función de la disponibilidad de los datos.

Además, se proponen direcciones de flujo aproximadas asociadas a variaciones espaciales en los niveles piezométricos, evaluando si estas variaciones observadas incorporan forzantes antrópicos, tales como el aumento de los derechos de agua otorgados para la zona, en el gradiente hídrico local.

3.3 Lineamientos y Análisis Topológico

La interconexión de los sistemas de fracturas subsuperficiales dependen de 5 características geométricas: la densidad, la orientación, la dimensión, la conexión y la apertura de las fracturas (Mäkel, 2007).

Con el fin de determinar zonas con presencia de una red interconectada, que cuente con una las características necesarias para representar un potencial de circulación, recarga y almacenamiento de agua subterránea, en las rocas de la cordillera de la costa, se realizó un mapeo de lineamientos morfoestructurales, atribuyendo a este una potencial red de fracturas, evaluando su conectividad, y zonas de interés hídrico.

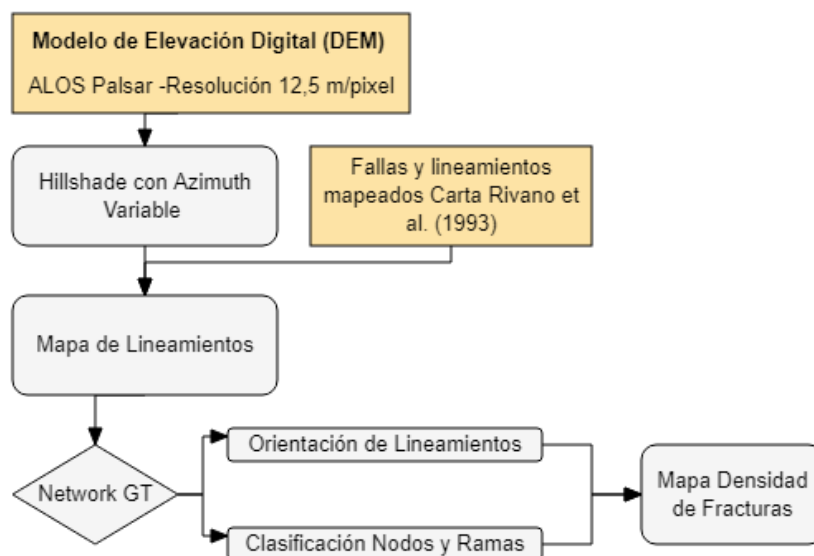


Figura 2: Esquema de trabajo para obtención de mapa densidad de fracturas

Para esto, se realizó un mapeo estructural de lineamientos a múltiples escalas detalladas a continuación, con la utilización de imágenes satelitales de alta resolución ALOS-Palsar, con 12.5m

por píxel para modelos de elevación digital, e imágenes de Google Earth, con resolución en zonas de ~2.5m por píxel, siguiendo el esquema observado en la figura 2.

Para realizar los lineamientos morfoestructurales, se realizó un fotomontaje a través del software QGIS, de 4 imágenes satelitales Alos Palsar (© JAXA/METI 2010) con resolución 12.5m por píxel, del set de datos *PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res*, procesando la variación de altura registrada por el modelo de elevación digital (DEM) (Fig. 3). Para luego, obtener un set de diversos mapas de sombras, mediante la herramienta “*Hillshade*” del mismo software, permitiendo mostrar la superficie del terreno a través del sombreado de laderas, modificando la posición de iluminación de estas, mostrando direcciones preferenciales en función del azimuts entregado (Fig. 4).

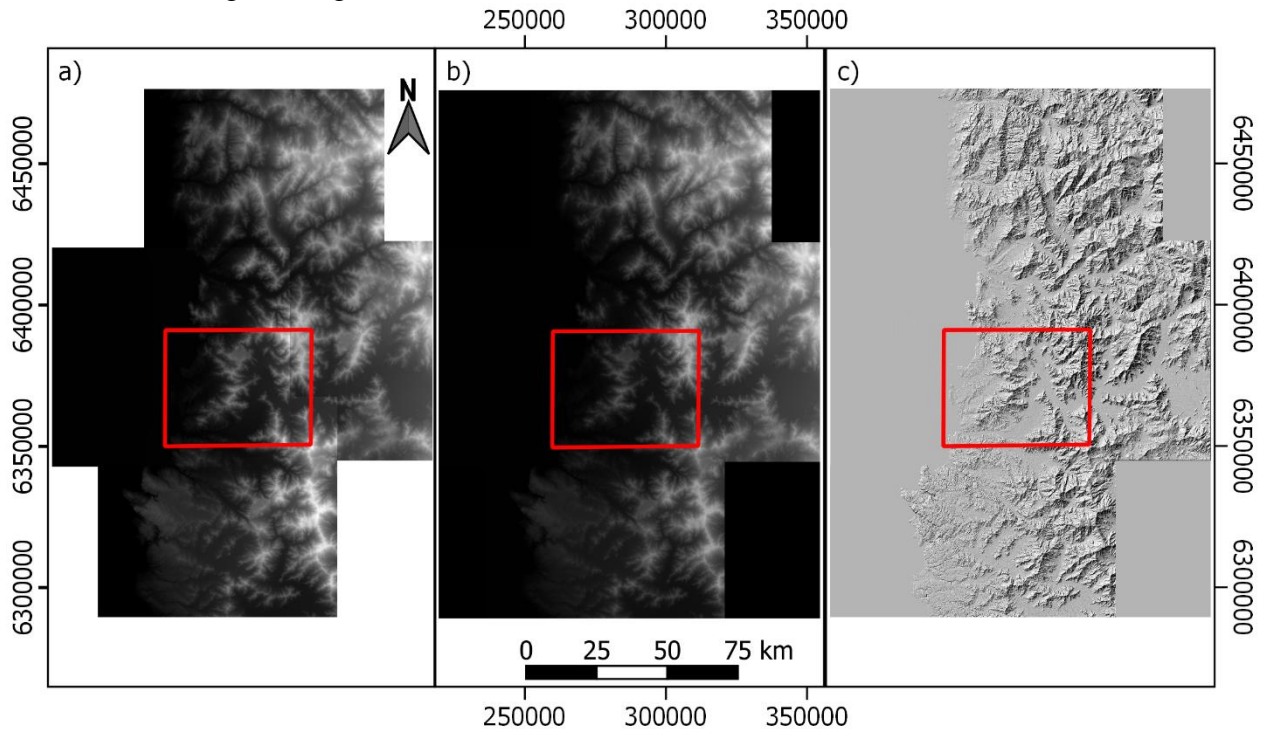


Figura 3: Proceso de fotomontaje, de imágenes Alos Palsar (Resolución 12.5m por píxel), en rojo zona de estudio. a) Imágenes satelitales individuales. b) Mosaico de fotos. c) Ejemplo de mapa de sombras.

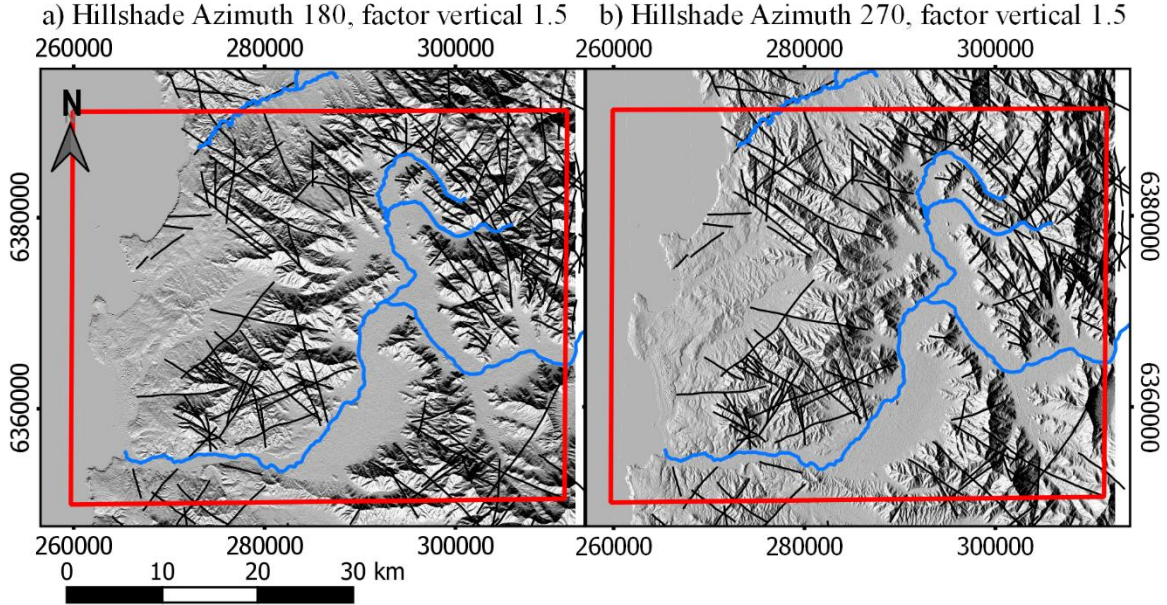


Figura 4: Ejemplo de mapa de sombras, con dos configuraciones de resalte de información. En negro lineamientos realizados, en rojo zona de estudio, y azul cauces principales.

Incorporando interpretaciones de lineamientos morfoestructurales identificados en los mapas de sombras, más información de fallas regionales y bibliografía referente a la geología estructural de la zona y sus alrededores, se realizó un análisis topológico, mediante el complemento Network GT (Nyberg et al., 2018).

Al considerar la topología en una red de fracturas de 2-D, es posible parametrizar los diversos lineamientos en líneas (o trazas de fracturas), mediante el uso de nodos y ramas. (Sanderson & Nixon, 2015; 2018)(Fig. 5). Un nodo es un punto de término de una línea, o el punto de intersección entre dos líneas. Este puede ser clasificado topológicamente, como nodo aislado (I-node), nodo colindante (Y-node) o nodo de cruce (X-node). Una rama es una línea rodeada por nodos-I, o por nodos conectados, tanto X como Y, y es clasificada en función de los nodos de sus puntas, como aislada (I-I), parcialmente conectada (C-I) o completamente conectada (C-C) (Nyberg et al., 2018; Sanderson & Nixon, 2015).

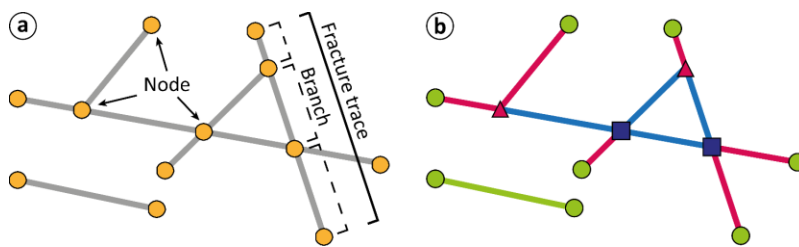


Figura 5: Nomenclatura topológica para caracterización de red de fractura (Sanderson y Nixon, 2015). a) Mapa de red de fracturas, y b) caracterización topológica. Extraído de Taucare (2020).

Esto permite clasificar la dirección de los distintos lineamientos, mediante la herramienta “Define Sets”, obteniendo diagramas de rosa, con las orientaciones preferenciales observables, en función de la dirección del azimut. Para este estudio se definió una agrupación de 10% para los diversos lineamientos, determinando las direcciones de predominancia.

Esta caracterización de nodos permite evaluar las fracturas conectadas por donde es posible el paso de agua subterránea (Mäkel, 2007), identificando las ramas conectadas (C-C) o parcialmente conectadas (C-I), además de una densidad de fracturas general para la zona.

Al parametrizar el espacio, permite asignar a celdas de información diversas características, siendo las utilizadas la conexión por rama (C_B), y la intensidad de fracturas (Km/Km^2).

La intensidad de fracturas relaciona el largo total por rama, dividida por la unidad de superficie (km/km^2) de la forma $2D\ Intensity = \sum L/A$. Siendo L el largo de la fractura, y A el área de muestra. Resaltando la intensidad de las distintas ramas de la red de lineamientos.

Mientras que la conexión por rama relaciona los nodos que presentan conexión (N_Y y N_X), con el número de ramas (N_B), de la forma $C_B = \frac{3N_Y+4N_X}{N_B}$, siendo $N_B = \frac{N_I+3N_Y+4N_X}{2}$. Resaltando zonas con una mayor cantidad de conexión.

4. Zona de estudio

4.1 Clima y uso de suelo

En la zona costera del área de estudio, el clima es templado mediterráneo de verano cálido, y en las zonas más cercanas al mar, con una mayor influencia del Océano Pacífico (Sarricolea et al., 2017).

Luebert, F. y Pliscoff, P. (2012) realizan una división más detallada del clima de la V región, analizando datos de 13 estaciones meteorológicas distribuidas en la región. Determinan la presencia de una estación estival seca, característica del clima mediterráneo, con mayor precipitación en la vertiente occidental de la cordillera de la Costa, a barlovento de los sectores más elevados cercanos a la costa, con un efecto de sombra de lluvias para la depresión central y cordillera de los Andes.

Estos autores dividen la V región en 5 bioclimas (Fig. 6), según su distribución espacial, características climáticas y rasgos vegetacionales generales. Dentro de la zona de estudio, destaca el bioclima costero, con cotas bajas de 0 a 800m, con temperaturas medias anuales de 14.5°C, amplitud térmica de 7.5°C, y precipitaciones en torno a 458 mm anuales promedio. La mayoría de las precipitaciones se registran en la parte suroeste de la región, principalmente en los sectores de Valparaíso y alrededores.

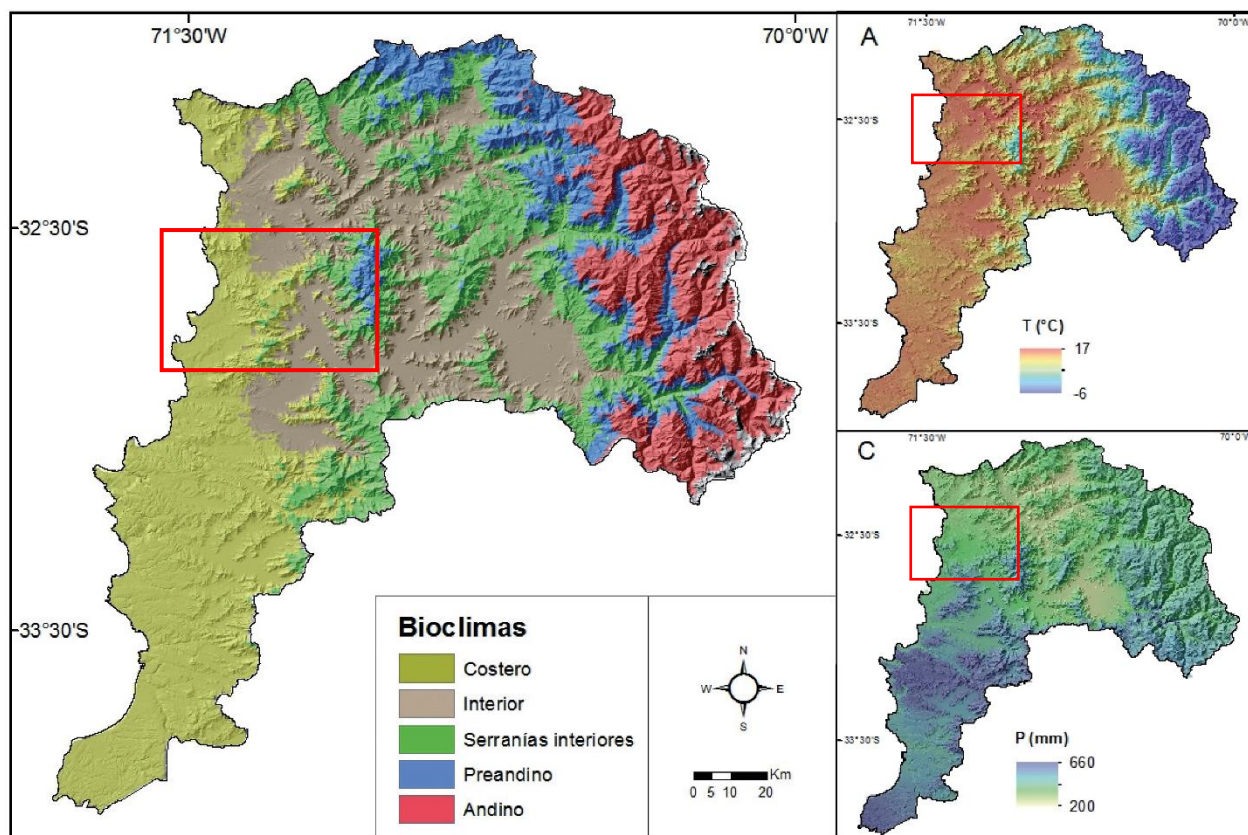


Figura 6: División de Bioclimas para la Región de Valparaíso, más mapa de temperaturas y precipitaciones promedio. en rojo se destaca zona de estudio aproximada. Extraído y modificado de Luebert, F. & Pliscoff, P.(2012).

Aconcagua, que cruza la parte sur del área de estudio, y que nace en la conjunción del río Juncal y el río Blanco, recorriendo 142 km hasta su desembocadura.

El uso de suelo, que se refiere a la forma en que las personas o la sociedad están usando un terreno en particular (FAO, 2000), ha sido catastrado por la Corporación Nacional Forestal en 2013 a escala 1:30.000. En él se identifican distintas áreas de utilización de suelo, en función de su afinidad y desarrollo actual, dividiendo la superficie en 8 categorías de usos (Fig. 7), que son las siguientes: áreas desprovistas de vegetación, áreas urbanas e industriales, bosques, cuerpos de agua, humedales, praderas y matorrales, terrenos agrícolas, y nieves eternas y glaciares. La última categoría de uso de suelo no se encuentra en la zona de estudio.

Al hacer una comparativa entre el área de estudio, y el uso de suelo designado para la región de Valparaíso, es posible observar que más del 20% de la superficie total es destinada a terrenos agrícolas, y un 8 % está siendo utilizada como áreas urbanas e industriales, en ambos casos, más del doble que el porcentaje promedio de las mismas categorías en la región (Tabla 3).

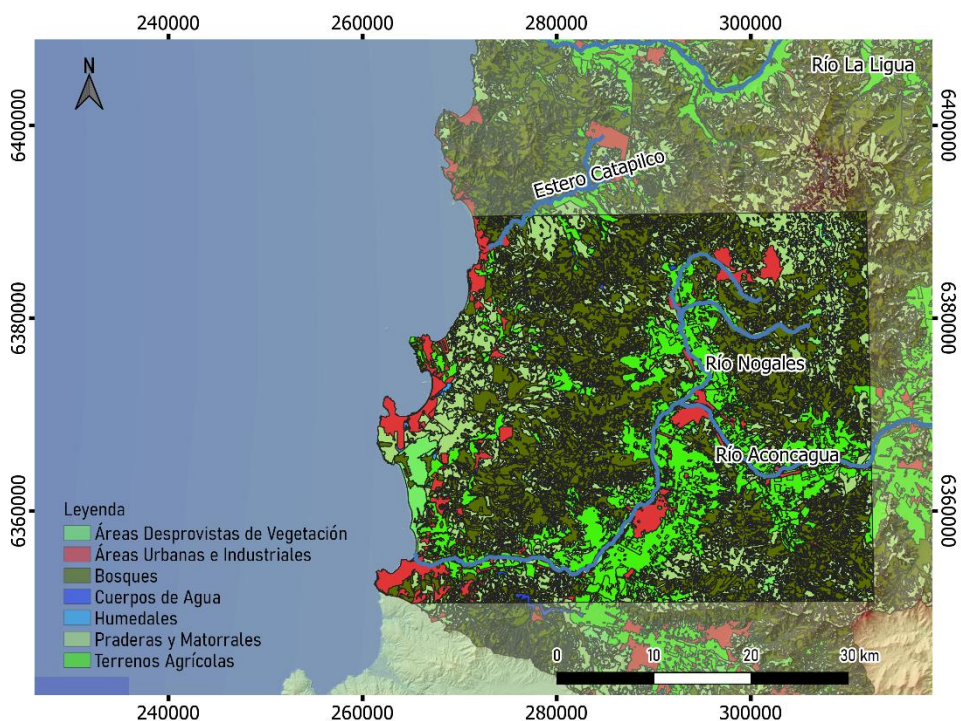


Figura 7: Mapa uso de suelo en área de estudio. Datos obtenidos de clasificación uso suelo CIREN (2013).

Tabla 3: Uso de Suelos en área subcuencas aledañas a la zona de estudio, y dentro de las comunas de Quintero y Puchuncaví. Datos obtenidos de CONAF (2013).

Uso Suelo	Uso en región de		Uso en zona de estudio (Km²)	Porcentaje (%)
	Valparaíso (Km²)	Porcentaje (%)		
Áreas Desprovistas de Vegetación	2298.18	14.4	54.98	2.6
Áreas Urbanas e Industriales	584.83	3.7	167.79	8.0
Bosques	5534.71	34.6	884.40	42.0
Cuerpos de Agua	52.62	0.3	7.56	0.4
Nieves Eternas y Glaciares	523.13	3.3	0.00	0.0
Humedales	98.52	0.6	1.75	0.1
Praderas y Matorrales	5145.90	32.2	521.87	24.8
Terrenos Agrícolas	1748.76	10.9	465.60	22.1
Total	15986.64	100.0	2103.96	100.0

La evolución del uso de suelo a nivel regional, identificada por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)(Fig. 8), entre los periodos 2001 y 2013, señalan un aumento de 382.728 ha en el uso “Bosques”, equivalentes al 23.9% de la superficie regional, con el aumento principal en el subuso “Bosque Nativo” y el tipo forestal Esclerófilo, subtipos Peumo, Quillay, Litre y Espino.

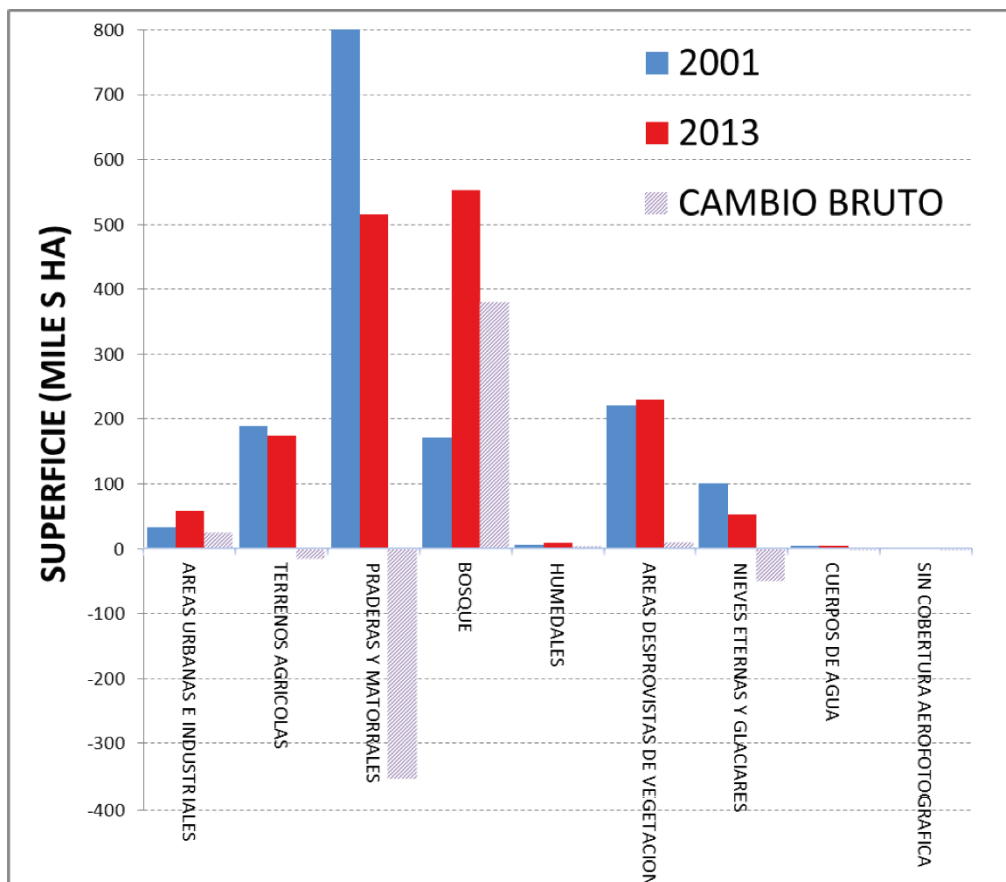


Figura 8: Superficie de uso de la tierra, para los años 2013 y 2001, con el cambio bruto en la superficie, para la región de Valparaíso. Extraído de CIREN (2013).

4.2 Geología Regional

A escala regional, se cuenta con diversos cordones montañosos de orientación NS y EW, cortados por diversos valles profundos y amplios, recorridos por los ríos principales.

Desde la cordillera de la Costa hasta la cordillera de los Andes en los valles transversales se emplazan las principales actividades productivas, siendo la zona de estudio ubicada entre las provincias de Quillota y Valparaíso.

A continuación se expondrá primero el contexto geodinámico y tectónico, para luego describir las rocas presentes en la zona de estudio.

4.2.1 Contexto geodinámico

La zona de estudio está fuertemente controlada por la subducción de la Placa de Nazca, en dirección ENE, bajo la Placa Sudamericana, con tasas de convergencia entre los 5 y 9 cm/año, desde el rompimiento de la Placa de Farallón, hace ~25 Ma (Yáñez et al., 2002, Martinod et al., 2010)(Fig. 9).

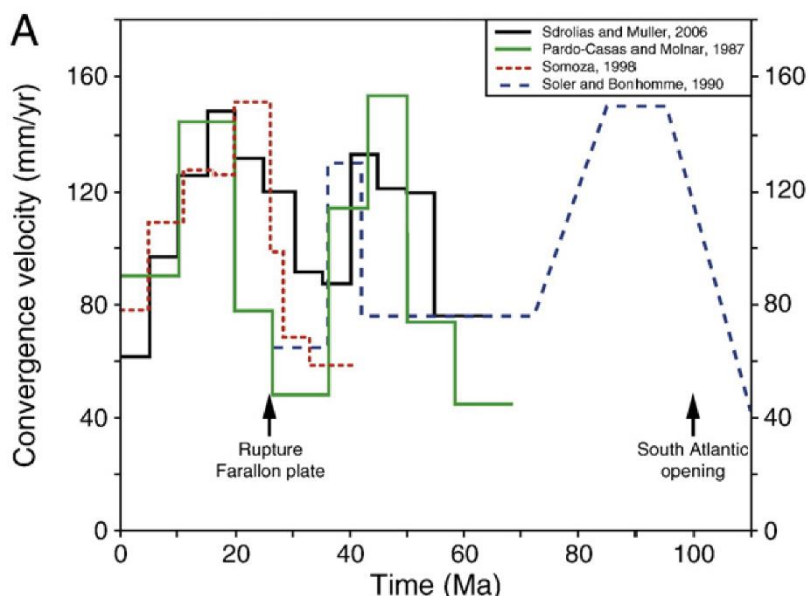


Figura 9: Tasas de convergencia (mm/año) entre la Placa oceánica Farallón-Nazca y la Placa Sudamericana, extraída de Martinod et al. (2010).

Por su parte, se evidencia un fenómeno de subducción plana, o *flat-slab* al norte de 33°S, con un cese del volcanismo actual, producto del denominado Ridge de Juan Fernández, que migra de norte hacia el sur, hasta la latitud actual de los 33°, hace aproximadamente 10 Ma (Yáñez et al., 2002). Las tasas de acortamiento y alzamiento de la placa superior aumentan notablemente en la región, provocando cambios en la topografía tras el paso de la dorsal, como alzamientos o subsidencias bruscas, de cientos de metros en pocos millones de años (Espurt et al., 2008; Martinod et al., 2010).

4.2.2 Contexto tectónico

En la zona de estudio está ubicada desde el dominio costero, hasta el frente occidental de la cordillera de la Costa, que evidencian diversos periodos de deformación paleozoica, mesozoica y cenozoica (Rivano et al., 1993).

Los lineamientos, altos topográficos y fallas de primer orden cuentan con un rumbo general NW, seguido por sistemas de fallas menores NNE y NNW. Las diversas foliaciones y deformaciones menores en las rocas volcánicas jurásicas presentan el rumbo de deformación de primer orden (Rivano et al., 1993).

En los dominios costeros y centrales se observa el sistema NWN-NW, mediante fallas normales subparalelas entre sí, y de corto trayecto, con posibles componentes de rumbo siniestral en algunos casos. Además, es posible observar el sistema NNE-NE, con el alzamiento del bloque oriental, con fallas conjugadas poco notables asociada a los otros sistemas de fallas.

Se tiene registro de zonas de deformación de gran escala al sur de la zona de estudio (Fig. 10), donde se destaca la denominada Zona de Deformación del Maipo, con continuos lineamientos NW, desde de la cordillera de los Andes, hasta la costa de la región de Valparaíso (Yañez et al., 2002; Piquer et al., 2021).

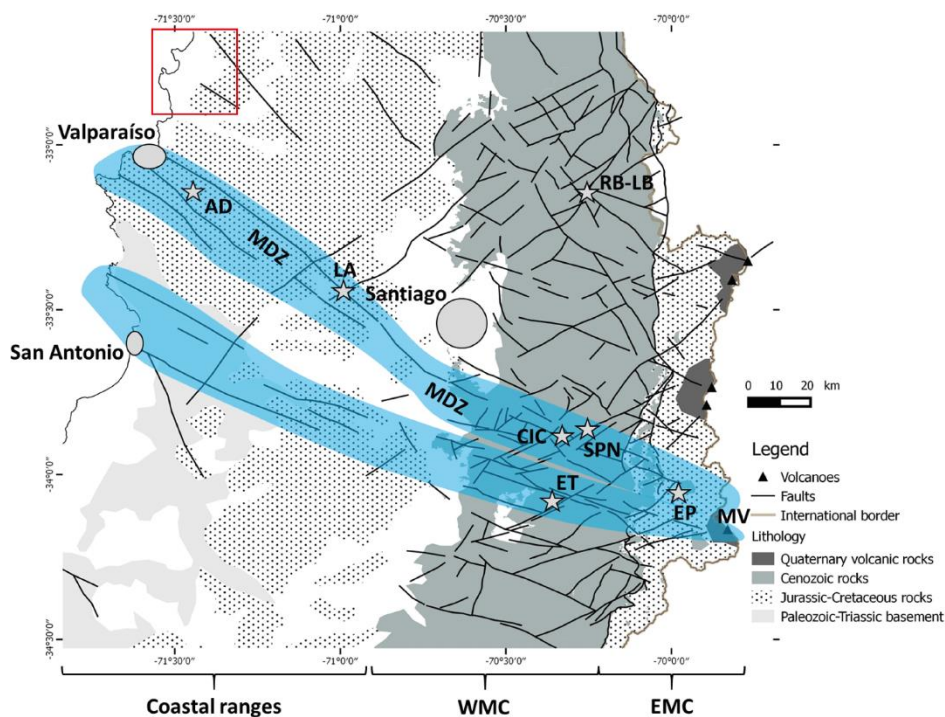


Figura 10: Mapa a escala regional de la Maipo Deformation Zone (MDZ) destacada en azul. Recuadro rojo referencia aproximada de la zona de estudio. Extraído y modificado de Piquer et al. (2021).

En esta misma región, al sur de la zona de estudio, Sabaj (2008) ha estudiado las estructuras potencialmente activas (Fig. 11), siendo los lineamientos NW y NE los predominantes, coincidiendo con la morfología del sector. Los lineamientos observados presentan características similares en la zona tratada en esta memoria.

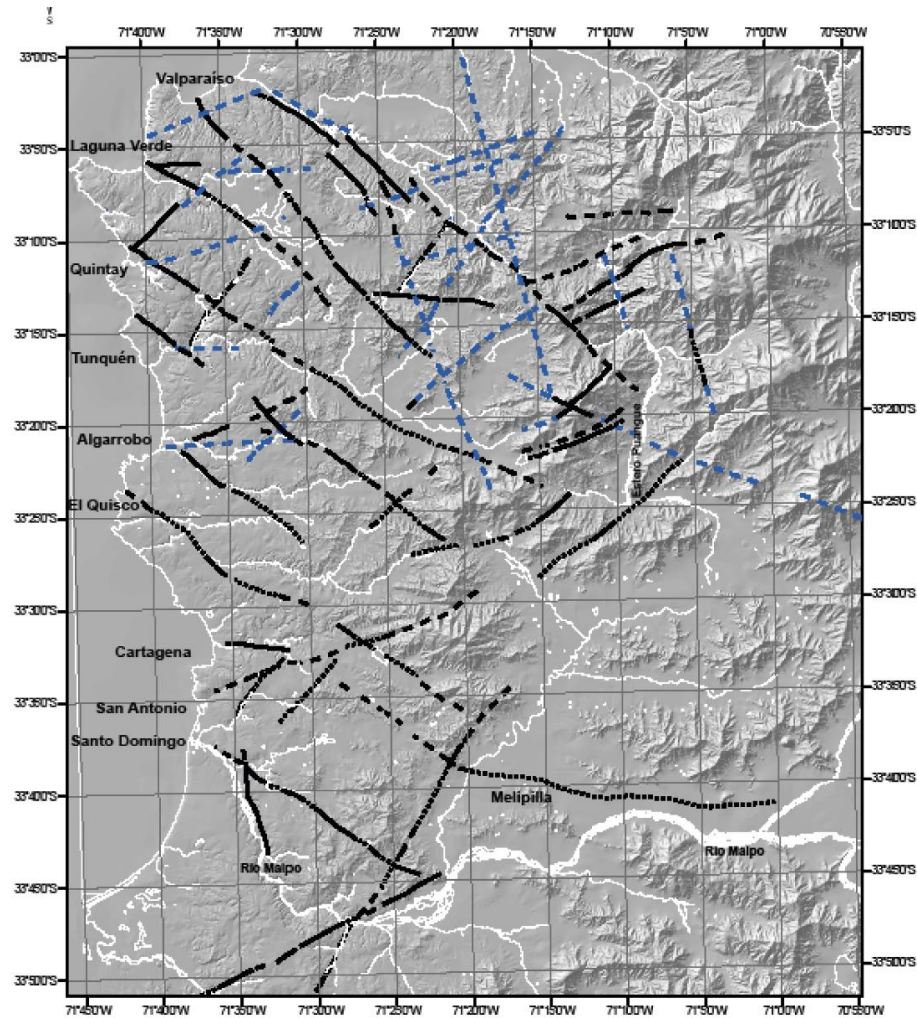


Figura 11: Fallas y lineamientos identificados al sur del área de estudio, extraído de Sabaj (2008).

4.2.3 Litoestratigrafía

A escala regional, en la zona de estudio afloran rocas plutónicas datadas del Paleozoico (Unidad Ochoa), del Jurásico Medio-Superior (Superunidad Mincha), y del Cretácico (Superunidad Illapel), que junto a rocas estratificadas volcánicas del Jurásico Inferior-Medio, forman el basamento de deposición de los sedimentos marinos y continentales del Terciario y el Cuaternario.

Los principales estudios regionales se recopilan en la Carta Geológica Quillota y Portillo (Rivano et al., 1993) de escala 1:250.000, observable en la figura 12, además de estudios de redefinición de unidades y dataciones adicionales.

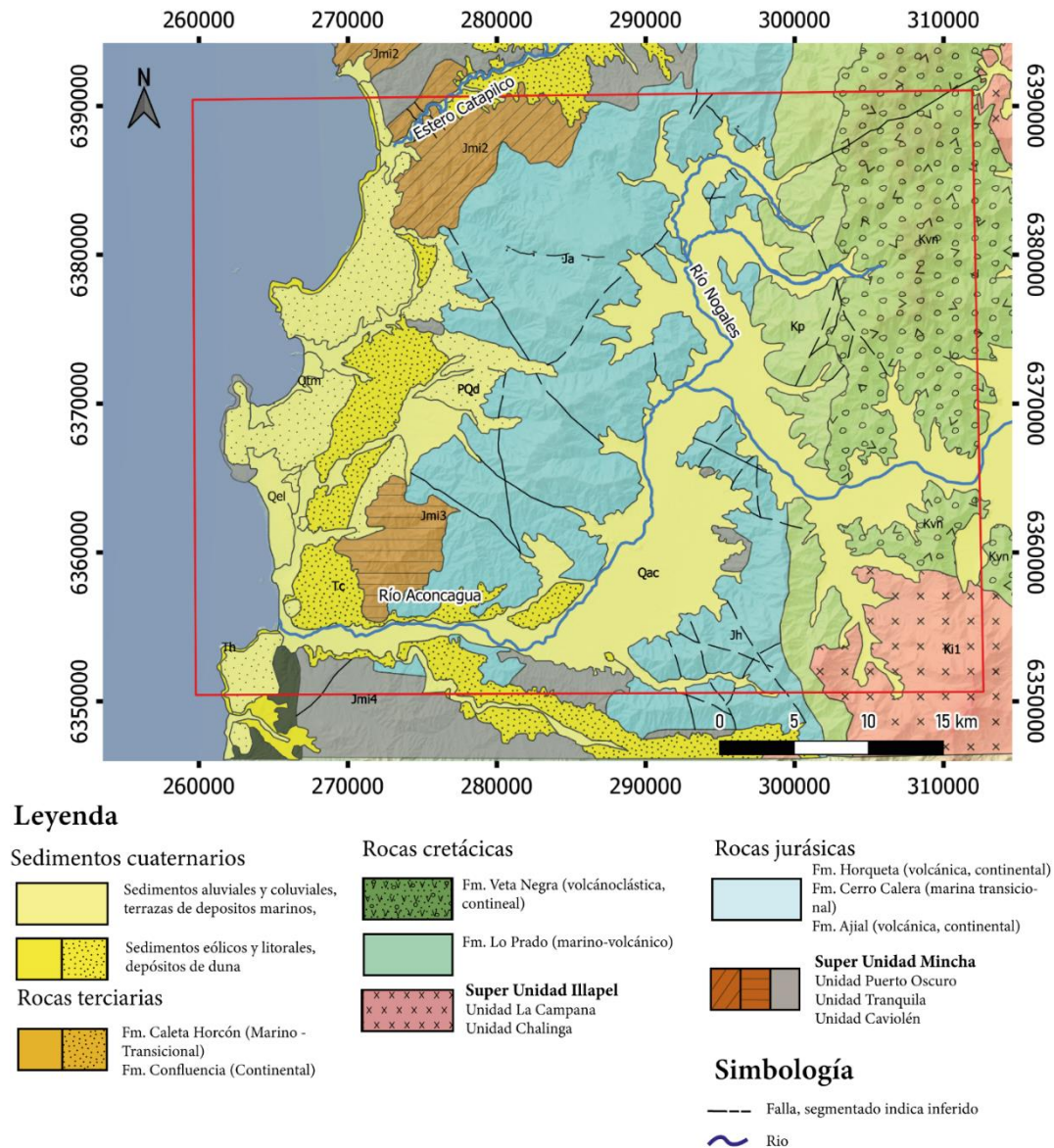


Figura 12: Mapa Geológico Regional, Modificado de Carta Geológica Quillota-Portillo, SERNAGEOMIN, RIVANO et al. (1993).

Fm. Quebrada del Pobre (Jqp) Jurásico Superior

Al norte de la zona de estudio, frente a la Caleta de Papudo, afloran rocas de procedencia clástico-marina, de conglomerados, areniscas, fangolitas fosilíferas y tobas (Rivano, 1996).

Thomas en 1958 la define como paquetes de areniscas finas, lutitas fisibles con lentes de caliza, y algunas intercalaciones de conglomerados, con algunos elementos volcánicos, de espesor aproximado de 1250m. Además, acrosas cuarcíferas gruesas en su parte inferior, con lentes de conglomerado de cuarzo, siendo estas arcosas el conglomerado basal de la transgresión marina del Jurásico Inferior. En su techo se observa una zona de transición a los queratófidos de la formación Ajjal.

Fm. Ajjal (Ja) Jurásico Inferior - Medio

Dispuestos en franja N-S, pasando gran parte por el centro del área de estudio, la Fm. Ajjal de carácter volcánico-continental, está compuesta por lavas y depósitos piroclásticos ácidos a intermedios, además de rocas metamórficas asociadas a esta misma formación (Rivano, 1996). Las lavas corresponden a traquitas y riocitas ricas en sodio, intercaladas con lavas, brechas volcánicas y lavas andesítico-basálticas. Además, en ciertas áreas presenta intercalaciones sedimentarias de arenisca, y en algunos casos lutitas y calizas (Thomas, 1958).

Su base corresponde a la transición de sedimentos marinos de la Fm. Quebrada del Pobre antes descrita, y en su techo de forma inicial fue atribuida por Thomas (1958) a las brechas y tobas intercaladas de arenisca, atribuibles a la Fm. Melón. Posteriormente, el techo corresponde a las sedimentitas marinas de la formación Cerro Calera, que reemplaza en parte a la Fm. El Melón de Thomas, de edad Bajociano medio y superior (Piracés, 1976; Rivano, 1996).

Según Piracés (1976), el espesor de la Fm. Ajjal es de 705 m en el cerro Piedra Trepada, al este de la comuna de Puchuncaví, y sólo reconociendo como Fm. Ajjal a las rocas no metamorfoseadas. Mientras que otros autores incluyen las metavolcanitas en la base de la Fm. Ajjal, dando espesores de 1405 m en la misma zona (Carrozzi, 2016).

Fm. Horqueta (Jh) Jurásico Superior.

Propuesta por Piracés en 1976, y observable en algunos afloramientos al noreste de Puchuncaví, con carácter volcánico-continental, la Fm. Horqueta corresponden a una “alternación de lavas andesítico-basálticas y niveles de brechas volcánicas y tobas riocíticas, con intercalación de rocas sedimentarias detríticas” (Rivano, 1996, p. 51).

Presenta principalmente lavas porfíricas a vitrofídicas, con 30-35% de fenocristales de plagioclasa y piroxenos. Las brechas volcánicas con niveles reconocidos de 10 m con acuñaamiento lateral, se concentran en el techo de la formación. Las tobas presentan líneas de fluidez, además de brechización desarrollada en la parte superior de cada flujo. Finalmente, las intercalaciones sedimentarias corresponden a areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados rojos con algunos niveles limolíticos. Presentan clastos volcánicos de hasta 10 cm, y matriz de los conglomerados es arenosa a limolítica, con cemento hematítico y calcareo. Piracés y Maksáev en 1977 indican que el espesor varía entre los 1200 a 2000 m.

Estudios centrados en la evolución tectonoestratigráfica en la cordillera de la costa señalan que la Fm. Horqueta, antes definida en el Jurásico medio-superior, corresponde realmente sólo al Jurásico Superior, principalmente al Kimmeridgiano, representando la migración al este de un arco magmático subaéreo (Cabrera et al., 2008; Charrier et al., 2007).

Fm. Lo Prado (Kp) Cretácico Inferior Temprano.

Propuesta por Thomas en 1958, ubicada en su mayor exposición en la Cuesta La Grupa, en la comuna de Cabildo, y dispuesta en posible discordancia angular sobre las unidades jurásicas (Rivano, 1996; Vergara et al., 1995), presenta una litología variada de principalmente rocas sedimentarias calcilutitas negras, fétidas fosilíferas intercaladas con macizos de calcarenitas grises, niveles de brechas y conglomerados oligomícticos. Además, en algunas secciones presenta intercalaciones de niveles volcánicos de andesitas afaníticas y porfíricas.

Tiene un miembro inferior marino profundo, con grauvacas, limolitas y arcillolitas. Mientras, el miembro superior conformado de sedimentitas marinas y continentales, intercalados con intrusiones subvolcánicas.

Esta formación tiene un espesor variado, de hasta 3000 m en algunos sectores, pero presenta gran variación lateral, especialmente en su miembro superior (Rivano, 1996).

Fm. Veta Negra (Kvn) Cretácico Inferior.

Definida inicialmente por Thomas (1958), de carácter volcanoclástica continental, presenta dos miembros. El miembro superior Ocoa, de lavas porfíricas andesíticas (ocoítas), con intercalación de volcarenitas, y el miembro inferior Purahue, de lavas andesíticas y brechas, con intercalaciones calcáreas hacia la base. Estas se encuentran en la cordillera de la Costa, en disposición N-S, al este de la zona de estudio, y cuentan con un contacto concordante con la Fm. Lo Prado en su base, mientras que en el techo, se tiene tanto contacto concordante como erosivo con la Fm. Cerro Morado (Boyce, 2015).

Inicialmente Piraces y Maksaeu (1977) estimaron un espesor de 6.000 m, mientras que Rivano (1996) atribuye un espesor de 4.000 a 5.000 m totales. Además, estima la potencia del miembro Purehue de 350 m en el sector norte, a la altura de Cabildo o Pedegua, a 2.000 m en el sector sur, a la altura de Purehue. Y al miembro Ocoa un espesor variable entre 2.500 a 3.000 m. Mientras que Thomas (1958) y Rivano et al. (1993) señalan el contacto superior con la Fm. Las Chilcas como concordante y gradual, Piracés y Maksaeu (1977) indican que es de tipo discordancia angular.

Su edad es definida por Rivano et al. (1993) como pre-barremiana, por relación estratigráfica y dataciones K-Ar, mientras que dataciones de Ar-Ar en plagioclasas del miembro Ocoa extienden hasta el aptiano, dando un periodo barremiano? - aptiano (Aguirre et al., 1999; Boyce, 2015).

4.2.4 Rocas Plutónicas

Unidad Cochoa (CPg). Paleozoico (Carbonífero Superior)

Principalmente entre las localidades de Concón y Reñaca, se observan tonalitas gnéissicas, granodioritas, monzogranitos y granitos de anfibola y biotita, granitos, sienogranitos y pegmatitas de microclina, con inclusiones dioríticas y enclaves máficos (Cuevas, 2017; Rivano, 1996), con una serie de filones máficos afaníticos con orientación NW o subparalelos o subverticales de composición diorítica. Son calcoalinos, metaluminosas a peraluminosas, y principalmente de tipo I.

Rivano et al. (1996) con una sola datación Rb/Sr que consiste a una errocrona de roca total en 299+-31 Ma, asignado al carbonífero superior, además de edades obtenidas por K/Ar en tonalitas de filones de 160 Ma, que son atribuidas a una homogeneización isotópica por el magmatismo jurásico. Estudios más recientes de geocronología de U-Pb y Hf-O en circones, utilizando el método SHRIMP, han determinado una edad de 311.5 +- 3.3 Ma para rocas pertenecientes a esta unidad (Deckart et al., 2014). Y por petrología, geocronología y geoquímica, se indica una similitud con la Unidad Guanta de la Superunidad Elqui del Carbonífero Superior.

Superunidad Mincha (Jmi) Jurásico

Franja más occidental de los intrusivos Mesocenoicos, y es gran porcentaje de la Cordillera de la Costa y las Planicies Litorales, con afloramientos discontinuos orientados N-S, con ancho de 15 a 30 km. Estos intruyen a rocas de la Unidad Cochoa, y a rocas del Triásico - Jurásico medio (Rivano, 1996). Conformada por 4 subunidades, con 3 dentro de la carta Quillota Portillo.

La Unidad Puerto Oscuro, se definen como dos cuerpos batolíticos de forma irregular, entre el río La Ligua por el norte, emplazado en la zona el Plutón Papudo, y el Estero La Canela por el sur, con el Plutón La Laguna, ambos separados por intrusivos de la Unidad Cavilolén. Presenta tres subunidades en la zona de estudio: (1) Las cuarzodioritas de Cachagua, ubicada en el Plutón Papudo, a lo largo del acantilado costero entre caleta Horcón y Ventanas, y corresponden a cuarzodioritas, cuarzomonzogranitos, dioritas y tonalitas de clinopiroxeno, con edades del orden de 160 a 167 Ma (Carrozzi, 2016; Rivano, 1996). (2) La subunidad Gabro de Cujas, con dos afloramientos pequeños en el sector de caleta Las Cujas, de gabros de hornblenda de color gris negro y grano grueso a muy grueso. (3) La subunidad de cuarzodioritas de La Laguna, con Plutón homónimo, que al E y SE intruye a la Fm. Ajjal. Al N es cortada por las plutonitas de la Unidad Cavilolén, que está gran parte cubiertas por sedimentos de cenozoicos. Corresponden a cuarzodioritas, cuarzomonzogranitos y subordinadamente, tonalitas y monzonitas cuarcíferas, con dataciones en el estero Catapilco de 170 +- Ma (Rivano, 1996).

La Unidad Tranquila corresponden al Plutón Mauco, a leucotonalitas intruídas por numerosos cuerpos pequeños, de composición diorítica de colores grises a negros, con evidencia en los bordes de cataclasis, y al oeste intruye roca volcánica de la Fm. Ajjal.

La Unidad Cavilolén es la más extensa de las unidades intrusivas del Jurásico, aflorando en grandes batolitos y cuerpos menores, como el Plutón Petorca – Quilimari (el más grande con 450 km²), Plutón de la Ligua, Plutón de El Melón – Catapilco, Plutón de Zapallar, Plutón Quintero, entre otros. Intruyen a todas las unidades estratificadas del Triásico – Jurásico, la unidad Cochoa, además de presentar filones dioríticos. Corresponden a granodioritas, tonalitas y algunos

monzogranitos de biotita, hornblenda y piroxeno, con dataciones de edades radiométricas entre 156 y 170 Ma.

Superunidad Illapel (Ki) Cretácico

Conjunto de cuerpos de dimensiones batolíticas a stockworks, en franja irregular de orientación N20°–30°W, de unos 20-25 km de ancho. La orientación de los cuerpos batolíticos coinciden con lineamientos y fallas, mientras que al este de Quintero, se encuentra desplazado de 15 a 20 km el bloque sur, con respecto al bloque norte, en dirección este (Rivano, 1996).

Formada por 4 Unidades, destacando la Unidad La Campana y la Unidad Chalinga encontradas dentro de la zona de estudio.

La Unidad La Campana, ubicada al oeste del Plutón Caleu, corresponde a un cuerpo de gabro y diorita subordinada de color gris oscuro a negro, con magnetita e ilmenita, con edades mínimas de K-Ar en plagioclasas de 66±8 Ma.

La Unidad Chalinga, que corresponde a un 95% de la Superunidad Illapel, está conformada por dioritas a sienogranitos, con predominancia de facies granodioríticas de hornblenda y biotita a tonalitas, y en menor proporción monzonitas y monzodioritas cuarcíferas con texturas hipideomórficas inequigranulares. Asociado a esta unidad, en el sector del valle del río Aconcagua, aparecen facies de dioritas y/o metandesitas de facies transicionales. Tiene edades principalmente K/Ar que señalan un emplazamiento en el Cretácico Inferior hasta el Cenomaniano (Rivano, 1996).

Dataciones más recientes han permitido reagrupar miembros de la Superunidad Illapel, posibilitando la separación de entre intrusivos del Cretácico Temprano y del Cretácico “Medio” (Boyce, 2015; Molina, 2014; Morata et al., 2010).

4.2.5 Rocas y Depósitos Cenozoicos

Fm. Horcón (Th) Mioceno? – Plioceno

Corresponden a los sedimentos semi-consolidados que aparecen a lo largo del acantilado costero, entre Maitencillo y Horcón, extendiéndose hasta las faldas de los cerros al este de Puchuncaví (Thomas, 1958), además del acantilado costero entre Viña del Mar y Concón, e incluso de cortes de quebradas y esteros en las planicies litorales entre el río Aconcagua y Catapilco. Estos cubren con discordancia erosiva a unidades más antiguas estratificadas e intrusivas, y son cubiertas por depósitos eólicos cuaternarios y/o pleistocenos (Rivano, 1996). Se encuentran depositados de forma casi horizontal, y está formado principalmente por areniscas, en partes arcillosas, limolitas y arcillolitas, con menores intercalaciones de conglomerados y coquinas.

Esta formación tiene un gran contenido fósil, siendo identificados más de 60 taxas, con edades desde el mioceno, al plioceno tardío (Carrillo-Briceño et al., 2013; Chávez Hoffmeister et al., 2014), y mientras que Rivano (1996) atribuía un espesor entre 50 y 80m, estos últimos autores han estimado un espesor de 45 m, desde el basamento discordante, hasta el tope de la misma, con un buzamiento de 2 a 3°.

Fm. Confluencia (Tc) Mioceno? – Plioceno?

Corresponde a una secuencia de gravas y ripios con intercalación de arenas poco consolidadas, distribuidas en terrazas altas y con potencia de 50 a 100 m, distribuidas parcialmente concordante con sistema hidrográfico actual. No presenta contenido fósil, y al presentar relaciones de pasaje lateral con la Formación Horcón, se le atribuye una edad similar.

Sedimentos eólicos antiguos o paleodunas (PQd) - Unidad Informal

Reconocibles a través de toda la costa de la región de forma discreta, forman superficies suavemente onduladas, depositadas por sobre la Fm. Horcón, y las distintas unidades mencionadas anteriormente. Corresponden a arenas poco consolidadas, ocres muy bien seleccionadas, con estratificación cruzada frecuentemente. Varían su espesor de cm hasta alrededor de 10 m, como las paleodunas entre Pichicuy y Longotoma (Rivano et al., 1993).

Por su orientación siempre asociadas a sotavento de playas, y al norte de las puntas, se asocian principalmente a vientos de dirección NNE, y están directamente relacionadas a gravas finas y arenas aluvionales PQd(a). Se le asigna una edad Plioceno – Pleistoceno, al cubrir la Fm. Confluencia, al igual que las Paleodunas.

Terrazas de depósitos marinos (Qtm) sin sedimentos – Unidad Informal

Las terrazas de depósitos marinos corresponden a una unidad morfológica, y están formadas por pequeñas terrazas en Cachagua y Quintero. Labradas sobre roca sedimentaria poco consolidada marino-litorales, de extensión reducida, y cubiertas por las paleodunas. Pueden corresponder a la Fm. Horcón. Afectan a las Paleodunas (PQd) por su ubicación (Rivano, 1996).

Sedimentos Cuaternarios no consolidados (Qel, Qac) – Unidades Informales

Los sedimentos eólicos y litorales recientes (Qel) corresponden a acumulaciones costeras bajo la forma de playa, al norte de las puntas con acantilados, en las bahías protegidas de los vientos NNE predominantes de la costa, acumulando la arena, en las cercanías de las salidas de los grandes afluentes, siendo el caso de la playa de la Bahía de Quintero, al norte de la desembocadura del río Aconcagua. Se aprecia tanto en playas como dunas la forma de media luna parabólica, de tipo barján, características de dunas crecientes (Rivano, 1996).

Los sedimentos aluviales, coluviales y de relleno de valle (Qac) se asocian directamente a los cursos de agua actuales, siendo la más grande y característica de la zona, en la Hoya del río Aconcagua, al sur de la comuna de Quintero, y está formada por gravas y ripio de regular a mal estratificado, con arena y limo de buena estratificación, con evolución año a año.

4.3 Hidrogeología

4.3.1 Cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas principales, delimitadas por la DGA, corresponden a la cuenca del río Aconcagua, en la subcuenca del “Aconcagua Bajo”, la cuenca costera entre los ríos La Ligua y Aconcagua, en las subcuencas “Costeras entre Estero Catapilco y Río Aconcagua” y “Estero Catapilco”, observables en la Figura 13A y 13B.

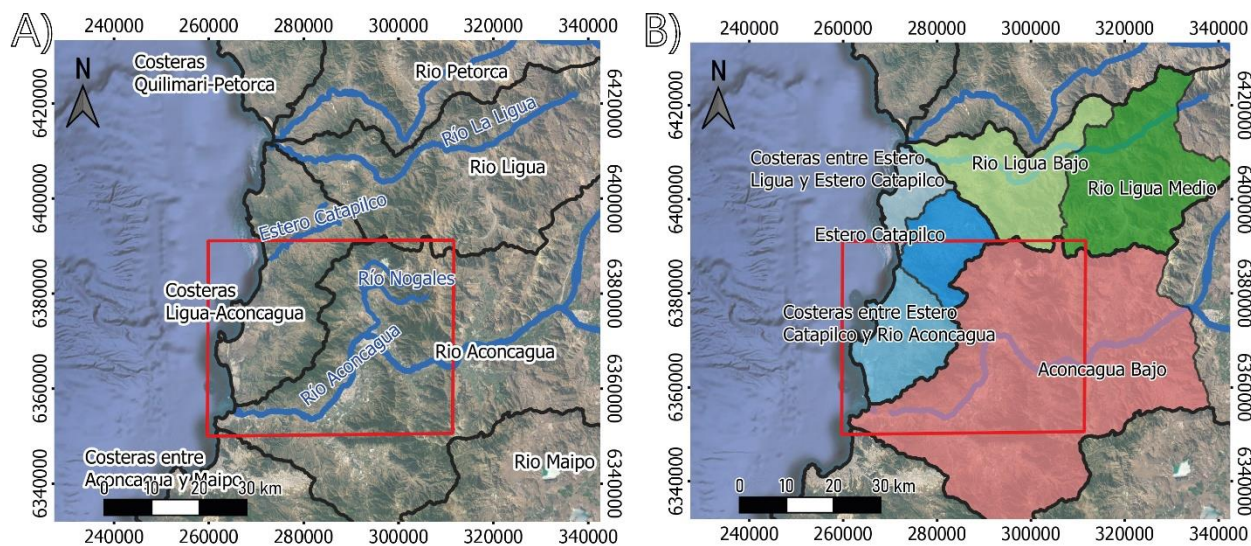


Figura 13: A) Mapa División Cuencas DGA. B) Misma área con División Subcuencas DGA. En línea roja recuadro de la zona de estudio

Es posible observar la extensión superficial de las diversas subcuencas, además de subcuencas aledañas que forman la cuenca del río La Ligua, y la subcuenca costera entre esta última, y el estero Catapilco, en la Tabla 4.

Tabla 4: División Subcuencas, con áreas respectivas

Codigo Cuenca	Codigo Subcuenca	Subcuenca	Area Km2
52	520	Río Ligua Alto	530.96
52	521	Río Ligua Medio	859.89
52	522	Río Ligua Bajo	589.21
53	530	Costeras entre río Ligua y Estero Catapilco	161.61
53	531	Estero Catapilco	299.10
53	532	Costeras entre Estero Catapilco y Río Aconcagua	389.76
54	540	Aconcagua Alto	1959.36
54	541	Aconcagua Medio	2748.80
54	542	Aconcagua Bajo	2625.65

El río Aconcagua principal afluente de la zona, cuenta con un régimen pluvio-nival, observando las mediciones de Caudal en la estación Río Aconcagua en Romeral (Fig. 14). Se detallará en el capítulo de *Resultados y Discusión* de Caudal.

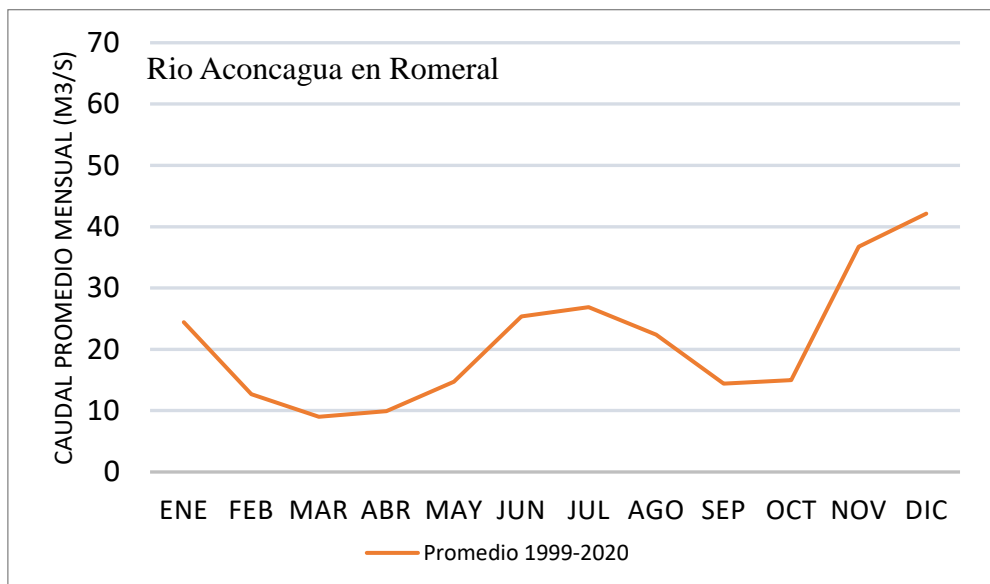


Figura 14: Caudal Promedio Mensual, en estación Río Aconcagua en el Romeral, entre 1999 y 2020.

El río Aconcagua se forma de la Confluencia de los ríos Juncal y Blanco, y recibiendo una serie de aportes de distintos ríos. Continuando en la parte andina, se suma el aporte del río Colorado por el norte, y al ir aguas abajo, en el valle central, se suman los aportes del río Putaendo, estero Quilpué o San Francisco y el estero Pocuro.

En su curso medio, se suman esteros de régimen pluvial, como los esteros Catemu, El Melón, Lo Campo, Los Loros y Las Vegas, y en su parte inferior, recibe a los esteros Rautén y Limache, siendo esta última una cuenca regulada por embalse Los Aromos. Finalmente, luego de 190km aproximados de recorrido, descarga en el Océano Pacífico, en la ciudad de Concón (DGA, 2020).

4.3.2 Estaciones DGA

En la zona de estudio se identificaron diversas estaciones meteorológicas y pluviométricas, además de pozos con mediciones de niveles estáticos de aguas subterráneas. Estos datos serán analizados en la sección de Resultados y Discusión.

Se analizaron 8 estaciones meteorológicas con información disponible de la DGA (Tabla 5), en el área de estudio comprendida en la Cuenca Costera entre río Aconcagua y río la Ligua, además de la Subcuenca del Aconcagua Bajo (Fig. 15).

Tabla 5: Estaciones pluviométricas DGA, más parámetros medidos

Nombre Estación	Cod. BNA	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Elevación (m.s.n.m.)	Parámetros Medidos
		WGS84 19S	WGS84 19S		
LOS AROMOS	05427007-0	6350896	280800	100	Pp y °T
QUILLOTA	05426004-0	6358074	293618	130	Pp y °T
EL COBRE	05424005-8	6384988	293993	280	Pp
ESTERO QUINTERO EN VALLE ALEGRE	05320001-K	6368492	273644	40	Pp
ESTERO RABUCO	05423013-3	6362964	301556	300	Pp
LAGUNA DE ZAPALLAR	05310001-5	6387860	274127	50	Pp
LO ROJAS	05425003-7	6367129	289306	190	Pp
RIO ACONCAGUA EN ROMERAL	05423003-6	6364620	310430	365	Pp

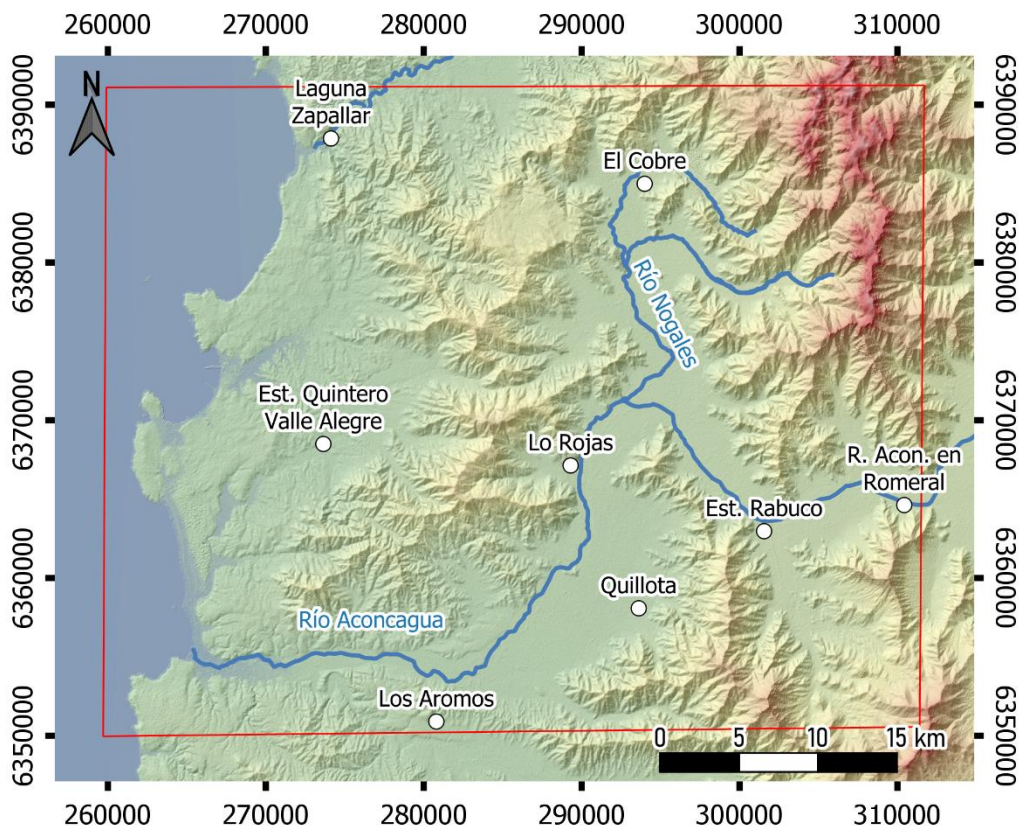


Figura 15: Mapa de estaciones pluviométricas de la DGA.

Además, se estudiaron 4 estaciones fluviométricas (Tabla 6, Fig. 16), ubicadas en la misma área.

Tabla 6: Estaciones fluviométricas DGA, más periodo de registro

Nombre Estación	Cod. BNA	UTM Norte (mts):	UTM Este (mts):	Elevación (msnm)	Registro Desde	Registro hasta
ESTERO QUINTERO EN VALLE ALEGRE	05320001-K	6368492	273644.0	40	1/7/1997	1/12/2019
CANAL LAS VEGAS EN BOCATOMA	05423001-K	6364579	310396.0	320	1/1/1982	1/1/2021
ESTERO CATEMU EN PUENTE SANTA ROSA	05421002-7	6371559	314805.0	510	1/1/1985	1/6/2019
RIO ACONCAGUA EN ROMERAL	05423003-6	6364620	310430.0	365	1/3/1999	1/1/2021

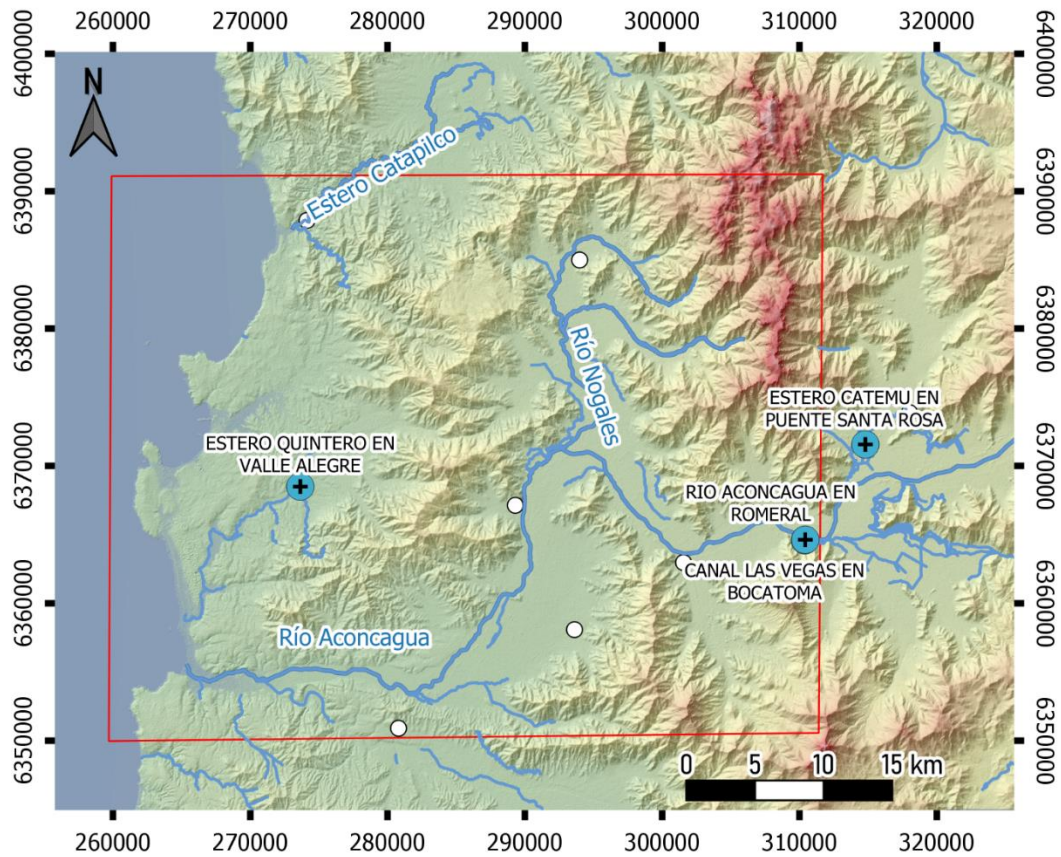


Figura 16: Mapa de estaciones fluviométricas, en círculo azul con cruz negra. Estación “Río Aconcagua en Romeral” y estación “Canal Las Vegas en Bocatoma” comparten punto aproximado, al estar a 50m de distancia.

4.3.3 Derechos de agua consuntivos

El código de aguas define los derechos de agua consuntivo como “...aquel que faculta a su titular para consumir totalmente las aguas en cualquier actividad...” (Ley 1122, Art.12, 1981), por lo que siempre es recomendado un monitoreo constante de los derechos otorgados, especialmente para evaluar las posibles repercusiones en un balance hídrico general.

A partir de los derechos de aprovechamiento de aguas registrados en la DGA, para la Región de Valparaíso, se unificaron los sistemas de referencia, y las unidades medidas de la zona, obteniendo el mapa de derechos consuntivos de agua subterránea (Fig. 17).

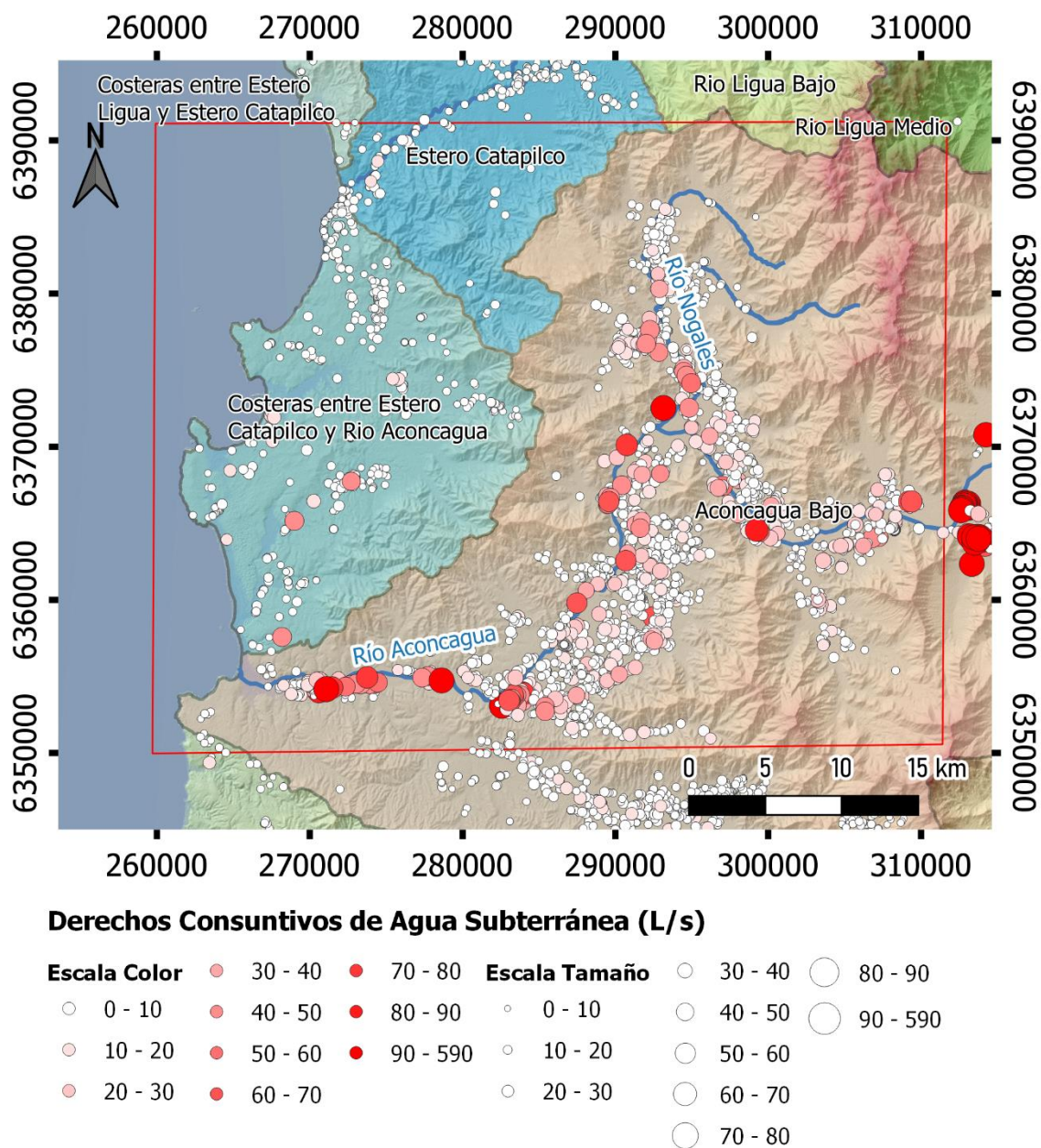


Figura 17: Mapa de los derechos consuntivos de agua subterránea otorgados por la DGA. A) derechos otorgados hasta 2009, y en B) derechos otorgados hasta 2020.

Se evidencia una concentración de los derechos de agua, en las cercanías del cauce de los ríos y esteros principales, siendo el relleno sedimentario del cauce del río Aconcagua, la zona con mayor carga hídrica antrópica, además de un aumento considerable en los derechos otorgados para toda la cuenca.

Para la cuenca baja del río Aconcagua (Fig. 18), se tiene un total de 3260 concesiones de derechos consuntivos de agua subterránea, que evidencian un aumento abrupto desde el año 2002, pasando de 2.945 L/s, a 12.272 L/s en 2009, traducido en un aumento de un 320% en tan solo 7 años. Mientras que para el año 2020, los derechos otorgados rondan los 25.707 L/s, es decir, se duplicaron en los últimos 10 años.

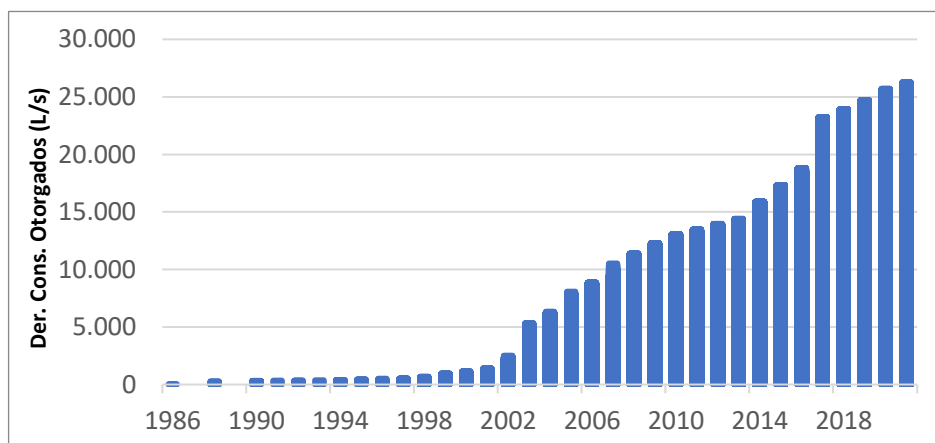


Figura 18: Derechos consuntivos acumulados de agua subterránea otorgados para la cuenca baja del río Aconcagua, desde el año 1986 al 2020.

En la cuenca costera entre el estero Catapilco y el río Aconcagua (Fig. 19), que cuenta con un total de 501 derechos otorgados, se evidencia la misma tendencia en los derechos consuntivos de agua subterránea otorgados para la cuenca baja del río Aconcagua.

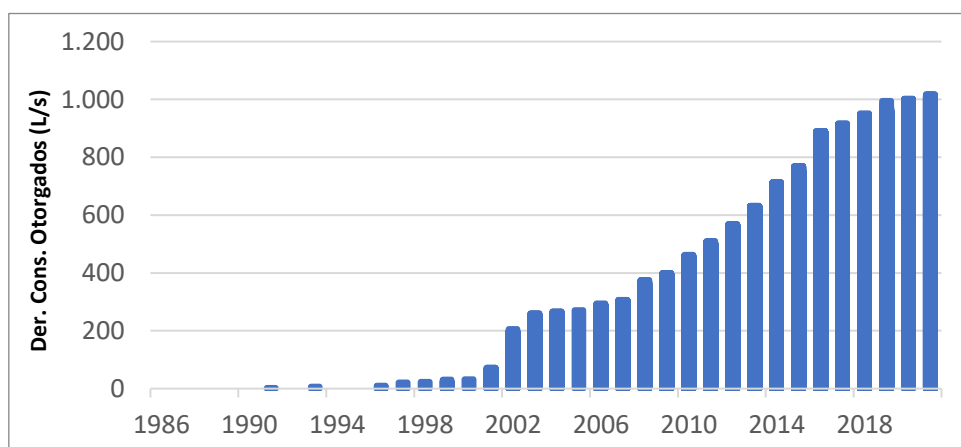


Figura 19: Derechos consuntivos acumulados de agua subterránea otorgados para la cuenca costera entre estero Catapilco y río Aconcagua, desde el año 1986 al 2020.

Se observa un aumento considerable desde el año 2002 (Fig. 19), pasando de 74.4 L/s otorgados, a 399.5 L/s en el año 2009, un aumento de un 430%. Mientras que al año 2020 se contabilizaron un total de 1.002.8 L/s, traducido en un aumento de 150% en los últimos 10 años.

Al analizar información adicional cuenca arriba del río Aconcagua (Desde estación El Romeral), extrayendo datos del Explorador de Cuencas del “Center for Climate and Resilience Research” (CR)² (Alvarez-Garreton et al., 2018), se evaluaron los derechos de agua consuntivos subterráneos y superficiales para la cuenca media y alta del Río Aconcagua.

Tanto para los derechos superficiales como subterráneos ha sido constante el aumento en la cantidad de L/s otorgados de parte del estado, pero presentan variaciones significativas.

Para el caso de los derechos subterráneos (Fig. 20), se ha registrado un aumento más acelerado, al incremento de la necesidad del recurso. Mientras que en el año 2000 se tenían otorgados sólo 3.628 L/s, para el año 2010 se había casi triplicado los derechos otorgados, con 9.266 L/s, mientras que para el año 2020 se tiene un total de 18.715 L/s, es decir, un aumento de 104% en los últimos 10 años.

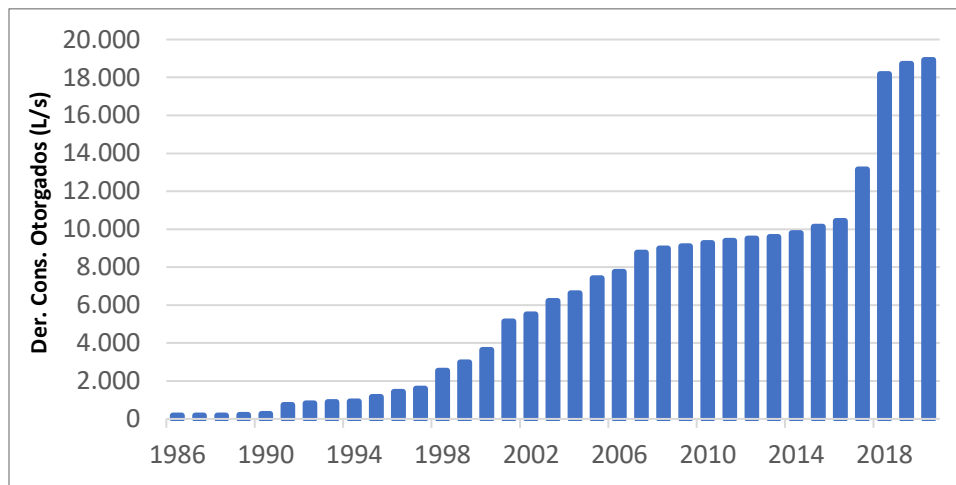


Figura 20: Derechos consuntivos acumulados de agua subterránea otorgados para la cuenca media y alta del río Aconcagua, desde el año 1986 al 2020.

Para el caso de los derechos superficiales (Fig. 21), el año 2009 se tenía un total de 89.907 L/s otorgados como derechos consuntivos, mientras que en el año 2020 se llegó a un total de 100.911 L/s, es decir, un aumento del 12% en los derechos otorgados entre estos años.

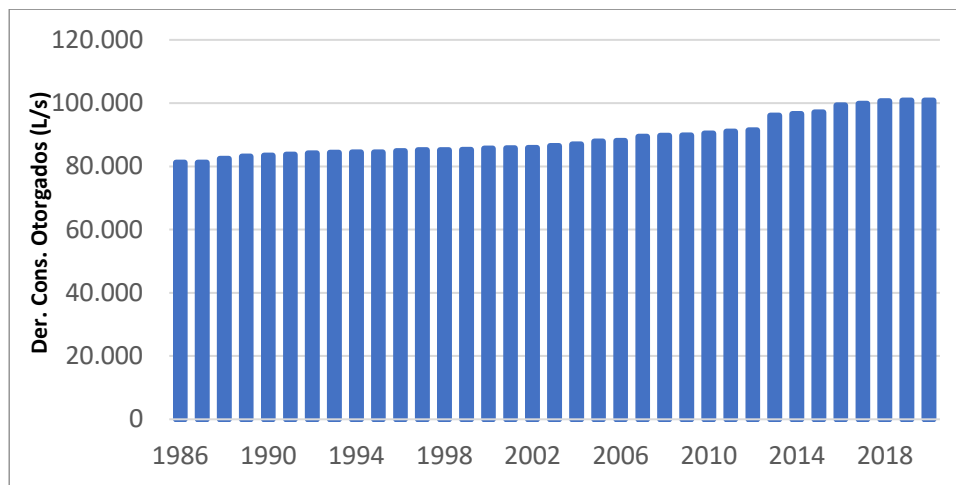


Figura 21: Derechos consuntivos acumulados de agua superficiales otorgados para la cuenca media y alta del río Aconcagua, desde el año 1986 al 2020.

5. Resultados y Discusión

5.1 Análisis Hidrogeológico

Durante los últimos 10 años, Chile central ha estado bajo un periodo de consecutivas sequías, con descensos en las precipitaciones del orden de 20 a 40%, con respecto a los periodos anteriores (CR2, 2015; Garreaud et al., 2020). Esta seguidilla de años secos es el tiempo más prolongado con estas características, desde 1914 (Fig. 22), afectando directamente en una disminución en el agua disponible, la vegetación y un aumento significativo en los incendios forestales.

Este periodo está potenciado por un factor natural, producto de la oscilación del pacífico por década (PDO) que causa un aumento de las temperaturas en el pacífico subtropical del sudoeste, con una disminución de las precipitaciones notoria en periodos de El Niño Southern Oscillation (ENSO), y un factor antrópico, asociado a la polaridad positiva de la oscilación antártica, que afecta directamente al cinturón de vientos de baja presión del oeste, atribuidos en parte al cambio climático, y el aumento de gases de efecto invernadero (Garreaud et al., 2020).

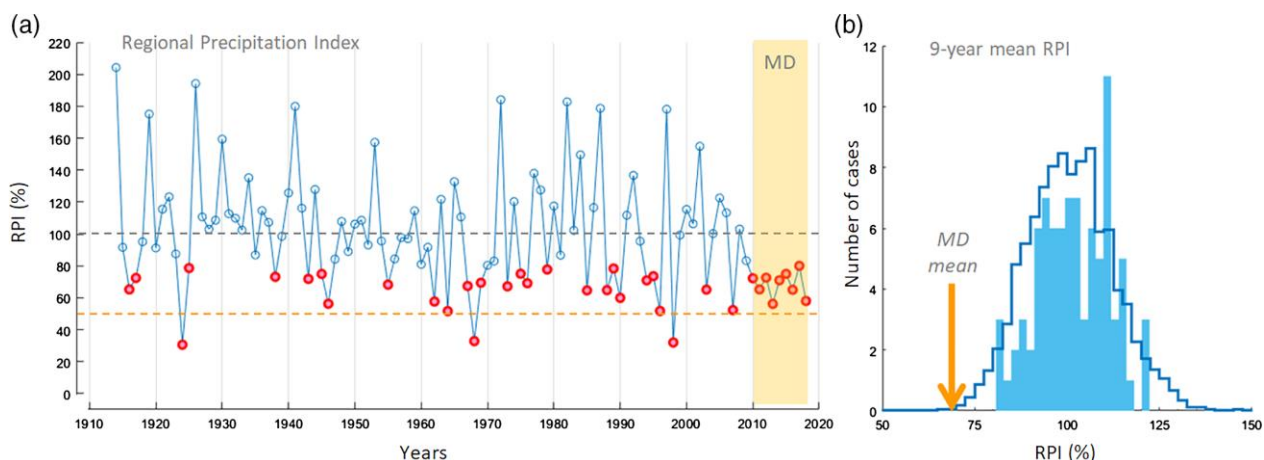


Figura 22:a) Registro del índice de precipitaciones regional (RPI), para Chile central. MD (megasequía por sus siglas en inglés), siendo definida una sequía para un periodo con RPI <80%. b) Histograma de 9 años promedio de RPI. Extraído de Garreaud et al (2020).

Estimaciones para cuantificar el aporte de cada uno de estos factores a la disminución de las precipitaciones, señalan que aproximadamente un cuarto del déficit es atribuible a un factor antrópico (Boisier et al., 2016), con proyecciones a 2050 de déficit del 15 al 20% de las precipitaciones medias.

En la cuenca alta del río Aconcagua estudios recientes han mostrado la relación entre la sequía, las disminuciones en los caudales y en los niveles piezométricos (Taucare et al., 2020). Además, han mostrado como al disminuir la disponibilidad de aguas superficiales han incrementado los derechos otorgados en las aguas subterráneas.

Estas relaciones se ven reflejadas también en el área de estudio de la presente memoria, siendo evidenciadas y analizadas a continuación.

5.1.1 Precipitaciones y temperatura

Las precipitaciones de la zona de estudio fueron analizadas a partir de las 8 estaciones antes mencionadas (Fig. 15), y graficadas en promedio mensual para los periodos 1980-2019, en función de la disponibilidad de datos, y un segundo periodo, entre 2010-2019, generando climogramas de evolución mensual (Fig. 23).

Estos datos obtenidos corresponden al periodo general de precipitaciones desde el año 1980 al 2020, en función del periodo de la disponibilidad de datos de las estaciones pluviométricas, siendo detalladas las precipitaciones medias anuales en la tabla 7.

Al evaluar estas variaciones en las precipitaciones, se evidencia que en todas las estaciones estudiadas registran una disminución mínima del 20%, y una máxima del 40%, entre la última década de registro, y las décadas previas (Fig. 23 y Tabla 7).

Tabla 7: Precipitaciones Medias en Estaciones Pluviométricas, para dos periodos, más disminución de precipitación porcentual periodo 2010-2019 con respecto a periodos anteriores.

Nombre Estación	Precipitaciones				
	Registro Desde	Registro hasta	PP Media Anual InicioReg-2009	PP Media Anual 2010-2019	Disminución Porcentual PP Media
LOS AROMOS	1/1/1980	31/10/2020	407.8	286.2	-29.8%
QUILLOTA	1/1/1980	31/12/2019	328.2	207.5	-36.8%
EL COBRE	1/5/1989	31/09/2020	329.9	264.4	-19.9%
ESTERO QUINTERO EN VALLE ALEGRE	1/1/2010	31/09/2020	Sin Reg	211.6	
ESTERO RABUCO	1/1/1980	31/09/2020	390	266.8	-31.6%
LAGUNA DE ZAPALLAR	1/7/1987	31/08/2020	304.4	223.1	-26.7%
LO ROJAS	1/1/1980	31/09/2020	387.7	263.7	-32.0%
RIO ACONCAGUA EN ROMERAL	1/5/2002	31/10/2020	286.5	173.6	-39.4%

Los valores medidos de la disminución de precipitación registrados en la zona de estudio (Tabla 7), se encuentran en el rango de los descensos registrados por Garreaud et al (2020), y son también similares a los resultados obtenidos en la cuenca alta del río Aconcagua, por Taucare et al (2020).

Todas las estaciones registran precipitaciones menores a los 300 mm/año, con disminuciones de 65 mm/año a 124 mm/año, mayores al escenario más adverso planteado por Luebert y Pliscoff (2012), y pérdidas porcentuales aproximadas de un 20% a un 40%, siendo las estaciones a las cercanías de la cuenca del río Aconcagua las que registran mayor pérdida (Fig. 24).

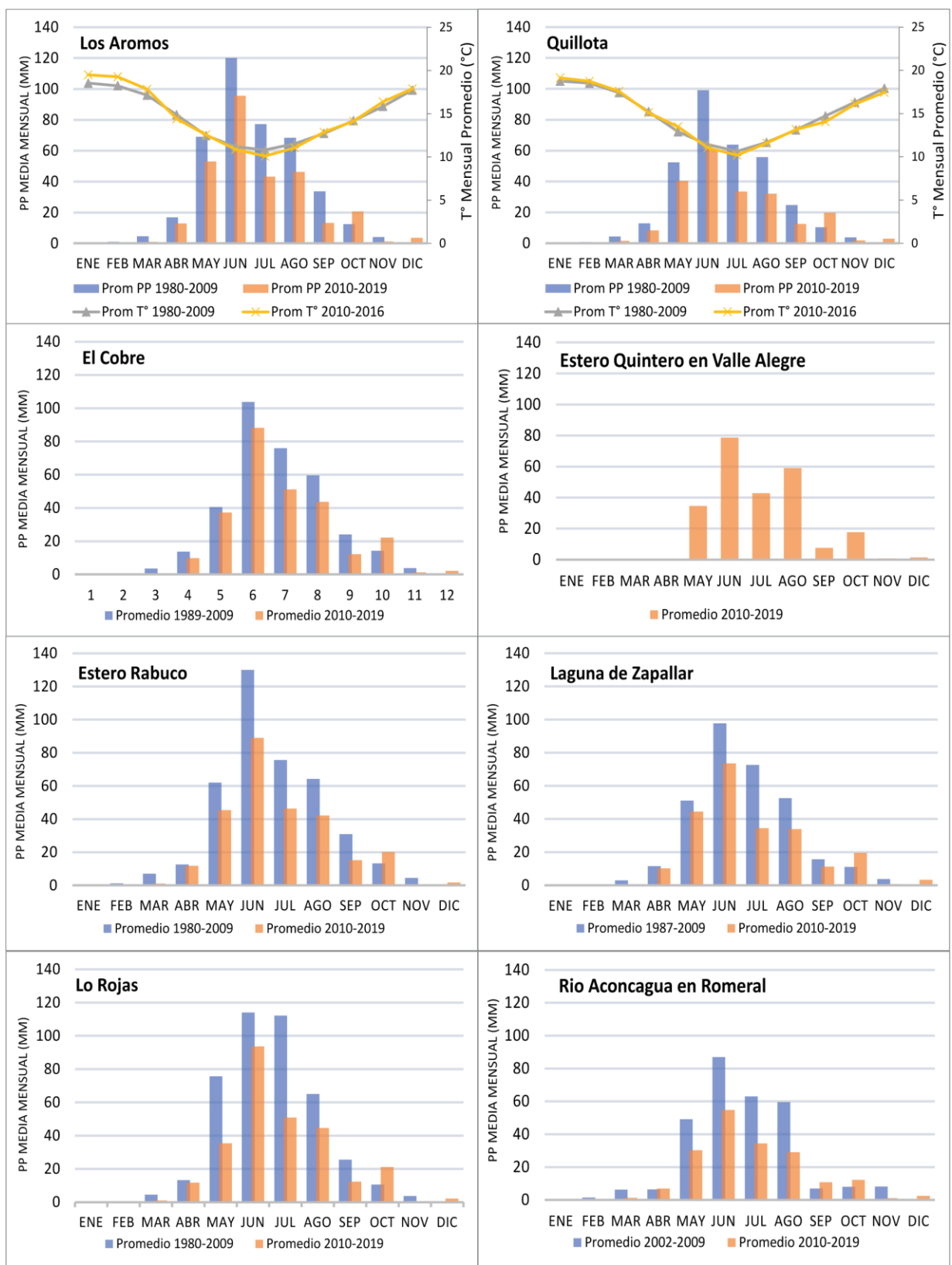
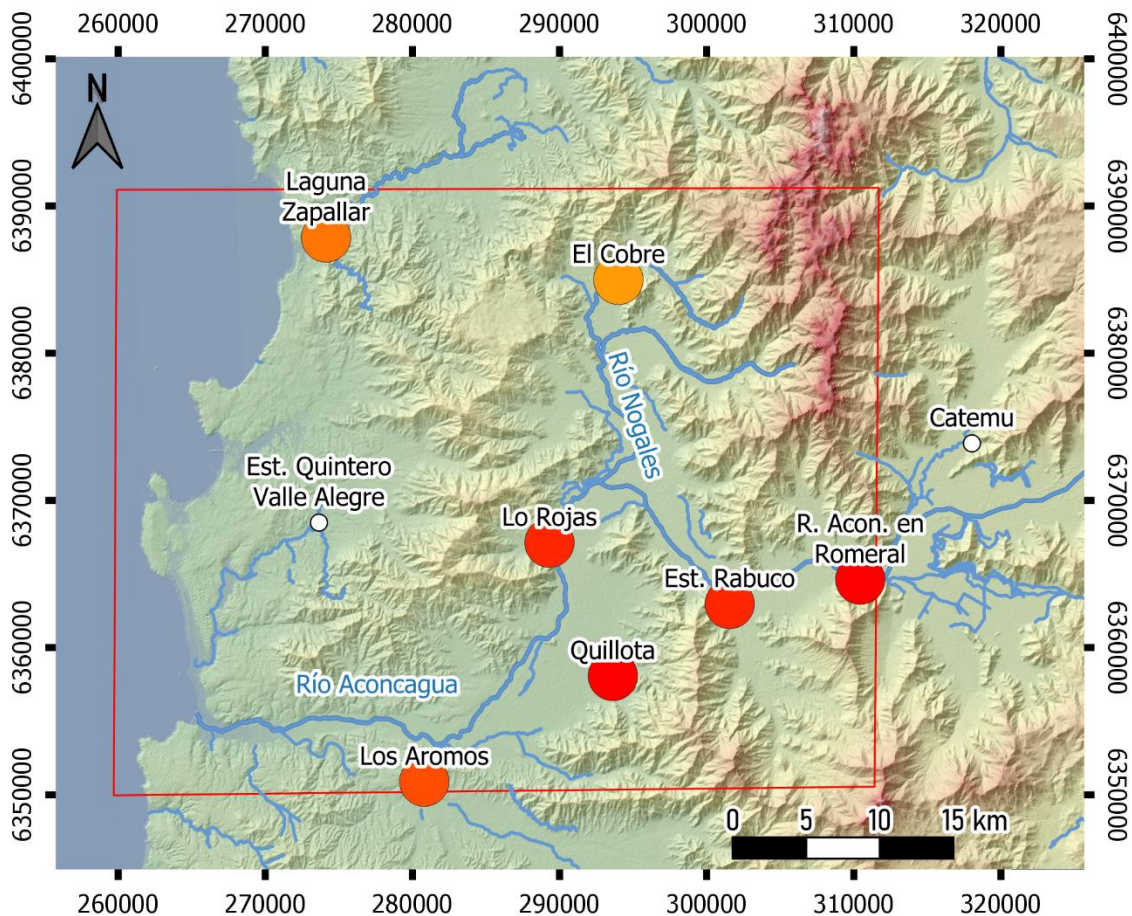


Figura 23: Promedios mensuales de precipitación por estación, para periodo pre-2009 (En función de datos disponibles) y 2010-2019.



Perdida Porcentual Precipitaciones

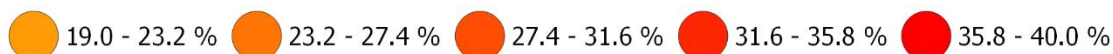


Figura 24: Mapa de pérdida de precipitación media anual porcentual, entre el periodo 1990-2009 y el periodo 2010-2020.

El registro de temperaturas es escaso e incompleto, sólo dos estaciones cuentan con estos datos. Los datos analizados (Tabla 8) no presentan una variación significativa de las temperaturas en el tiempo.

Tabla 8: Temperaturas Medias en Estaciones Pluviométricas, para periodo 1990-2009, y post 2010.

Nombre Estación	Cod. BNA	Cod. En Mapa	Temperaturas				
			Registro Desde	Registro Hasta	T° Media 1990 - 2009	T° Media Anual post 2010	Porcentaje T° Ultimo Periodo
LOS AROMOS	05427007-0	1	1/1/1990	12/31/2012	14.97	14.74	98.46%
QUILLOTA	05426004-0	2	1/1/1990	12/31/2016	14.92	14.8	99.20%

5.1.2 Caudal

Se analizaron las 4 estaciones fluviométricas antes mencionadas (Fig. 16), para los periodos pre 2009, y 2010-2020, en función de la disponibilidad de datos.

Además, se definió el régimen del río, en función la fuente de alimentación de sus cauces, siendo pluviales, nivales o mixtos. Para la zona central del país, los meses de mayor precipitación corresponden entre mayo y julio, y el periodo de mayores deshielos durante los meses de noviembre a febrero.

Esto permitió establecer la fuente de alimentación de los afluentes, como son las lluvias o derretimiento de nieves, y entender las variaciones de caudal a lo largo del tiempo.

Río Aconcagua

Para el río Aconcagua, principal curso de agua de la zona de estudio, en la última década se observa una disminución del caudal registrado (Fig. 25). Mientras que en el periodo 1999-2009 presentaba un caudal anual promedio de 31.09 m³/s, en la última década se registra un caudal anual promedio de 8.9 m³/s, lo que corresponde a una disminución del 71% del caudal anual.

Se observó que antes del 2010 (Fig. 24), se presentaba un régimen mixto con meses de mayor caudal entre noviembre y enero, correspondientes al deshielo de las altas cumbres de la cordillera de los Andes. Esto cambió en la última década, con peak de caudal durante los meses de mayor precipitación, disminuyendo el caudal en las temporadas de deshielo.

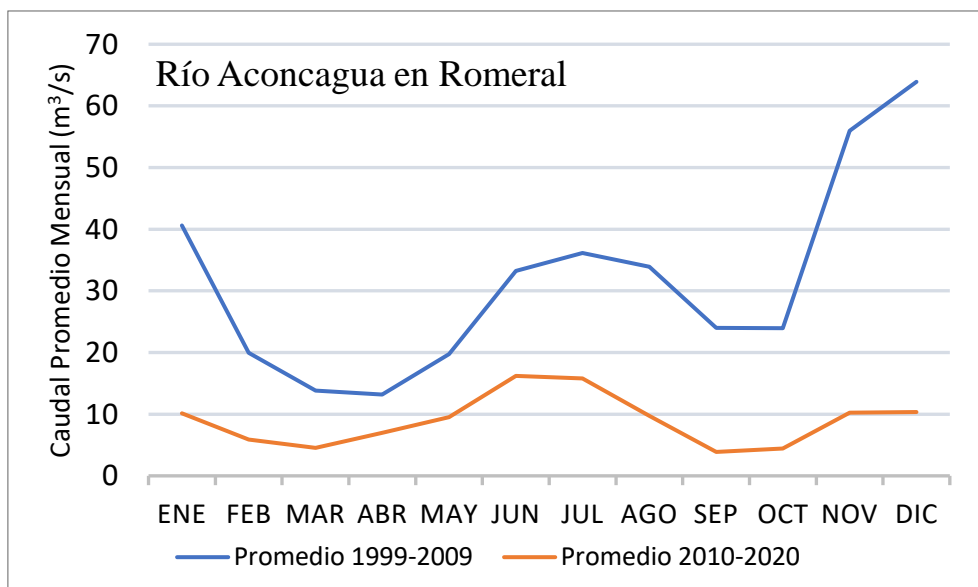


Figura 25: Caudal promedio mensual (m³/s) para estación “Río Aconcagua en Romeral”. En Azul periodo 1999-2009, y en naranja periodo 2010-2020.

El río Aconcagua se forma de diversos tributarios que nacen en la alta cordillera de los Andes, como el caso del río Juncal que presenta contribuciones del 50% de su caudal de parte del derretimiento de nieves y glaciares de la zona (Schaffer et al., 2019).

Los pronósticos de los caudales de deshielo para la temporada de riego (DGA, 2021) han evidenciado que la constante disminución de las superficies glaciares, y la disminución de la nieve

caída por temporada, afectará directamente los caudales en los meses de mayor necesidad hídrica, pronosticando para el río Aconcagua, en la temporada septiembre-marzo 2021-2022, en el sector de Chacabuquito, caudales de 368M m³, siendo el promedio para la temporada de 696M m³, es decir, un déficit del 45%.

Por su parte, los descensos de precipitación en toda la zona central afectan de manera directa la cantidad de agua que circula por los cauces principales. Los descensos de 20-40% en las precipitaciones para la zona central (Garreaud et al., 2020) no hacen más que disminuir la cantidad de agua disponible, afectando tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas.

Si bien, el uso de suelo a nivel regional, entre el año 2001 y 2013, indica una disminución de 15.100 ha en la superficie monitoreada a terreno agrícola, se tiene un aumento de 382.728 ha catastradas de bosques, tanto de tipo plantación, nativo o mixto (CIREN, 2013), intensificando el conflicto por el agua asociado a un cambio en los cultivos.

Finalmente, al evaluar los derechos de agua subterránea otorgados para la cuenca baja del río Aconcagua, se observa un aumento desde 12.272 L/s en 2009, hasta 26.271 L/s en 2020. Mientras que para la cuenca alta del Aconcagua, pasaron de 9.276 L/s a 18.715 L/s, en el mismo periodo estudiado. Estos valores sólo hacen referencia al consumo legal de agua subterránea, que en el caso de Chile central, representa sólo un porcentaje del agua consumida.

Todo lo expuesto es la suma de factores que conlleva la disminución de los caudales observada, es decir se suma tanto el factor climático como el antrópico. Lo anterior es corroborado por la baja general en las precipitaciones, la disminución significativa de la acumulación de nieves y hielos que alimentan los caudales de deshielo en las temporadas de mayor temperatura, y en el aumento de la presión antrópica, mediante el incremento de extracción de agua superficial y subterránea.

Estero Quintero en Valle Alegre

Para el Estero Quintero en Valle Alegre, que se encuentra dentro de la Cuenca Costera entre río Aconcagua y río La Ligua, presentó caudales en los meses de junio a septiembre (Fig. 26), característicos de los meses de precipitación registrados en la estación homónima, dando un régimen de caudal pluvial.

A pesar de contar con precipitaciones promedios de hasta 80 mm, el caudal promedio del estero ha disminuido en los últimos 10 años, pasando de 0.16 m³/s promedio anual, a un caudal de 0.03 m³/s promedio anual, correspondiente a una disminución del 83% del caudal anual.

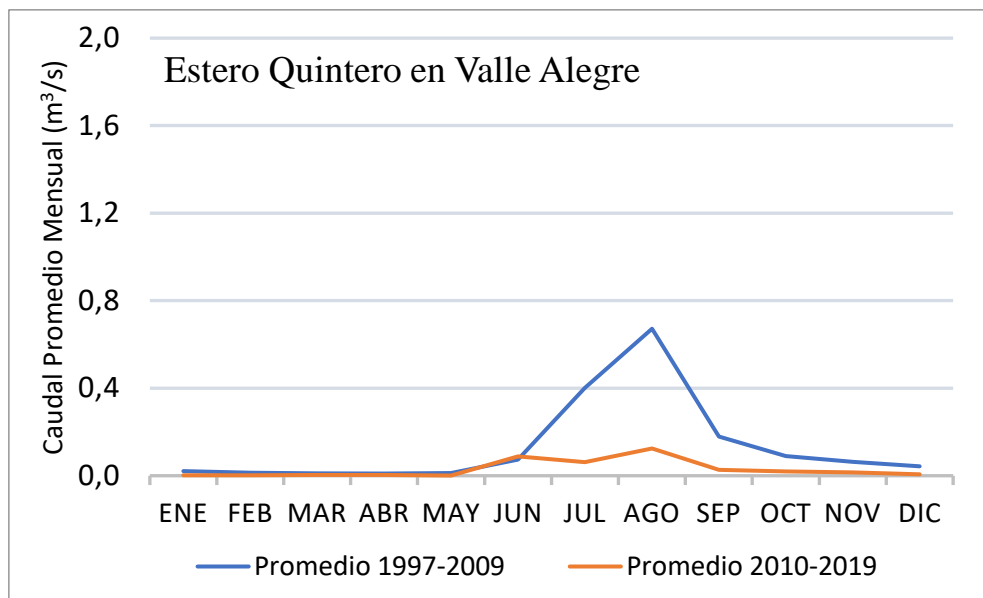


Figura 26: Caudal promedio mensual (m³/s) para estación "Estero Quintero en Valle Alegre".

Estero Catemu en puente Santa Rosa

Para la estación ubicada en el estero Catemu a un costado del puente Santa Rosa y al este del área de estudio, se cuenta con precipitaciones mayores en los meses de mayo a agosto, registradas por la estación Catemu, siendo los meses con menor caudal, aumentando en los periodos de verano.

Analizando los caudales promedios anuales (Fig. 27), para el periodo 1986 al 2009, contaba con un caudal promedio anual de 1.37 m³/s, mientras que para el periodo 2010-2018 se registró un promedio de 0.7 m³/s, lo que equivale a una disminución del 49% del caudal anual.

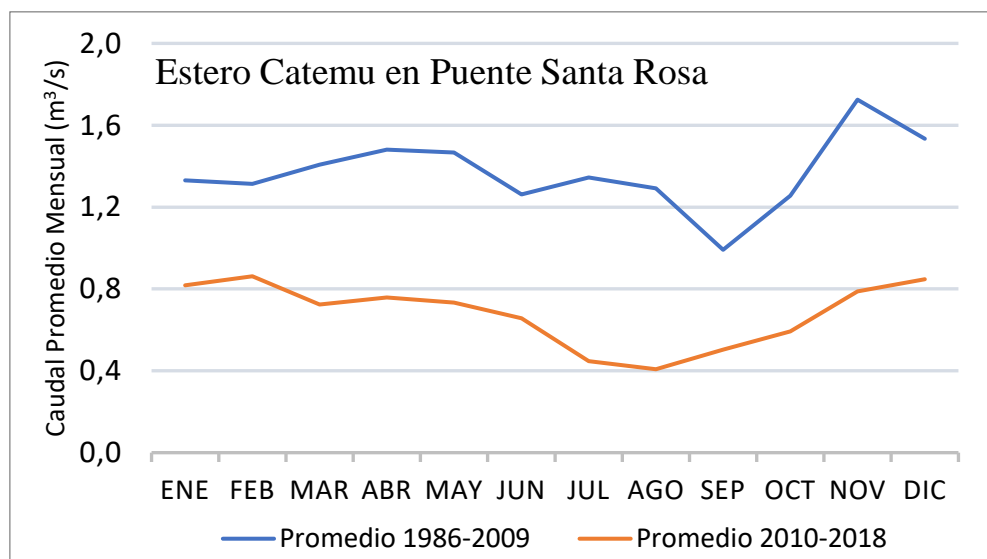


Figura 27: Caudal promedio mensual (m³/s) para estación "Estero Catemu en puente Santa Rosa".

Canal Las Vegas en Bocatoma

Finalmente, para el canal Las Vegas (Fig. 28), ubicado paralelo a la estación río Aconcagua en Romeral, no muestra correlación directa con las precipitaciones que ocurren durante el invierno austral.

Este canal, de propiedad y responsabilidad de ESVAL S.A., cuenta con una autorización de extracción de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (DGA, 2000).

Al evaluar sus caudales promedios anuales, para el periodo 1982-2009 contaba con $1.29 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el descenso en la disponibilidad de agua en los últimos 10 años ha llevado a que en los periodos de verano se llegue a lo otorgado en el canal por la DGA.

Para el periodo de invierno se observa una disminución en la captación, bajando los caudales del canal entre los meses de mayo a agosto, producto posiblemente de la utilización directa de aguas lluvias en las plantaciones agrícolas de la zona.

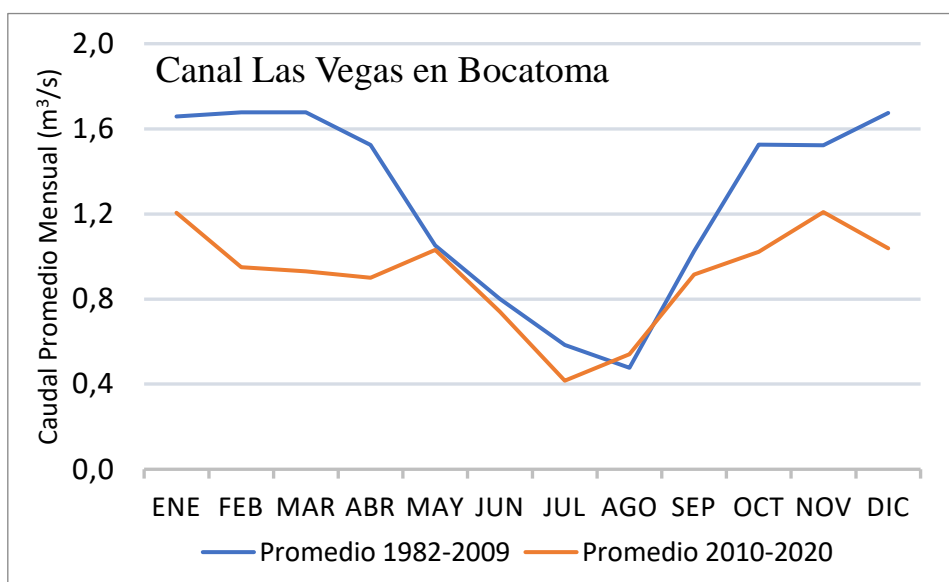


Figura 28: Caudal promedio mensual (m^3/s) para estación “Canal las Vegas, en Bocatoma.”.

5.1.3 Piezometría

A partir del análisis de los valores medios de niveles de agua en pozos de observación y APR distribuidos en la zona, se ha reconstruido la evolución de los niveles estáticos de aguas subterráneas, planteando direcciones y análisis de estas variaciones.

Las principales fuentes de información para este estudio corresponden a datos obtenidos de reportes mensuales de la DGA, reportes públicos de empresas a partir del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), y de datos aportados por la Fundación Chile.

Con la finalidad de mejorar la visualización de información, en función de la fuente de información utilizada, la continuidad de los datos piezométricos, y el registro de años por estación, se sectorizó la información piezométrica en 4 zonas a evaluar (Fig. 29). Se tiene el Sector A, correspondiente al cauce del Río Aconcagua, de datos obtenidos a partir de los reportes de la DGA, el Sector B, en la Bahía de Quintero, de datos aportados por Fundación Chile, el Sector C, al sur de la ciudad de Puchuncaví, y el Sector D, en el tranque relave El Torito, siendo los últimos dos obtenidos de resoluciones de clasificación ambiental reportadas en el SNIFA.

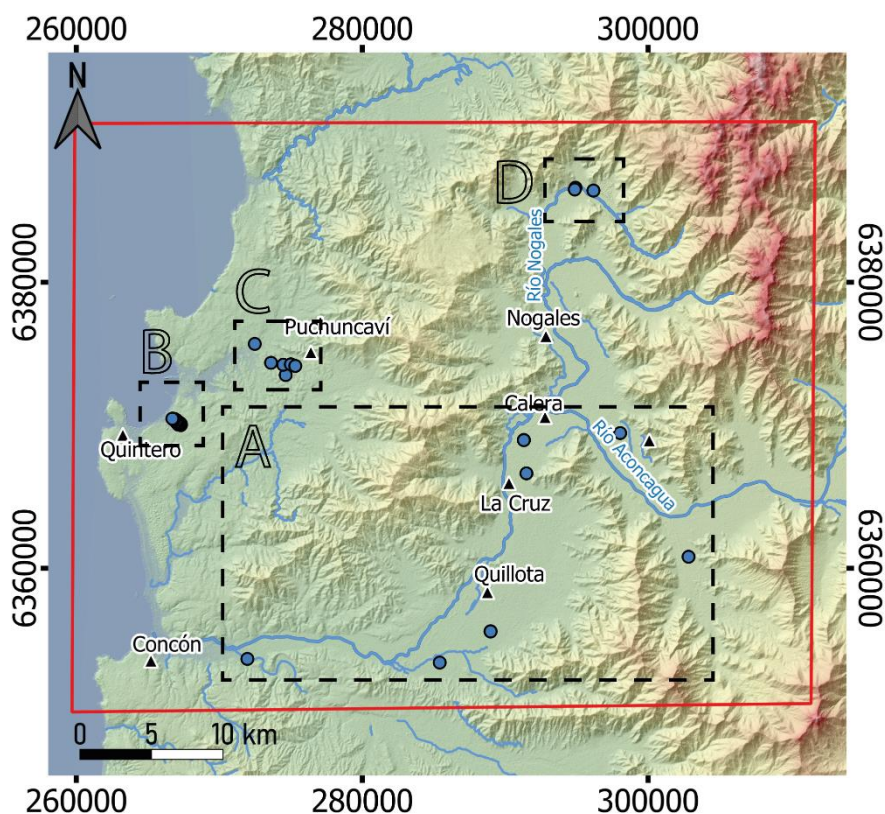


Figura 29: Mapa de puntos de medida de nivel estático en agua subterránea. Se realiza división en zonas A-B-C-D, para mejorar la visualización de información.

Sector A: Río Aconcagua

Para el sector correspondiente al río Aconcagua, se tiene información de 8 pozos ubicados en las cercanías de su cauce principal, que cuentan con información de cota subterránea, además de un registro más completo respecto a la última década (Fig. 30). Para los diversos pozos estudiados, se observa una disminución de entre 2 m y 10 m del nivel piezométrico, en los últimos 10 años.

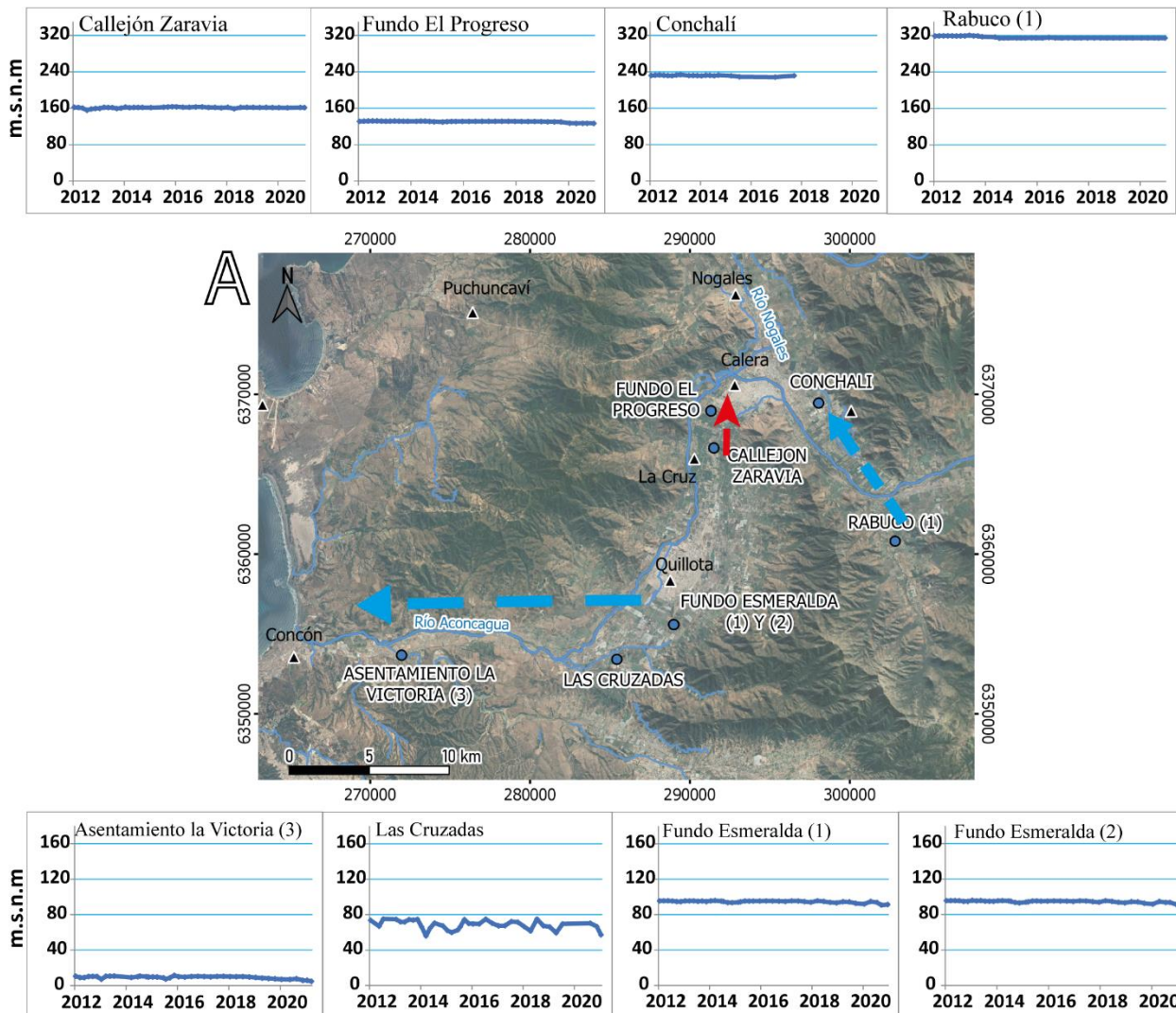


Figura 30: Piezometría Sector A, con dirección de flujo subterráneo en acuífero libre, con pozos sus respectivas cotas de agua subterránea en los últimos 10 años. En flecha azul, dirección a favor de la pendiente del río, y en flecha roja, dirección de flujo opuesta a la pendiente del río.

Para la zona de estudio, si bien es importante señalar que se cuenta con pocos puntos de observación del nivel piezométrico, se han esbozado dos direcciones de flujo preferenciales. Una en dirección a la costa y la otra, a partir de los pozos Callejón Zaravía y Fundo el Progreso, con una posible dirección sur-norte.

En el sector suroeste referente a la desembocadura entre los pozos Fundo Esmeralda y Asentamiento la Victoria, es posible atribuir un flujo dirección al mar E-W, de relación directa a la dirección del flujo superficial.

Entre los pozos Callejón Zaravia, y Fundo el Progreso se observa una diferencia de 30 m (Fig. 32), en dirección opuesta a la topografía de la traza del río Aconcagua (Fig. 31).

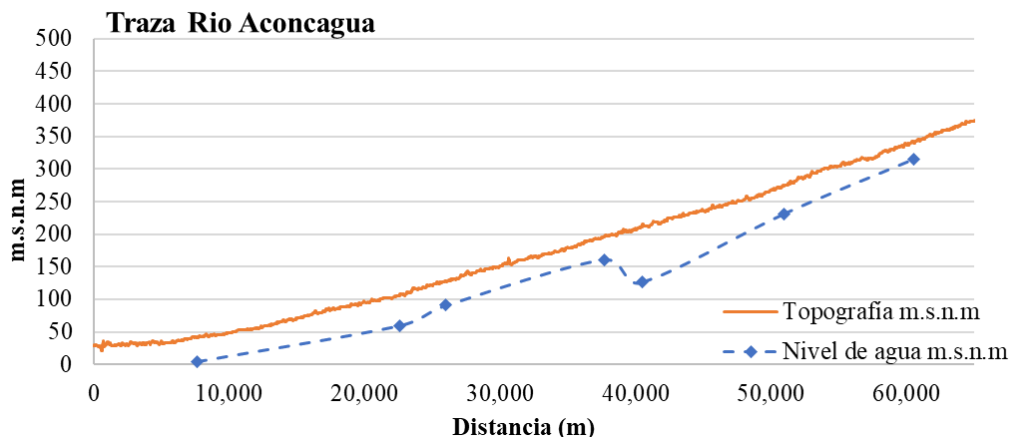


Figura 31: Perfil topográfico de la traza del río Aconcagua, junto al nivel piezométrico estático, registrado por estaciones colindante

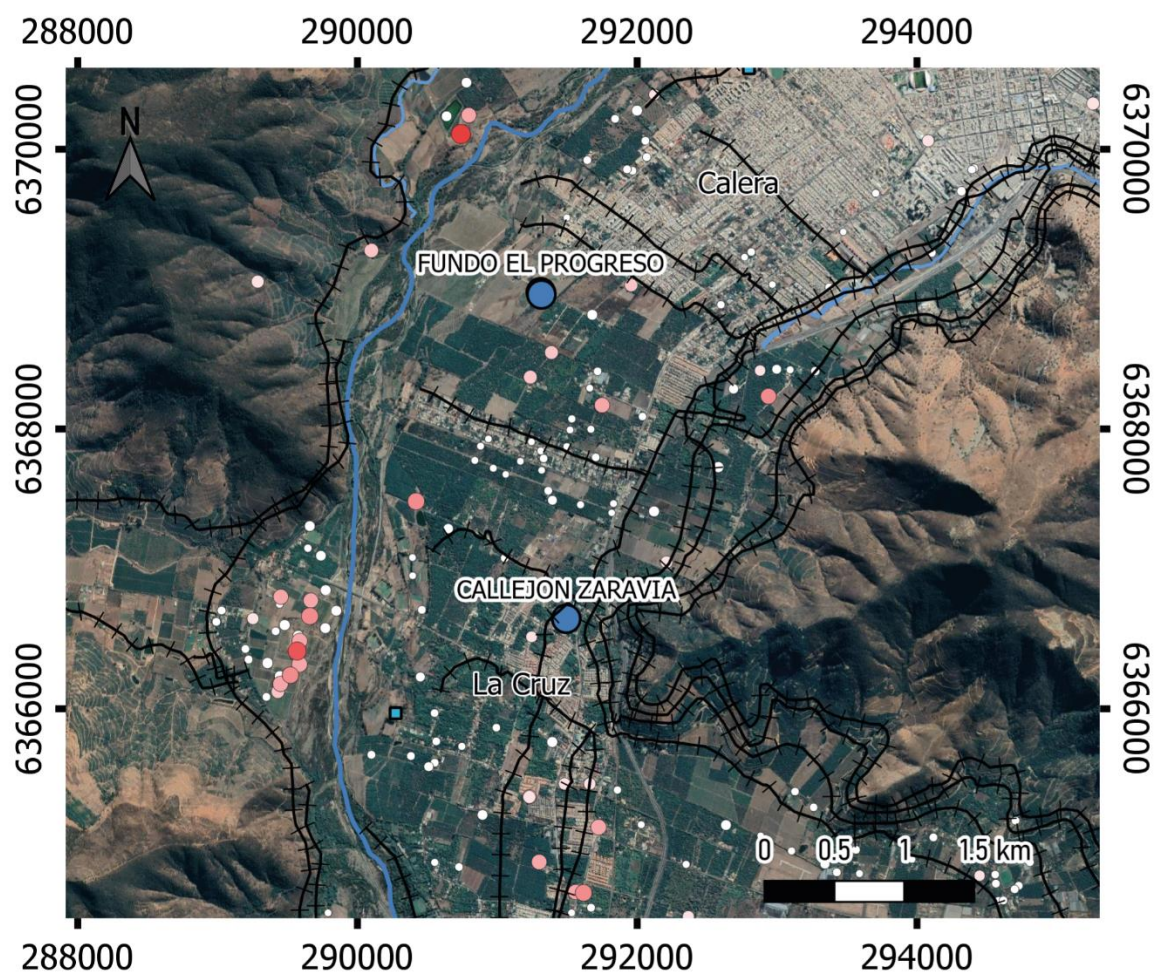
Al intentar explicar las razones de esta variación en la piezometría entre estas dos estaciones, uno de los factores a considerar es la demografía del lugar, siendo Calera la ciudad con mayor población (50.554, Censo 2017), una mayor densidad demográfica, y menor distancia al pozo Fundo el Progreso, mientras que la Cruz (22.098, Censo 2017) tiene un porcentaje menor de población, con una menor densidad demográfica, y mayor distancia al pozo Callejón Zaravia.

Otro factor para considerar son la red de canales (Fig. 32), distribuidos por la zona (MINAGRI, 2020). Se tiene una concentración de canales al este del pozo de observación Callejón Zaravia. Estos canales se encuentran a mayor altura, siendo zonas de recarga focalizada de agua subterránea, pudiendo provocar el aumento de los niveles de piezométricos locales.

Estudios en la cuenca alta del río Aconcagua han evidenciado la importancia de los canales de regadío, representando zonas de infiltración no consideradas en la recarga de acuíferos aluviales (Figueroa et al., 2021).

No se observan pozos con extracción mayores a 50 L/s en las cercanías de los pozos observados, descartando la posibilidad de una fuerte extracción legal en las cercanías del pozo Fundo el Progreso, que explique la diferencia descrita.

Si bien, estos factores podrían explicar lo observado, es necesario un monitoreo en terreno para evidenciar el aporte de estos canales a través de una recarga focalizada, identificar posibles variaciones isotópicas y de conductividad, que indiquen el posible rol de estos en la mitigación no intencional de disminución de los niveles freáticos.



Derechos Consuntivos de Agua Subterránea (L/s)

- 0 - 10 ● 20 - 30 ● 40 - 50 ● 60 - 70 +++ Red de canales
- 10 - 20 ● 30 - 40 ● 50 - 60

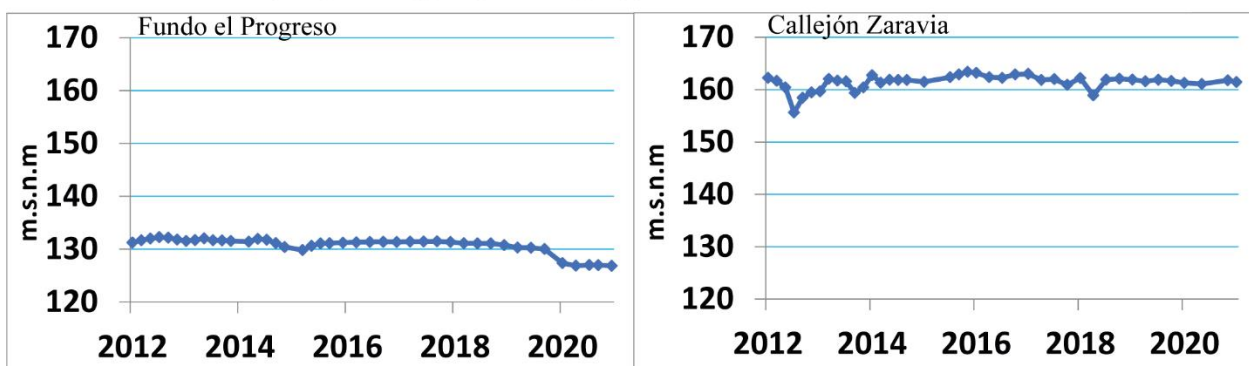


Figura 32: Estaciones piezométricas Callejón Zaravia y Fundo el Progreso, con información de piezometría, derechos consuntivos otorgados, y red de canales de riego.

Sector B: Bahía de Quintero

Para el sector de Quintero, se tienen diversos pozos concentrados en un área de $1 \times 1 \text{ km}^2$ (Fig. 33). Para esta zona se tienen datos desde el año 2015 al 2020, que ha permitido detectar una disminución de 1 m a 3 m del nivel piezométrico.

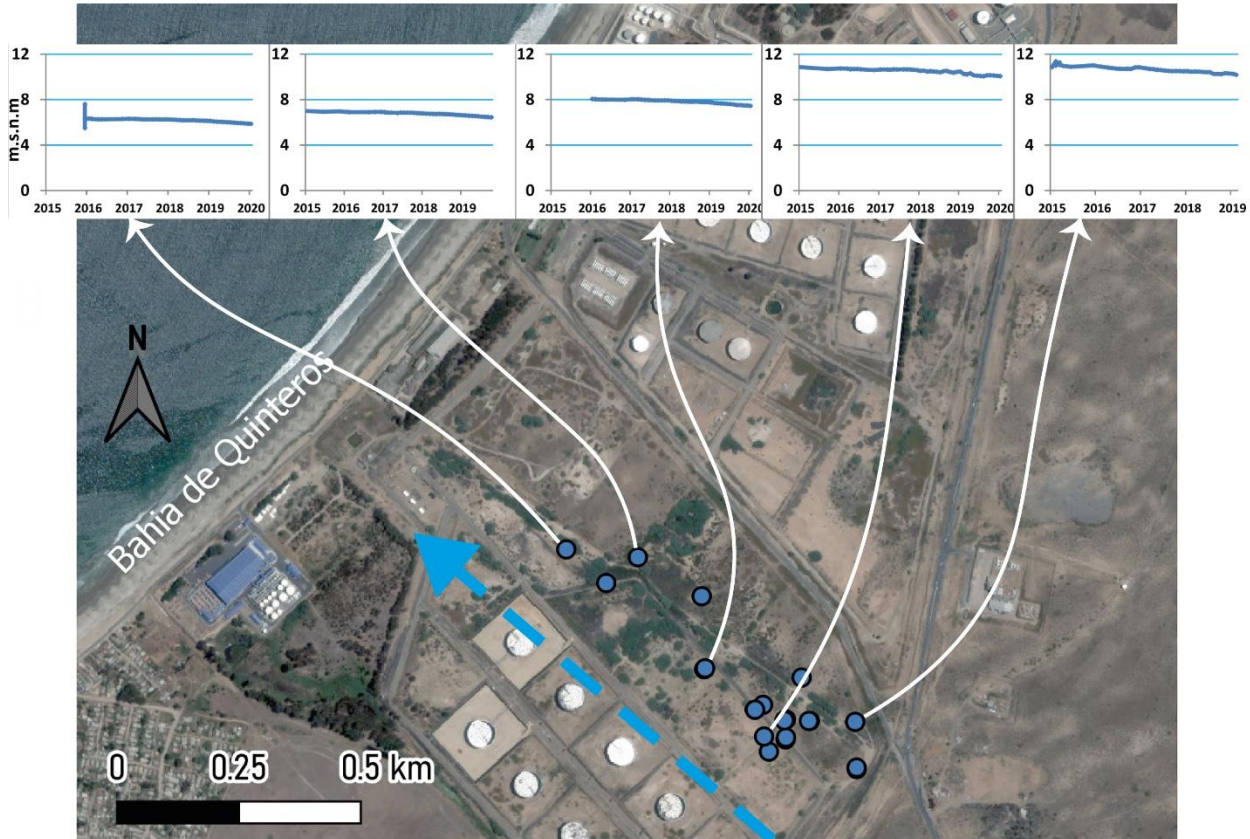


Figura 33: Piezometría en Bahía de Quintero, con diversos pozos y sus respectivas cotas de agua subterránea en los últimos 10 años. En azul línea de dirección de flujo subterráneo planteado.

Es posible atribuir una dirección de flujo subterráneo SE-NW, al considerar la piezometría registrada en pozos cercanos a la costa. Esta dirección de flujo subterráneo en dirección al mar también fue evidenciada mediante piezometría, para la zona de ventanas, al norte de la zona observada (Anexo 4), por parte de la consultora HIDROMAS en 2016.

Sector C: Sur ruta F-20 Puchuncaví – Fundo el Pangue

Para el sector al sur de la comuna de Puchuncaví, se cuenta con 5 pozos con información piezométrica (Fig. 34), propiedad de AES Gener, con datos desde el año 2013. Los datos apuntan a una dirección del flujo subterráneo general E-W.

Estos pozos de observación se encuentran dentro del fundo El Pangue, propiedad de AES Gener, lugar donde se acumula los depósitos de residuos sólidos (RISES de combustión) generados por la operación actual y futura del Complejo Termoelectrico Ventanas, propiedad de la misma empresa, con capacidad para contener 8.750.000 m³ de residuos.

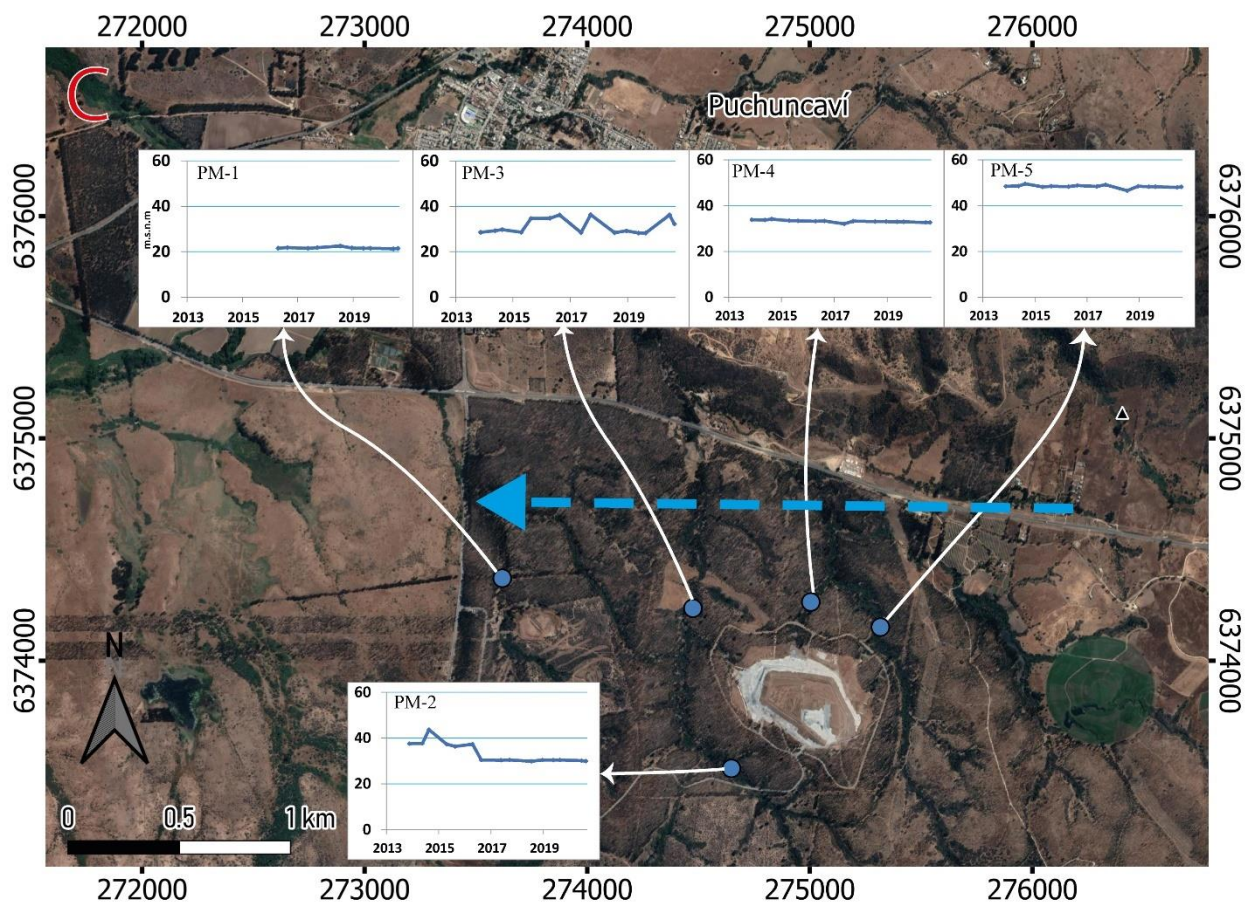


Figura 34: Piezometría Sector C, con dirección de flujo propuesta.

En los pozos PM-1, PM-4 y PM-5 se observa una disminución entre 0.5 m a 3 m del nivel freático, en los últimos 8 años, mientras que en el pozo PM-2 se observa un salto de 8 m, del nivel piezométrico, entre septiembre y abril del año 2016 (Anexo 4).

Estudios reportados por la misma termoelectrica, indican que los 5 pozos tienen un nivel inferior que el medido en su línea de base, realizado el año 2011 (AES Gener, 2020).

Sector D: Tranque El Torito

Finalmente, para el sector de Tranque El Torito, no se cuenta con información histórica de niveles estáticos. Sólo se cuenta con 3 pozos reportados, con 2 a 4 mediciones cada uno, en un periodo de 3 meses durante el 2020 (Fig. 35).

Los datos reportados indican una dirección de flujo general E-W, donde cerca del tranque los niveles freáticos reportados rondan los 307 m.s.n.m, mientras que 1 km al W, aguas abajo, los niveles freáticos rondan los 290 m.s.n.m.

Este tranque es propiedad de la Mina El Soldado, de Anglo American, y la variación de 18 m de desnivel, en aproximadamente 1 km es producto de filtraciones de este tranque de relave, con dirección al sector de Nogales.

Estas filtraciones fueron reportadas por la minera, los cuales tienen un plan de mejoramiento y ampliación del tranque de relave, con una vida útil hasta 2027.

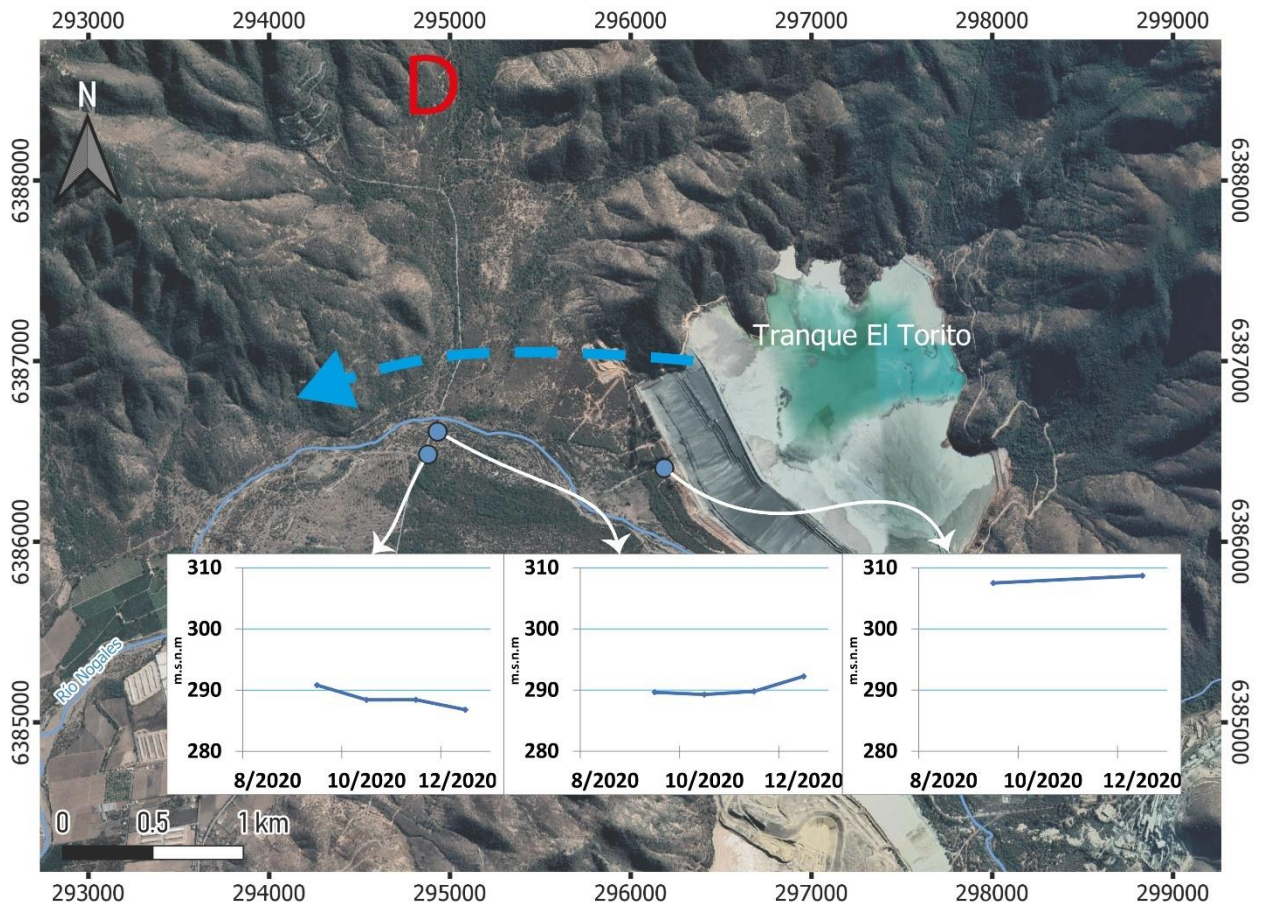


Figura 35: Sector D, Tranque El Torito, con 3 pozos y su respectiva cota de agua subterránea en el último año.

5.2 Recarga en Bloque de Montaña

Las constantes disminuciones en las precipitaciones, evidenciadas en la zona de estudio, han llevado a considerar recargas no tan evidentes en los modelos conceptuales de recarga, como lo es la recarga de bloque de montaña, referente a flujos de entrada de agua subterránea desde los macizos rocosos, a los acuíferos aluviales contiguos a estos.

Para evaluar una posible recarga en bloque de montaña, de forma inicial hay que considerar los distintos cordones montañosos, y el factor orográfico que ejercen en las precipitaciones de la región, acumulando el mayor porcentaje de estas en las altas cumbres, siendo una componente adicional que lleva a estudiar la conexión del bloque de montaña, con los acuíferos aledaños.

Para el primer segmento (Fig. 36), entre las localidades de Calera y Puchuncaví, se tienen máximos topográficos de hasta 1.200 m.s.n.m., mientras que al extremo NE de la zona de estudio, el cordón montañoso donde se encuentra la mina El Soldado, se llega a alturas aproximadas de hasta 2.200 m.s.n.m.

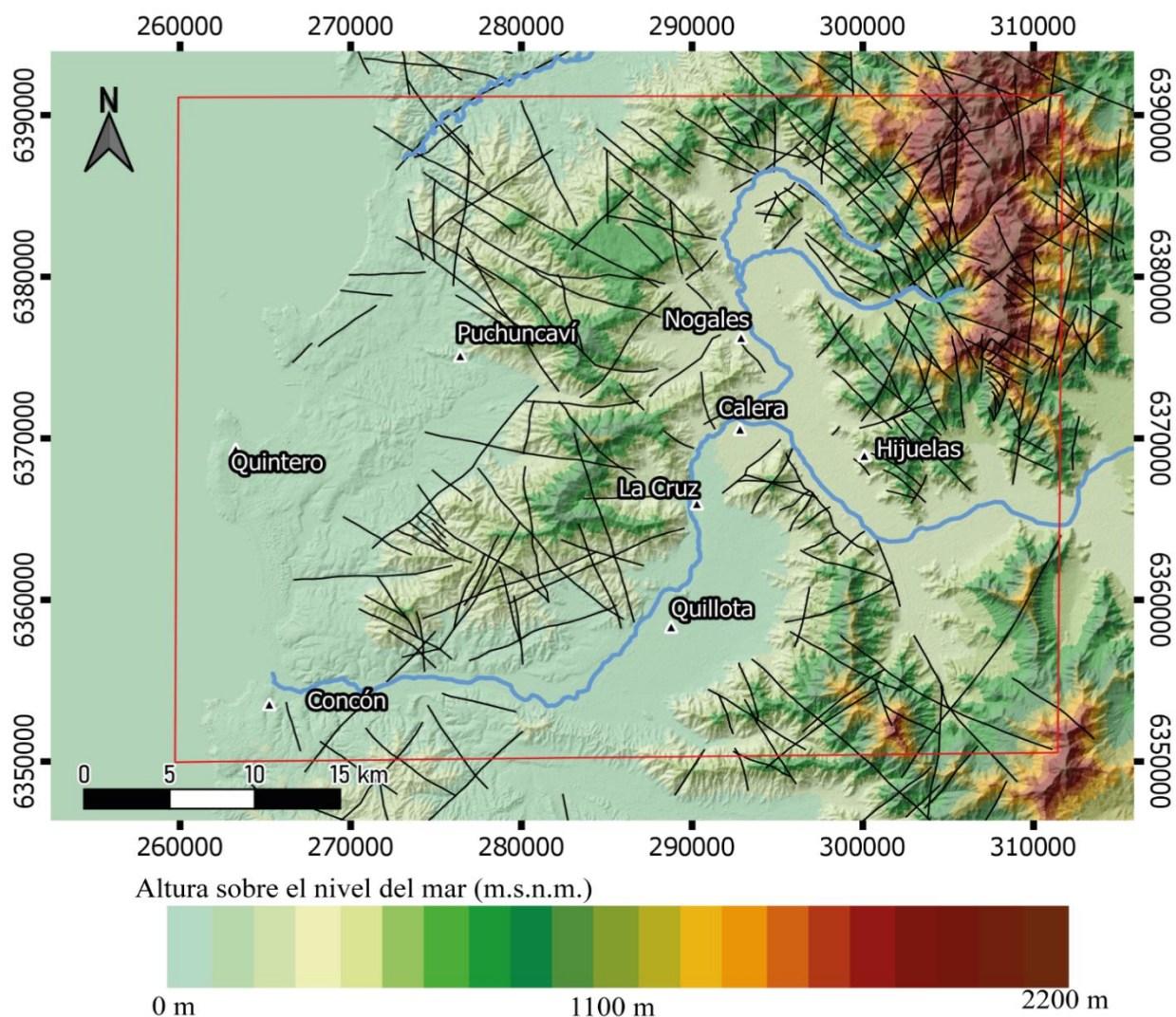


Figura 36: Mapa de Alturas sobre el nivel del mar de la Zona de estudio.

Para que sea relevante estudiar el bloque de montaña, es necesario identificar una red de fracturas interconectada, que permita la circulación e infiltración de fluidos a través de esta, considerando las zonas con una gran intensidad de fracturas como sectores de debilidad en los macizos rocosos, con la interconexión necesaria para la circulación y recarga en profundidad.

El núcleo de las fallas suele representar zonas de baja permeabilidad, siendo zonas rellenas de material fino, generalmente limo/arcilla, y poco permeable, rodeados de zonas de debilidad (zona de daño) donde puede aumentar la circulación de fluidos, y por consiguiente la permeabilidad (Wilson & Guan, 2013).

Estos núcleos pueden indicar límites hidráulicos, siendo necesario estudios geofísicos, para identificar zonas con alta presencia de arcillas, que representen los núcleos de las fallas, además de estudios gravimétricos que permitan delimitar el relleno aluvial (Figuroa et al., 2021).

Los sistemas de falla regional, que evidencian esfuerzos a gran escala, han sido reportados tanto en la zona, como al sur de esta, con orientaciones principales NW, y de segundo orden NE. Por lo que considerando estos, las fallas y trabajos a escala regional, y lo observado a partir de mapas de sombras en la zona, se plantea el siguiente mapeo de lineamientos estructurales (Fig. 37), asociando una red de fracturas a esta.

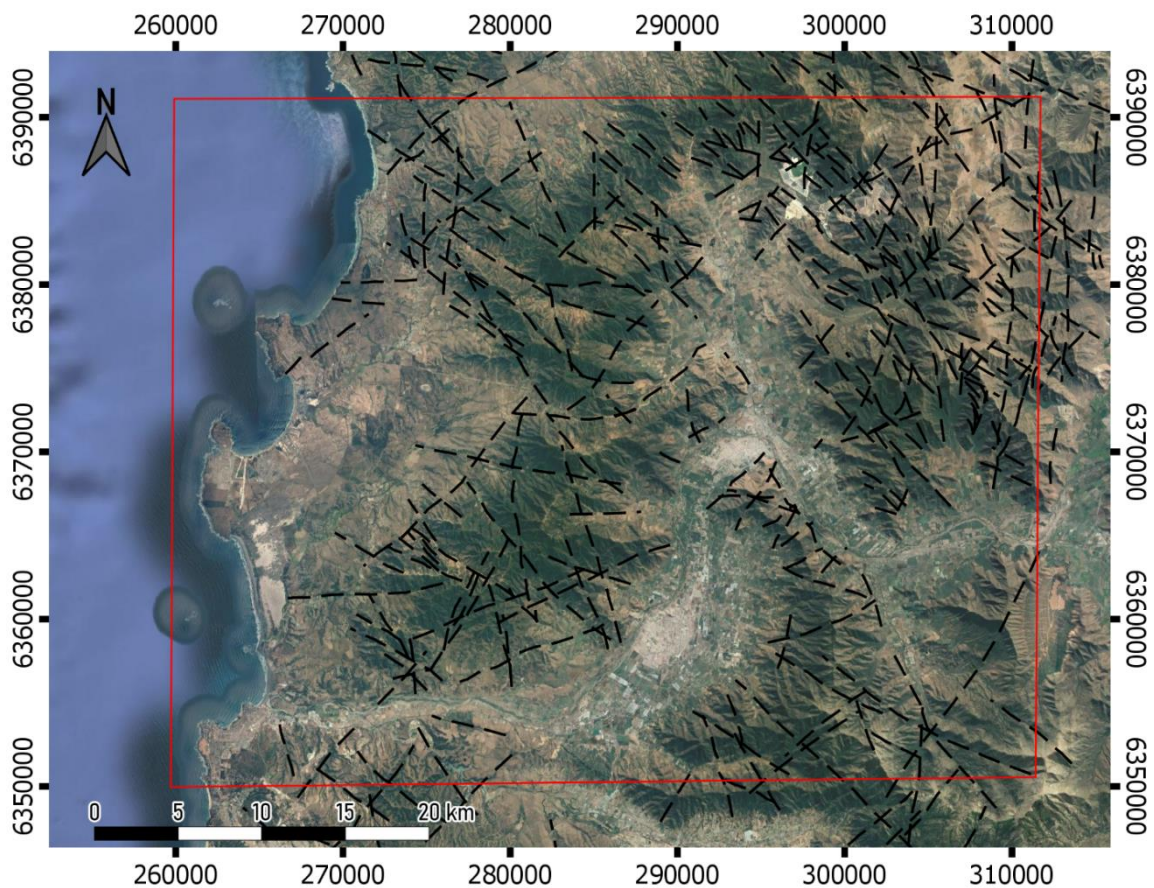


Figura 37: Mapa de lineamientos morfoestructurales para la zona de estudio propuesto.

Al utilizar el complemento NetworkGT, desarrollada por Nyberg et al. (2018), para QGIS, se clasificó la dirección de los distintos lineamientos de la zona (Fig. 38), mediante la herramienta 'Define Sets', además de obtener el diagrama de rosa de las diversas direcciones, con lineamientos predominantes N65W a N45W, observables en color rojo.

El segundo set de lineamientos con mayor importancia es N35E a N45E, representados en la figura 38 por su color amarillo, cuentan con similitudes a la serie de lineamientos identificados por Sabaj (2008), para la zona del Valparaíso-Cartagena.

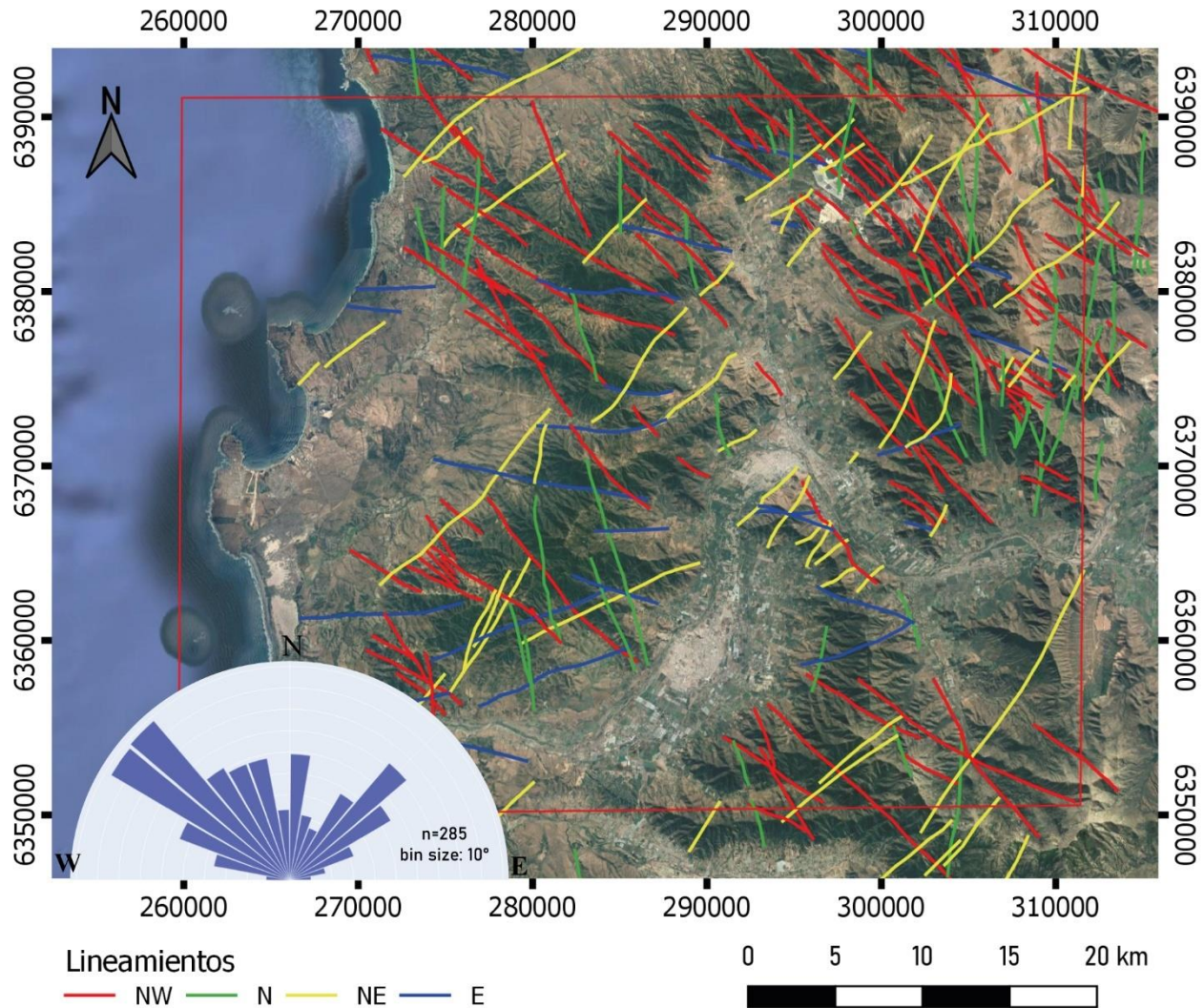


Figura 38: Mapa de lineamientos con orientación definida, más diagrama de rosa, con intervalos de 10°.

El tercer set de lineamientos, con una relevancia menor, y representados en color verde, son los lineamientos N-S, que a pesar de estar presentes en la zona, no son preferenciales. Mientras que la dirección E-W disminuye su frecuencia, y se observan en algunos segmentos, de color azul (Fig. 38)

Para continuar con el análisis topológico, con la herramienta Network GT se definieron los nodos y ramas de la red de fracturas propuestas (Fig. 39), obteniendo un total de 670 nodos y 287 ramas, categorizadas como 390 nodos I, 46 nodos Y y 230 nodos X, además de 31 ramas I-I, 167 ramas C-I y 89 ramas C-C.

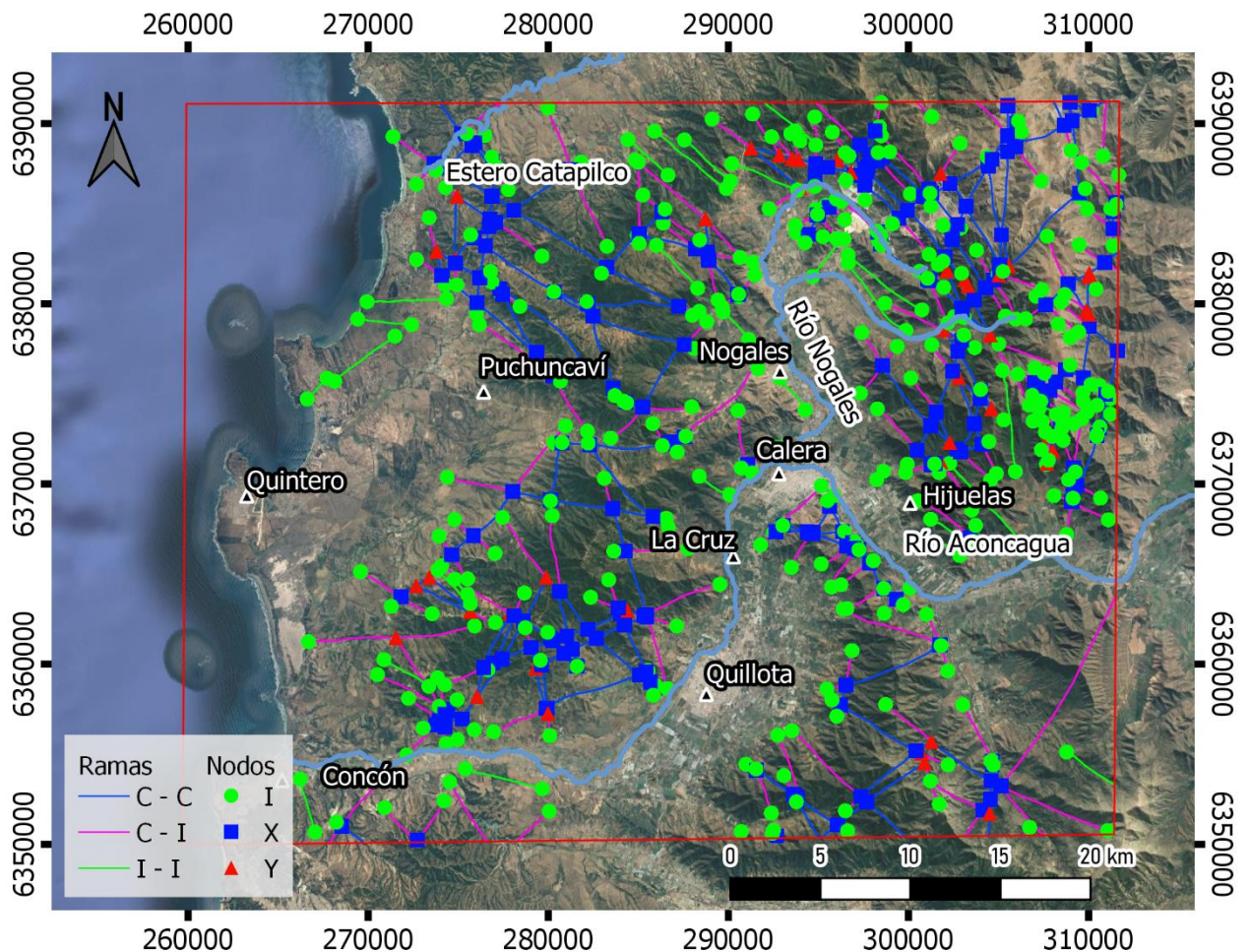
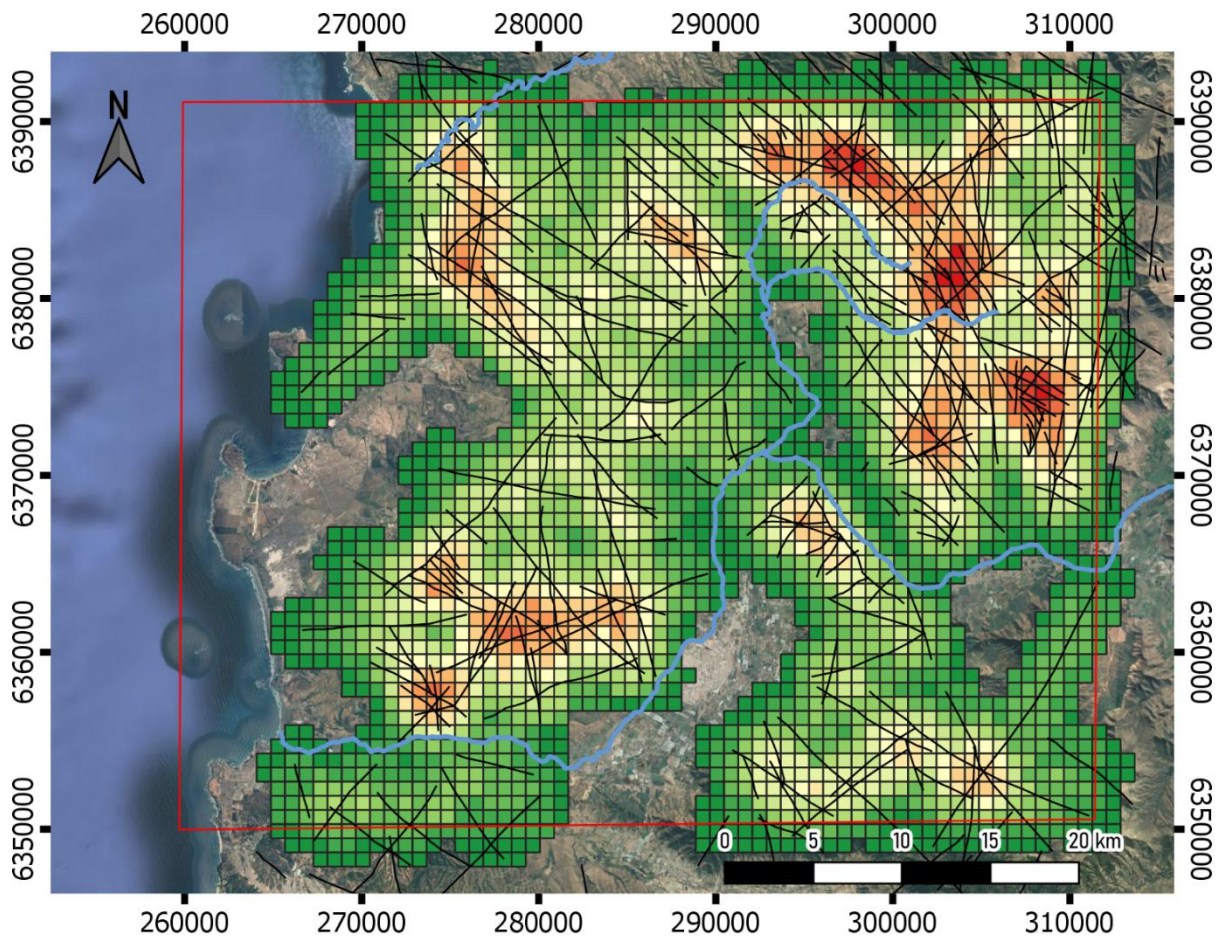


Figura 39: Caracterización topológica de red de fracturas obtenida a partir de complemento Network GT, con clasificación de ramas y nodos por tipo.

Se observa una predominancia de los nodos I o aislados, lo que se debe a que al momento de confeccionar la red de lineamientos, a partir de imágenes satelitales, no se delimitó de forma exacta el fin de cada uno de estos, producto de la falta de terreno que permitiera determinar la relación de corte de estructuras.

Esta categorización permitió parametrizar el espacio, y asignar áreas de influencia de interconexión de segmentos. Para esto, se consideran las ramas C-I, C-C y los nodos N_x y N_Y , ya que representan posibles espacios de circulación y conexión de fluido a través de roca.

Se identifican zonas con una mayor densidad de fracturas (Fig. 40), donde se destacan zonas con la presencia de espacios en el bloque de montaña, además de zonas con mayor conexión por rama (Fig. 41), que representan la posible interconexión de estos espacios.



Densidad de Fracturas (km/km²)

0.0 - 0.1	0.4 - 0.6	0.8 - 1.0	1.3 - 1.4	1.7 - 1.8
0.1 - 0.3	0.6 - 0.7	1.0 - 1.1	1.4 - 1.5	1.8 - 2.0
0.3 - 0.4	0.7 - 0.8	1.1-1.3	1.5 - 1.7	2.0 - 2.1

Figura 40: Mapa de densidad de fracturas (km/km²), obtenido a partir de aplicación de complemento NetworkGT a red de fracturas.

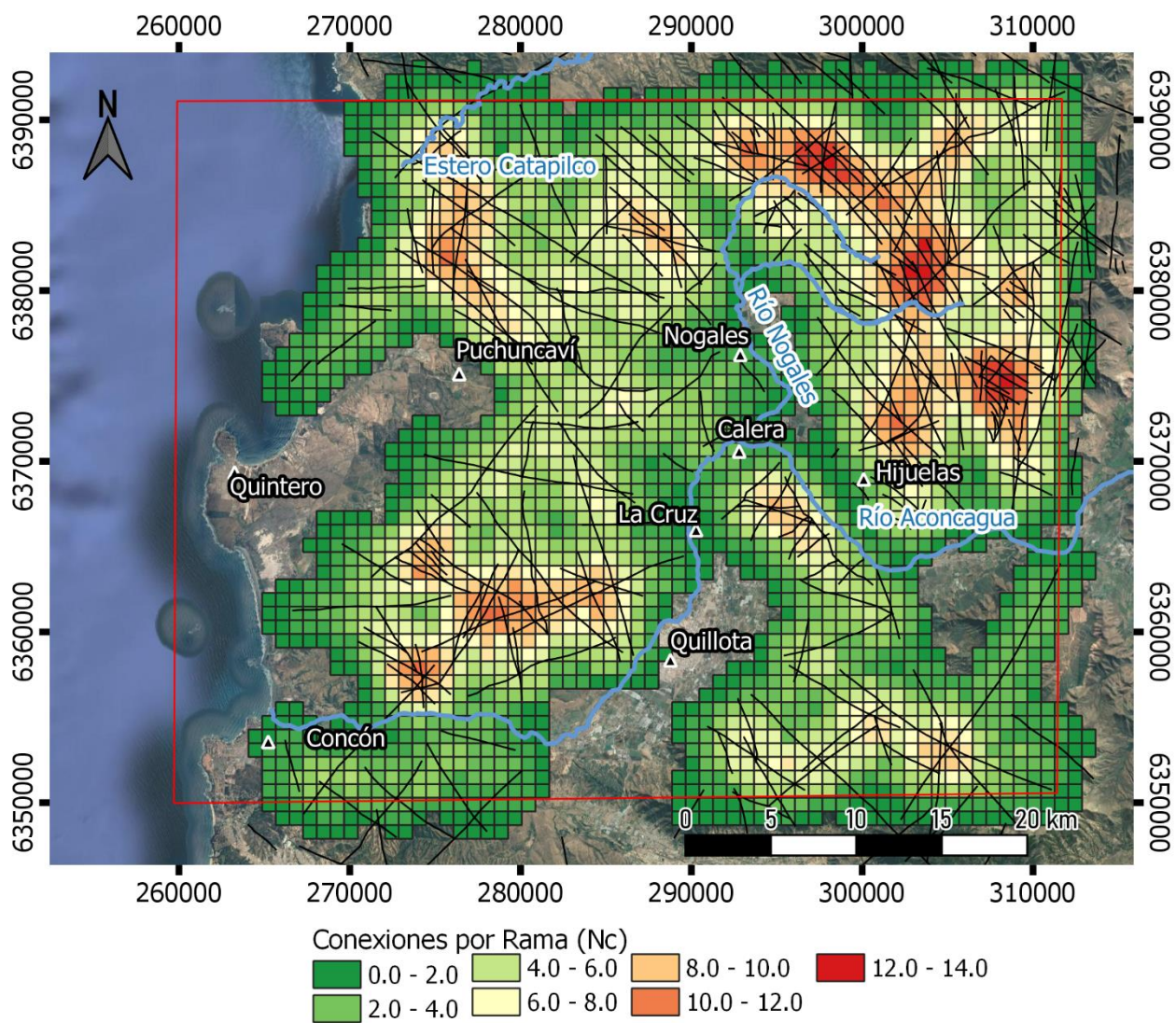


Figura 41: Mapa de Conexiones por Rama (N_c), obtenido a partir de aplicación de complemento NetworkGT a red de fracturas.

Si bien, faltan estudios geofísicos, geoquímicos y estructurales de terreno, se proponen dos posibles zonas óptimas de recarga en bloque de montaña (Fig. 42), las que tuvieran una densidad de fracturas suficiente para generar zonas de debilidad (Fig. 40), y que presenten las conexiones necesarias entre estos espacios (Fig. 41).

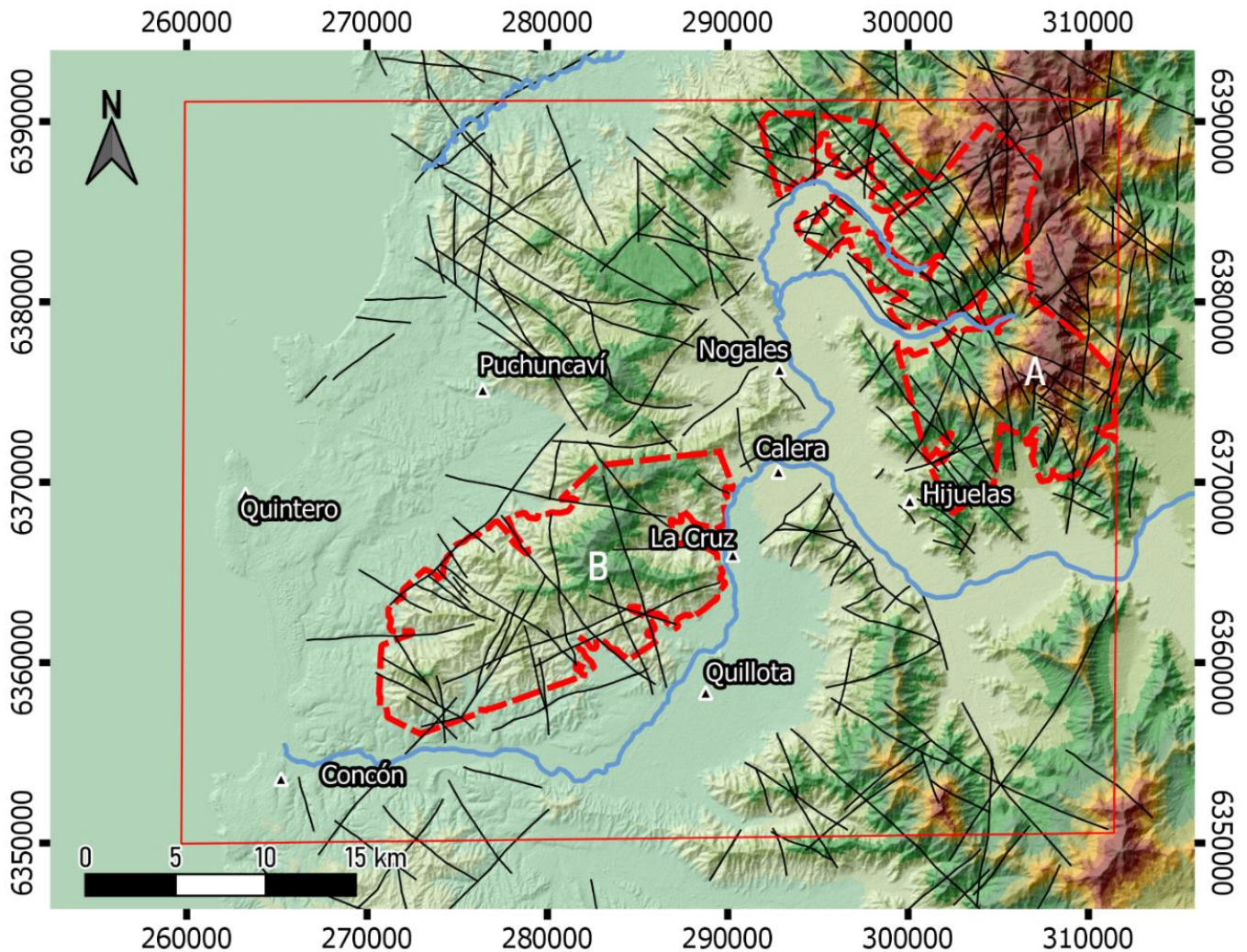


Figura 42: Zonas propuestas con red interconectada,, que pueden presentar recarga por bloque de montaña.

La primera zona, identificada en la Fig. 42A, corresponde a la parte alta de la comuna de Nogales, llegando a los 2200-2300 m.s.n.m., y se identifica la zona con mayor densidad de fracturas, hasta 2.1 km/km², y mayor interconexión, con hasta 14 conexiones por rama.

Para esta zona (Fig. 43), los cauces de los ríos se curvan en la misma dirección NW de deformación de primer orden, observando la mayor concentración de lineamientos en esta dirección preferencial. Estos lineamientos observados representan fuentes probables de recarga focalizada.

Esta red de lineamientos pasa a través de la mina El Soldado, operación a rajo abierto de explotación de cobre, donde se producen aproximadamente 54.190 toneladas de cobre fino al año.

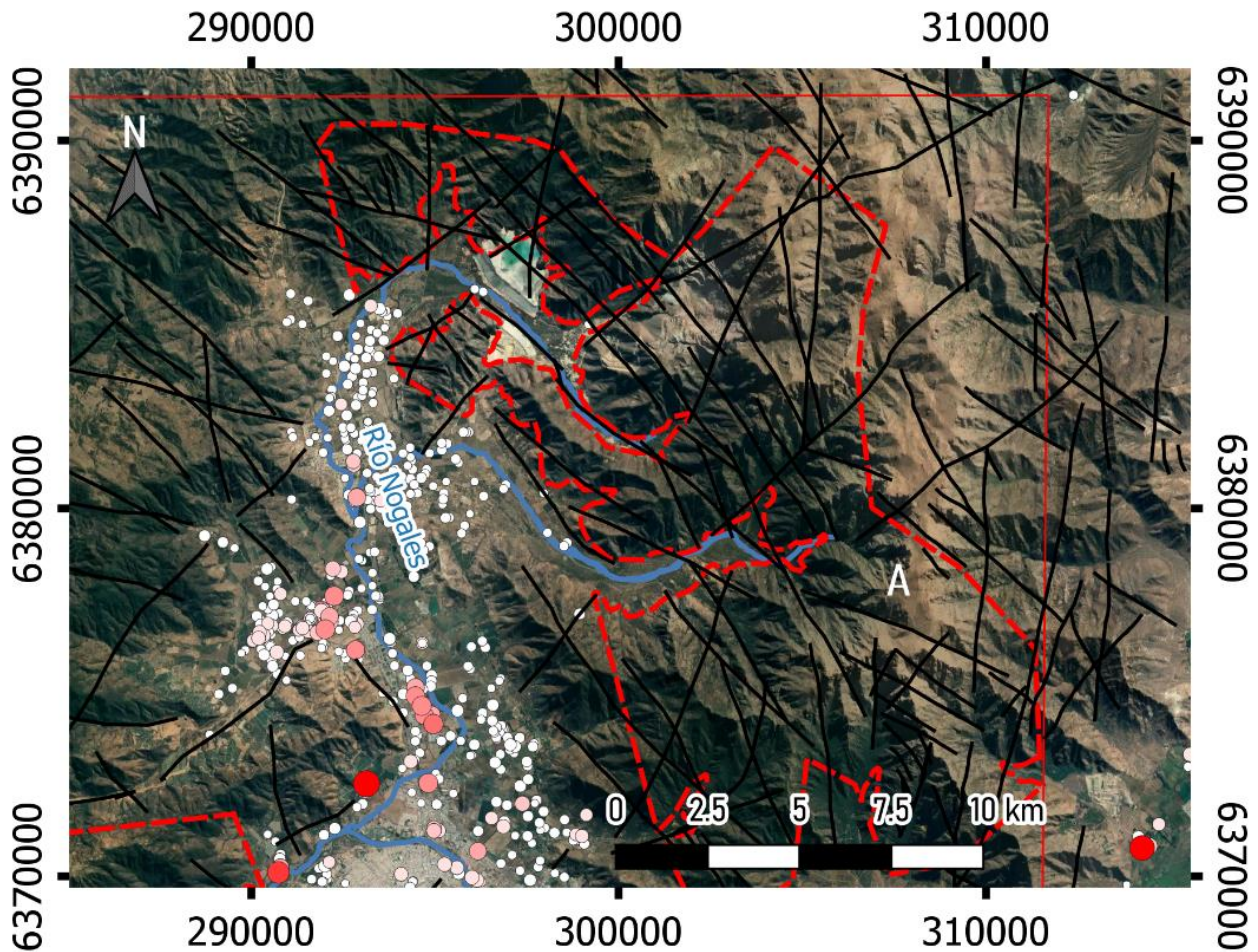


Figura 43: Zona A de potencial de recarga en bloque de montaña. En círculos se observan derechos consuntivos de agua subterránea otorgados, de sección 4.3.3.

La segunda zona, identificada en la Fig. 42B, corresponde al cordón montañoso al este de La Cruz (Fig. 44), entre la desembocadura del río Aconcagua, y las comunas de Quintero y Puchuncaví. Esta zona representa un doble interés, a ser el límite entre la cuenca del río Aconcagua, y la cuenca costera entre el estero Catapilco y el río antes mencionado.

La zona B, con alturas hasta los 1200 m.s.n.m., representa el cordón montañoso con mayores precipitaciones estimadas en altura (Luebert, F. & Pliscoff, P., 2012), con un fuerte factor orográfico como el indicado anteriormente. Sumado a esto, cuenta con alta densidad de fracturas, llegando a $1.8\text{km}/\text{km}^2$, y hasta 11 conexiones por rama. Estas características lo vuelven un sector relevante a considerar, para una potencial área de recarga.

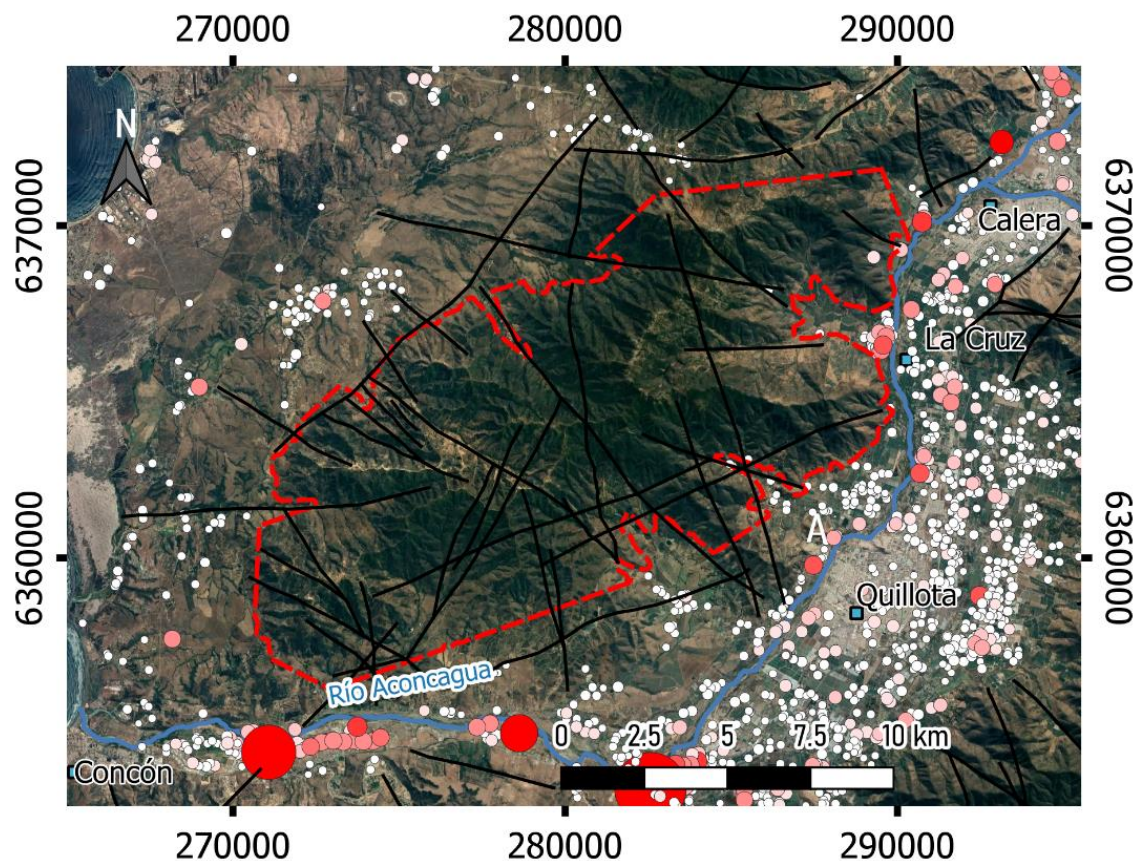


Figura 44: Zona B de potencial recarga en bloque de montaña. En círculos se observan derechos consuntivos de agua subterránea otorgados, de sección 4.3.3.

Estas dos zonas aproximadas obtenidas de la evaluación de la red de lineamientos, en conjunto con las precipitaciones de la zona, por si solas no bastan para reportar la presencia de la recarga desde el bloque de montaña, siendo necesario la observación de subsuperficie, buscando entender el límite entre basamento y acuífero aluvial adyacente.

Las diversas metodologías de estimación del MBR necesitan esfuerzos combinados para identificar y diferenciar la recarga en bloque de montaña, con la recarga en frente de montaña, como la conductividad eléctrica, mediciones piezométricas a lo largo del frente de montaña, acompañados de análisis de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) entre otras técnicas (Markovich, et al., 2019).

Finalmente, otro factor no menos importante es la respuesta que tiene el MBR a los cambios en el clima y a la cobertura de uso de suelo, más en este caso de estudio, donde la prolongada sequía en conjunto con el constante aumento de la población, y el incremento del uso de agua subterránea pueden resultar una combinación no propicia para la recarga y la sustentabilidad de los recursos hídricos de la zona de estudio. Está documentado casos donde se ha experimentado una disminución del MBR en respuesta de estas forzantes (Markovich, et al., 2019), sin embargo, en esta memoria de título, no se ha llegado a cuantificar la MBR, por lo cual sólo es posible dejarlo como un supuesto para la zona de estudio.

6. Conclusiones

Más de una década de años secos que está experimentando Chile Central ha afectado directamente los recursos hídricos de la región, evidenciando disminuciones entre 20 y 40% en las precipitaciones, disminuciones de hasta el 70% del caudal promedio anual de ríos tan importantes como el Aconcagua. Al mismo tiempo se han registrado importantes incrementos en los derechos consuntivos otorgados, encendiendo las alertas para una gestión venidera compleja de los recursos hídricos.

La situación de sequía prolongada permite observar cambios importantes en los regímenes de funcionamiento de los ríos. En la zona estudio, por ejemplo el río Aconcagua (sector el Romeral), que en décadas anteriores estaba asociado a un régimen mixto con máximos de caudal durante noviembre a enero, disminuyó de forma general sus caudales, además de no contar con estos máximos antes descritos, asociado directamente a la disminución de los caudales de deshielo y a las disminuciones en las precipitaciones antes mencionadas.

Además, es necesario considerar que el aumento significativo en los derechos consuntivos de agua superficiales y subterráneas hayan variado las relaciones entre estos dos recursos, legalmente separados pero perteneciente a un único ciclo hidrológico, tanto en la cuenca del río Aconcagua, como en la cuenca costera de la zona de estudio, en donde se identifican factores antrópicos que controlan la piezometría y dirección de flujo subterráneo.

Se destacan los diversos canales encontrados en la región, siendo un posible factor al cual sumar en los modelos conceptuales de recarga, al representar posibles zonas de recarga focalizada no intencionadas, transportando agua proveniente de alta montaña, a zonas más bajas.

Para afrontar los años venideros en materia de gestión hídrica, es necesario incorporar factores que mejoren los modelos conceptuales, siendo la recarga en bloque de montaña, identificada en las dos zonas planteadas para la zona de estudio, un factor a considerar en materia de gestión.

Para llegar a cuantificar el aporte de estos sistemas hídricos, es necesario un trabajo multidisciplinario que identifique los límites entre el acuífero aluvial, y el bloque de montaña, además de clasificar los afluentes en función de la química y física de aguas, siendo este trabajo, una identificación de zonas favorables para la realización de este tipo de estudios.

Este trabajo se ha realizado en el contexto de pandemia sanitaria global por lo cual se sugiere realizar trabajos de terreno que abarquen tres temáticas centrales:

Primero un mapeo estructural de las zonas propuestas para recarga en bloque de montaña, centrando los esfuerzos en identificar las direcciones y rellenos de fallas y fracturas, para asignar a ciertas orientaciones la capacidad de recarga y transporte.

En segundo lugar, el muestreo de aguas subterráneas y manantiales en los ejes de las direcciones de flujo NW-SE y NE-SW, para evaluar el origen y desplazamiento de aguas a través del bloque de montaña. Además, muestrear las aguas de los canales, principalmente al este de la

estación piezométrica Callejón Zaravia, al norte de la localidad de La Cruz, para determinar la procedencia, y conexión de estas, de las aguas subterráneas observadas en la estación.

En tercer lugar, la implementación de métodos geofísicos que permitan delimitar el acuífero aluvial del bloque de montaña, posiblemente utilizando modelación a partir de un análisis gravimétrico y geoelectrónicos, para así identificar zonas de impermeabilidad y evaluar la profundidad de las fracturas propuestas.

Finalmente, se recomienda la implementación de piezómetros en los frentes de montaña, que permitan monitorear la piezometría y la química de aguas en los límites de estos, para finalmente realizar modelos conceptuales y numéricos de recarga en la zona de estudio.

7. Bibliografía

- Aguirre, L., Féraud, G., Morata, D., Vergara, M., & Robinson, D. (1999). Time interval between volcanism and burial metamorphism and rate of basin subsidence in a Cretaceous Andean extensional setting. *Tectonophysics*, 313(4), 433–447. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00217-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00217-6)
- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- AES Gener. (2020). INFORME DE SEGUIMIENTO “NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS DE MONITOREO” MANEJO Y DISPOSICIÓN DE RISES DE COMBUSTIÓN DEL COMPLEJO TERMOELÉCTRICO VENTANAS.
- Berkowitz, B. (2002). Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Advances in Water Resources*, 25(8–12), 861–884. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00042-8)
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Boyce, D. (2015). Modelo de evolución tectónica y paleogeográfica del margen andino en Chile Central durante el Cretácico medio a tardío: el registro estructural y sedimentario en la Formación Las Chilcas. En *Memoria de Título (Inédito)*, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Cabrera, L., Calafat, A., Gimeno, D., Liesa, M., Proenza, J., Sàbat, F., Sáez, A., & Santanach, P. (2008). *The Geology of Chile*.
- Carrillo-Briceño, J. D., González-Barba, G., Landaeta, M. F., & Nielsen, S. N. (2013). Condictios fósiles del Plioceno Superior de la Formación Horcón, Región de Valparaíso, Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*, 86(2), 191–206. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2013000200008>
- Carrozzi, N. patricio L. (2016). Patrimonio geologico de la comuna de puchuncavi, para la creación del geoparque puchuncavi, v region de valparaiso. Uch Departamento geología, 491–494. <https://doi.org/10.5334/baw.84>
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *Geological Society Special Publication*, January, 21–114. <https://doi.org/10.1144/goch.3>
- Chávez Hoffmeister, M., Carrillo Briceño, J. D., & Nielsen, S. N. (2014). The evolution of seabirds in the Humboldt current: New clues from the Pliocene of central Chile. *PLoS ONE*, 9(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090043>
- CIREN. (2013). Monitoreo de Cambios, Corrección Cartográfica y Actualización del Catastro de Bosque Nativo en las Regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O’Higgins. 131. http://bosques.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/195/1617_INFORME_FINAL_regiones_Valparaiso_Metropolitana_OHiggins_CIREN.pdf?sequence=1
- CONAF. (2013). Catastros de Uso de Suelo y Vegetación. <http://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7B15CA318D-12F7-486B-A2AB-C0BAF8903ED6%7D>

CR2. (s. f.). CAMELS-CL: Explorador de Cuencas. Recuperado 15 de julio de 2021, de <https://camels.cr2.cl/>

CR2. (2015). Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Informe a la Nación, 26. www.cr2.cl/megasequia

Cuevas, R. (2017). ANÁLISIS DE LOS DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS TERCIARIOS-CUATERNARIOS EN EL ÁREA DE QUINTERO-PLACILLA (~33°S) Y SUS IMPLICANCIAS PALEOGEOGRÁFICAS [Universidad de Chile]. En Universidad de Chile (Vol. 01). <http://www.albayan.ae>

Custodio, E. (2002). Aquifer overexploitation: What does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10(2), 254–277. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0188-6>

Dataset: ASF DAAC 2010, ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res; Includes Material © JAXA/METI 2010. Accessed through ASF DAAC 22 April 2021. DOI: <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>

Deckart, K., Hervé, F., Fanning, C. M., Ramírez, V., Calderón, M., & Godoy, E. (2014). Geocronología U-Pb e isótopos de Hf-O en circones del batolito de la Costa Pensilvaniana, Chile. *Andean Geology*, 41(1), 49–82. <https://doi.org/10.5027/andgeoV41n1-a03>

Dirección General de Aguas (DGA). (s. f.). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Recuperado 14 de julio de 2021, de <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

Dirección General de Aguas (DGA). (2000). Levantamiento de bocatomas en cauces naturales. Volumen 1. 196.

Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnostico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Aconcagua. DGA, 160.

Dirección General de Aguas (DGA). (2009). Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos.

Dirección General de Aguas (DGA). (2016). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la Región de Valparaíso.

Dirección General de Aguas (DGA). (2020). INFORME TÉCNICO: Modelación Operacional del Río Aconcagua.

Dirección General de Aguas (DGA). (2021). Pronóstico de Caudales de Deshielo Temporada de Riego 2020-2021.

Espurt, N., Funicello, F., Martinod, J., Guillaume, B., Regard, V., Faccenna, C., & Brusset, S. (2008). Flat subduction dynamics and deformation of the South American plate: Insights from analog modeling. En *Tectonics* (Vol. 27, Número 3). <https://doi.org/10.1029/2007TC002175>

FAO, 2000. Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. On-line: <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.HTM>

Figuroa, R., Viguier, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., & Daniele, L. (2021). Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment*, 771, 145456. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145456>

- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Healy, R. W., & Scanlon, B. R. (2010). Estimating Groundwater Recharge. *Encyclopedia of Environmental Change*, 1–14. <https://doi.org/10.4135/9781446247501.n1795>
- INE. (2017). Censo. <http://www.censo2017.cl/>
- QGIS.org, 2021. QGIS 3.16. Geographic Information System User Guide. QGIS Association. Electronic document: https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/index.html
- Ley N°1.112. Diario Oficial de la República de Chile, 29 de octubre de 1981. <http://bcn.cl/2f8tw>
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2012). Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Investigaciones Geográficas*, 56(44), 41. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2012.26408>
- Mäkel, G. H. (2007). The modelling of fractured reservoirs: Constraints and potential for fracture network geometry and hydraulics analysis. *Geological Society Special Publication*, 292, 375–403. <https://doi.org/10.1144/SP292.21>
- Markovich, K. H., Dahlke, H. E., Arumí, J. L., Maxwell, R. M., & Fogg, G. E. (2019). Bayesian hydrograph separation in a minimally gauged alpine volcanic watershed in central Chile. *Journal of Hydrology*, 575(November 2018), 1288–1300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.014>
- Martinod, J., Husson, L., Roperch, P., Guillaume, B., & Espurt, N. (2010). Horizontal subduction zones, convergence velocity and the building of the Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 299(3–4), 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.010>
- MINAGRI. (2020). Infraestructura de Riego - Canales. Recuperado 26 de octubre de 2021, de <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/21/aguas-continentales/>
- Molina, P. (2014). GEOCRONOLOGÍA Y CONDICIONES DE CRISTALIZACIÓN DE CIRCONES DEL PLUTÓN CALEU: EVIDENCIAS DE SU PROLONGADA EVOLUCIÓN TARDIMAGMÁTICA. Universidad de Chile.
- Morata, D., Varas, M. I., Higgins, M., Valencia, V., & Verhoort, J. D. (2010). Episodic emplacement of the Illapel Plutonic Complex (Coastal Cordillera, central Chile): Sr and Nd isotopic, and zircon U-Pb geochronological constraints. VII SSAGI South American Symposium on Isotope Geology, At Brasília, January 2015.
- Nyberg, B., Nixon, C. W., & Sanderson, D. J. (2018). NetworkGT: A GIS tool for geometric and topological analysis of two-dimensional fracture networks. *Geosphere*, 14(4), 1618–1634. <https://doi.org/10.1130/GES01595.1>
- Peacock, D. C. P., Nixon, C. W., Rotevatn, A., Sanderson, D. J., & Zuluaga, L. F. (2016). Glossary of fault and other fracture networks. *Journal of Structural Geology*, 92, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.09.008>

- Piquer, J., Rivera, O., Yáñez, G., & Oyarzún, N. (2021). The Piuquencillo fault system: a long-lived, Andean-transverse fault system and its relationship with magmatic and hydrothermal activity. *Solid Earth*, 12(1), 253–273. <https://doi.org/10.5194/se-12-253-2021>
- Piracés, R. (1976). ESTRATIGRAFIA DE LA CORDILLERA DE LA COSTA ENTRE LA CUESTA EL MELON Y LIMACHE, PROVINCIA DE VALPARAISO. CHILE.
- Rivano, S. (1996). Geología de las Hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería., 202.
- Rivano, S., Sepulveda, P., Boric, R., & Espiñeira, D. (1993). Hoja Quillota Portillo. Sernageomin.
- Sabaj, R. (2008). Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la cordillera de la costa, entre los 33° y 33°45' S. 92.
- Sanderson, D. J., & Nixon, C. W. (2018). Topology, connectivity and percolation in fracture networks. *Journal of Structural Geology*, 115(August 2016), 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.011>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M., Yáñez, E., & Valois, R. (2019). Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1263–1279. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3>
- Superintendencia del Medio Ambiente. (s. f.). SNIFA - Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental. Recuperado 14 de julio de 2021, de <https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion>
- Taucare, M. (2020). Groundwater resources of the western andean front: insights from the Aconcagua basin, central Chile.
- Thomas, H. (1958). Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de la ligua y la Cuesta de Barriga. Inst. de Investigaciones Geol. <https://books.google.cl/books?id=qJanNAAACAAJ>
- Yáñez, G., Cembrano, J., Pardo, M., Ranero, C., & Selles, D. (2002). The Challenger-Juan Fernández-Maipo major tectonic transition of the Nazca-Andean subduction system at 33-34°S: Geodynamic evidence and implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 23–38. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00004-4)
- Walter, B., Géraud, Y., Hautevelle, Y., Diraison, M., & Raison, F. (2019). Fluid circulations at structural intersections through the toro-bunyoro fault system (Albertine Rift, Uganda): A multidisciplinary study of a composite hydrogeological system. *Geofluids*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8161469>
- Wilson, J. L., & Guan, H. (2013). Mountain-Block Hydrology and Mountain-Front Recharge. *Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States*, 9, 113–137. <https://doi.org/10.1029/009WSA08>

Anexos

Anexo 1: Hidrogramas de Caudal mensual promedio.

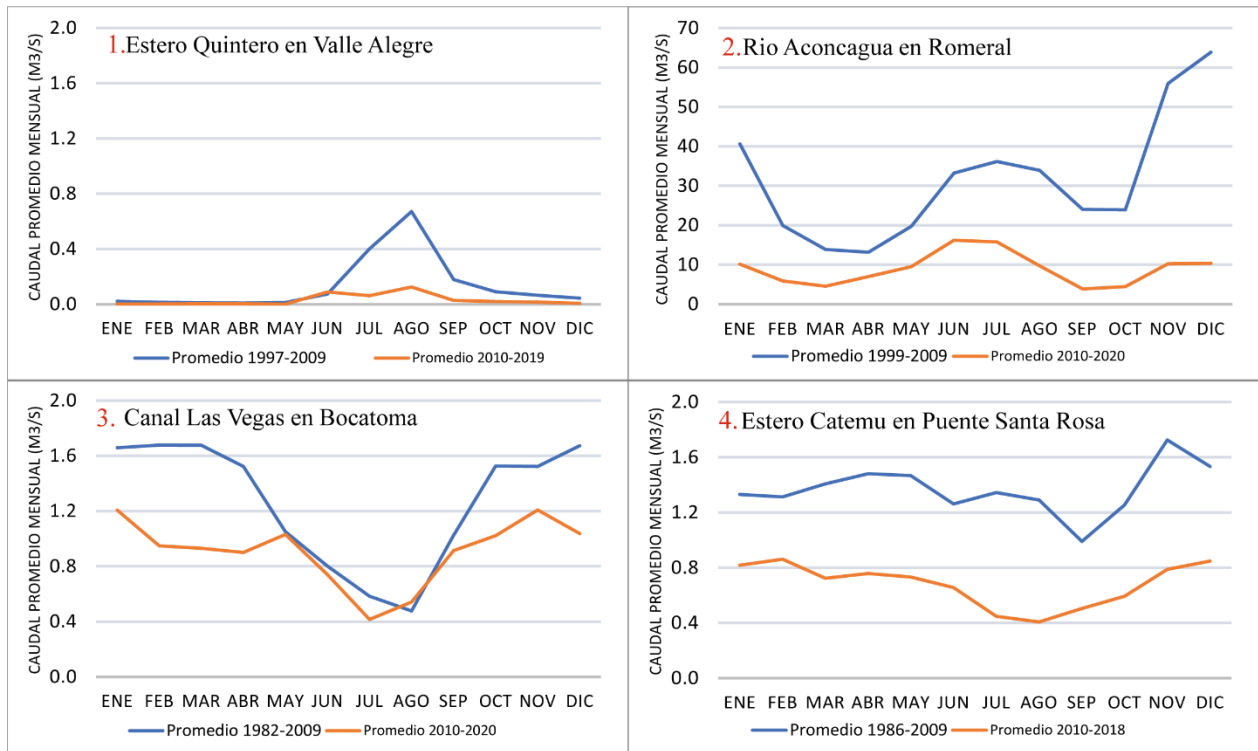


Figura A1: Hidrograma de caudal mensual promedio. En azul periodo previo al 2010, en función de datos disponibles, y en azul promedio 2010-2020.

Anexo 2: Mapa de derechos consuntivos de agua subterránea otorgados por DGA

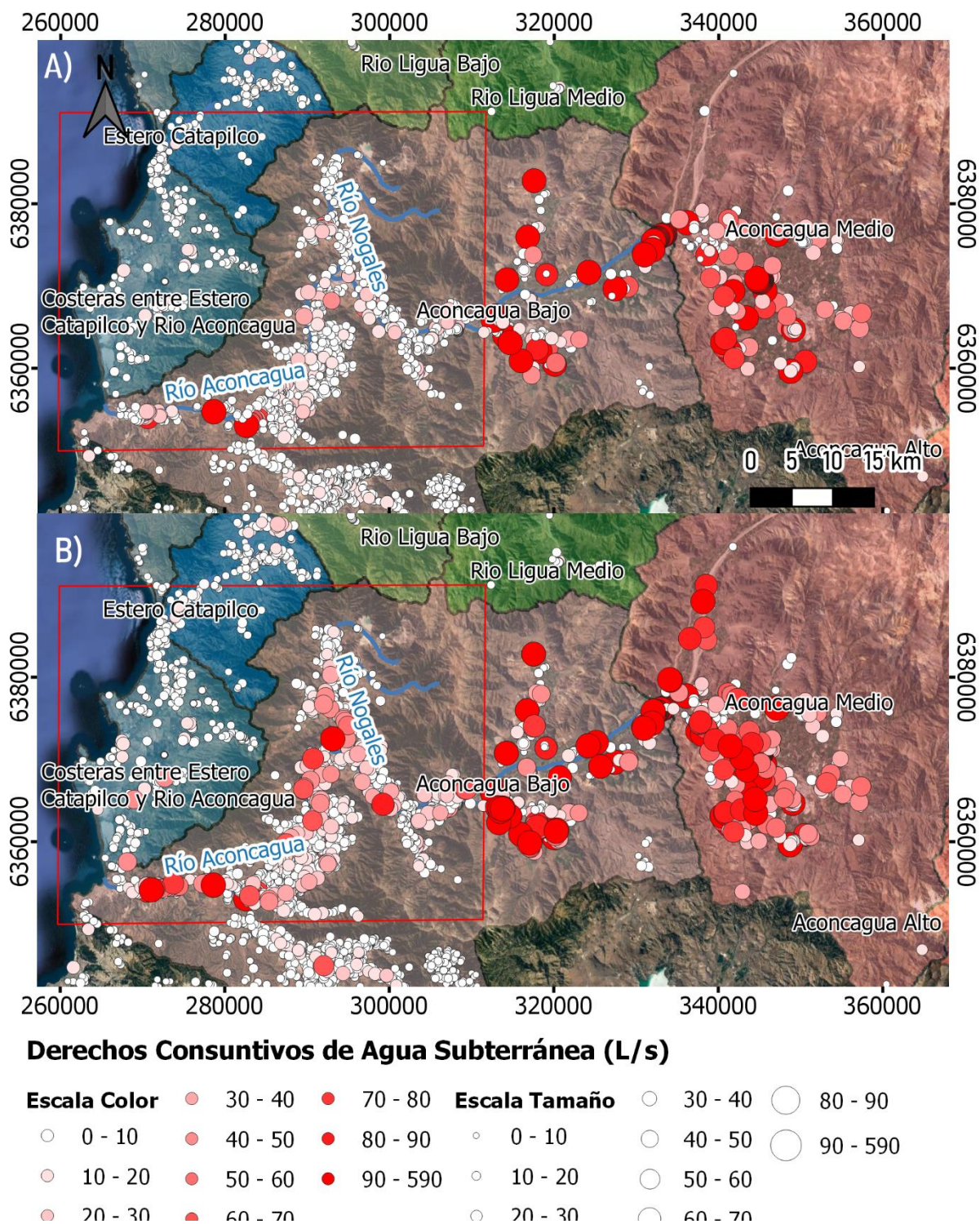


Figura A2: Mapa de los derechos consuntivos de agua subterránea otorgados por la DGA. A) derechos otorgados hasta 2009, y en B) derechos otorgados hasta 2020.

Anexo 3: Piezometría sector C, con línea de tendencia.

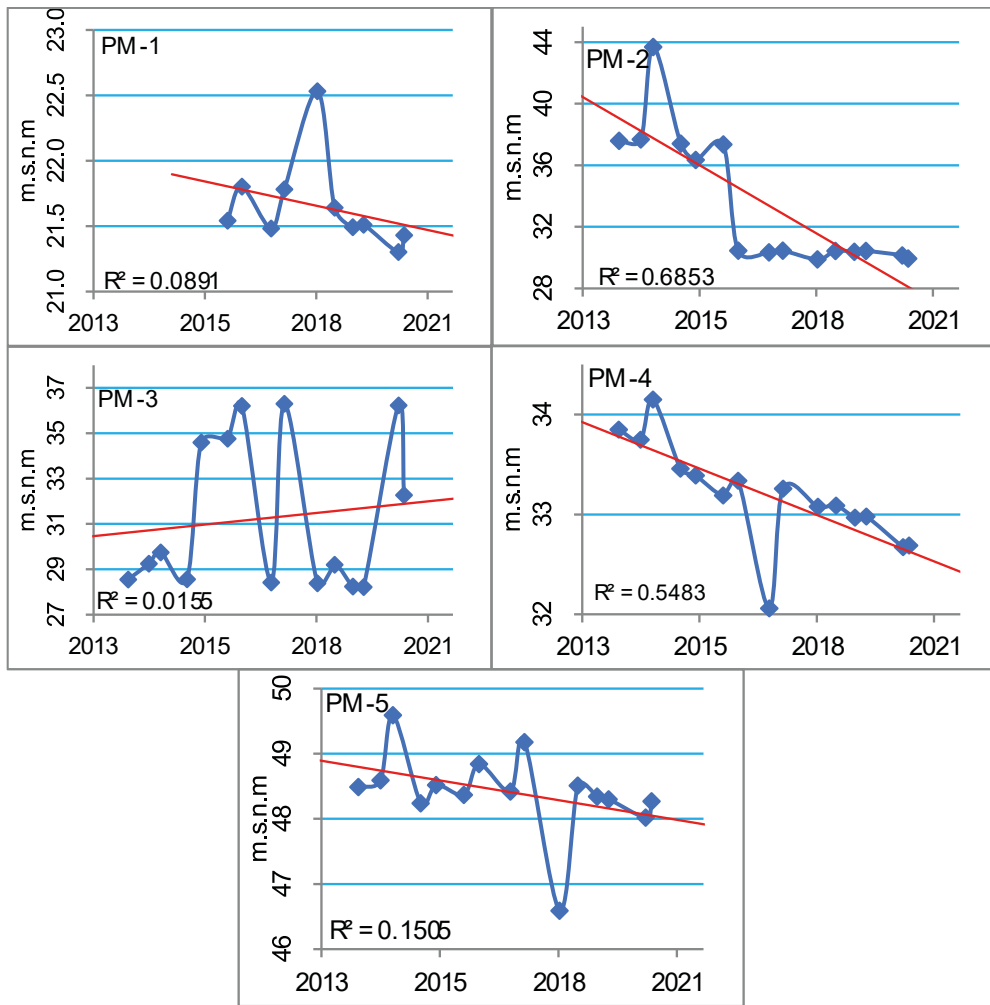


Figura A3: Piezometría Sector C, con línea de tendencia de ajuste lineal.

Anexo 4: Mapa Isopiezas Escorial, Codelco Ventanas. Realizado por HIDROMAS (2016).

