



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Geología

“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ
PARA EL ACUÍFERO ENTRE EL SECTOR LA PUERTA – MAL PASO, TIERRA
AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE”

Profesor Guía: Dr. Mohammad Ayaz Alam

Catalina Fernanda Leyton Guajardo

Copiapó, Chile 2022



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Geología

“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ
PARA EL ACUÍFERO ENTRE EL SECTOR LA PUERTA – MAL PASO, TIERRA
AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE”

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Geóloga.

Profesor Guía: Dr. Mohammad Ayaz Alam

Catalina Fernanda Leyton Guajardo

Copiapó, Chile 2022

Dedicado a mis padres, hermanos y pareja.

Los amo infinito.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi profesor guía Dr. M. Ayaz Alam por darme la oportunidad y apoyarme en la realización de este trabajo.

Luego agradecer a Fernanda Prohens y Francisco Osses, equipo de la Comunidad de Aguas Subterráneas Sectores acuíferos 1, 2 y 3 (CAS 123) por la disponibilidad que tuvieron desde un principio cuando hice la práctica laboral con ellos y por la información entregada.

Finalmente agradecer a mi familia, mis padres Sergio Leyton N. y Rebeca Guajardo A., mis hermanos Sergio y Francisco que siempre han estado conmigo y me han apoyado en todo y mi pareja Francisco Cruz por ser un pilar importantísimo, darme ánimo cuando no lo tenía y estar conmigo durante todo el proceso. Los amo infinito.

ÍNDICE

I. INVESTIGACIÓN PROPUESTA	8
1.1 Problema de investigación	2
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Metodologías	4
II. ÁREA DE ESTUDIO	5
2.1 Ubicación y accesos	5
2.2 Clima	7
2.3 Hidrología	9
2.3.1 Pluviometría	9
2.3.2 Temperatura	13
2.3.3 Escorrentía superficial o caudal medio mensual	16
III. ESTUDIOS PREVIOS	19
IV. MARCO GEOLÓGICO	22
4.1 Geología local	22
V. ESTADO DEL ARTE	29
5.1 Hidrogeología	29
5.2 Modelos	30
5.3 Oferta y demanda del acuífero	30
5.4 Recarga artificial de acuíferos	31
VI. RESULTADOS	33
6.1 Niveles estáticos	34

6.2	Hidrogeología	35
6.2.1	Unidades hidrogeológicas	35
6.2.2	Propiedades hidráulicas: Transmisibilidad (T), Permeabilidad (K) y Coeficiente de Almacenamiento (Sy)	38
6.3	Estratigrafía	41
6.3.1	Basamento rocoso en el área	41
6.4	Perfiles estratigráficos	44
VII.	CONCLUSIONES	58
VIII.	REFERENCIAS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa área de estudio (Sector 3).	5
Figura 2. Mapa de ubicación 6 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común.6	
Figura 3. Distribución esquemática de los fenómenos de El Niño y La Niña. Los colores naranjos representan las aguas más cálidas y las más frías en azul.	8
Figura 4. Ubicación estaciones pluviométricas en la cuenca del rio Copiapó.	10
Figura 5. Gráficos de precipitaciones mensuales entre los años 2017 al 2022. Información basada en datos entregados por la unidad de Hidrología de la DGA, Copiapó.	12
Figura 6. Gráficos de temperaturas máximas mensuales del año 2017 al 2021. Información basada en datos entregados por la unidad de Hidrología de la DGA, Copiapó.	14
Figura 7. Ubicación estaciones fluviométricas en la cuenca del rio Copiapó.....	16
Figura 8. Gráficos de precipitaciones mensuales del año 2017 al 2022. Información basada en datos entregados por la unidad de Hidrología de la DGA, Copiapó.	17
Figura 9. Extracto de Carta Los Loros de la zona de estudio.....	28
Figura 10. Sistema acuífero y sus interacciones con el entorno.....	29
Figura 11. Ubicación de los 6 sectores en la zona de estudio.	33
Figura 12. Valores de transmisibilidades de los diferentes sectores.	38
Figura 13. Mapa con valores de transmisibilidad en el acuífero del valle de Copiapó. .	39
Figura 14. Valores de permeabilidad en los límites entre los sectores acuíferos del valle del río Copiapó.	40
Figura 15. Perfil geoelectrico generalizado del basamento rocoso del valle del río Copiapó, entre el Embalse Lautaro y Piedra Colgada.	42
Figura 16. Mapa con cota del basamento rocoso en escala de colores (m s.n.m.) sobre una imagen Landsat (combinación RGB= 7 4 1). A) Parte alta del valle de Copiapó, B) sector ubicado entre Hornitos y la ciudad de Copiapó.....	44
Figura 17. Perfil Sector 1 (Mal Paso – Nantoco).	46
Figura 18. Perfil Sector 2 (COEMIN - Alianza).	47
Figura 19. Perfil Sector 3 (Totoralillo – Agrícola Millahue).	49
Figura 20. Perfil Sector 4 (Pabellón – Villa María).....	51

Figura 21. Perfil Sector 5 (El Yeso – Hacienda Hornitos).....	53
Figura 22. Perfil Sector 6 (Qda. Buenos Aires – La Puerta).....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas estaciones pluviométricas DGA.	9
Tabla 2. Descripción de los diferentes sectores y sus pozos.	35

RESUMEN

Dentro de la zona de estudio correspondiente al sector entre La Puerta – Mal Paso se realizan labores de agricultura intensiva (uvas de exportación) y minería, existiendo una gran extracción de agua subterránea. El fin de este trabajo será investigar y modelar el sistema hidrogeológico de un fondo de valle, generando un modelo conceptual con el objetivo de ver cuál es el impacto que tiene en el acuífero esta extracción y analizando los diferentes factores que intervienen en el correcto funcionamiento del acuífero. Se analizaron los niveles estáticos de 63 pozos de extracción entre los años 2017 y comienzos de 2022, observando sus variaciones a través del tiempo y complementándolas con informaciones obtenidas de estaciones meteorológicas de la DGA. La información resultante se representó a través de perfiles hidrogeológicos con una escala 1:35.000, en los cuales se puede ver una tendencia de disminución en los niveles estáticos de 3 a 10 m/año. Se sugieren algunas formas de mitigar los descensos de los niveles en el acuífero.

Palabras claves: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL – NIVEL ESTÁTICO – ESCASEZ HÍDRICA

ABSTRACT

The study area between La Puerta - Mal Paso, intensive agriculture (export grapes) and mining activities are carried out, with a large extraction of groundwater, the purpose of this work will be to investigate and model the hydrogeological system of a valley floor, generating a conceptual model in order to see what impact this extraction has on the aquifer and analyzing the different factors involved in the proper functioning of the aquifer. The static levels of 63 extraction wells between 2017 and the beginning of 2022 were analyzed, observing their variations over time and complementing them with information obtained from DGA meteorological stations. The resulting information was represented through hydrogeological profiles with a scale of 1:35,000, in which a decreasing trend in static levels from 3 to 10 m/year can be seen. Some ways of mitigating drops in aquifer levels are suggested.

Keywords:

CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL – STATIC LEVEL – WATER SHORTAGE

1.1 Problema de investigación

La escasez hídrica presente en la región de Atacama es un problema real, en donde existe una incertidumbre hidrológica muy grande, debido al creciente desarrollo de actividades agrícolas y mineras en la región, generando un gran interés en los recursos hídricos subterráneos y superficiales (Concha *et al.*, 2020). Además, la región de Atacama está caracterizada por un clima árido a hiperárido (Hartley *et al.*, 2005), reafirmando su interés hidrogeológico.

Las regiones áridas son especialmente vulnerables a megasequía, debido a la limitación de los recursos hídricos y al control que ejerce el clima sobre la actuación de los procesos geomorfológicos y sobre el funcionamiento de los ecosistemas (Tully *et al.*, 2018).

Cabe destacar que, a pesar de la extrema aridez, en donde la precipitación es casi nula, la región de Atacama ha sido testigo de importantes eventos de precipitación a lo largo de su historia, siendo estos episodios favorables para la recarga del acuífero. Estos ocurren durante el verano, relacionado al movimiento de los frentes extra tropicales, dominados por el fenómeno de “El Niño” (Bozkurt *et al.*, 2016). De acuerdo al registro disponible, Atacama ha sido reiteradamente afectada por eventos de inundaciones extremas en los últimos 400 años (Izquierdo *et al.*, 2018).

Adicionalmente se debe tener en consideración que la minería chilena sigue siendo, seguida por la agricultura, la actividad que más recursos económicos entrega al erario del país y ambas dependen fuertemente de la disponibilidad de agua. En el Norte Chico desde 1987 al 2010 la cantidad de agua disponible ha bajado 65% y al año 2026 habrá disminuido en 5% adicional (Concha *et al.*, 2020).

El área de estudio corresponde al sector La Puerta – Mal Paso, ubicado dentro de la Cuenca del Río Copiapó, abarcando parte de la ciudad de Tierra Amarilla, zona de la Depresión Intermedia.

Sabiendo de base que en el sector de estudio se realizan labores de agricultura intensiva (uvas de exportación) y minería, el fin de este trabajo será investigar y modelar el sistema hidrogeológico de un fondo de valle, generando un modelo conceptual con el objetivo de

ver cuál es el impacto que tiene en el acuífero esta extracción. El estudio de este sector hidrológico podría dilucidar o ayudar entender el comportamiento climático reciente, junto a la intervención del humano y cómo afecta a las aguas subterráneas del sector.

Es necesaria la realización de esta investigación debido a la escasez hídrica que nos afecta hoy en día.

1.2 Hipótesis

El presente trabajo busca ver cuáles fueron las variaciones de los niveles estáticos entre los años 2017 a comienzos de 2022 y ver que sectores son los más perjudicados. Se tiene en conocimiento que los pozos ubicados en el sector son de uso agrícola y minero, teniendo en cuenta que hoy en día la disponibilidad del recurso hídrico es menor que la demanda y que la cantidad de extracción agrícola supera en porcentaje a la extracción minera.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Caracterizar el régimen hidrogeológico del sector 3 de la cuenca del río Copiapó, revelando recargas, perfil de subsuelo, pozos de extracción, propiedades hidráulicas con el fin de realizar un modelo hidrogeológico conceptual para visualizar el efecto en el acuífero de la extracción de agua en los pozos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Preparar un catastro actualizado de pozos de agua subterránea y respuesta de los acuíferos a las tasas de extracción.
- Análisis de la información hidrométrica actual, precipitación, caudales, niveles estáticos y recarga del acuífero; considerando la información de demanda de agua potable para la agricultura y minería.
- Establecer un modelo hidrogeológico conceptual entre el sector de La Puerta – Mal Paso, generando la geometría, límites de acuífero y estratigrafía.

- Conocer las fluctuaciones durante el tiempo analizado de los niveles estáticos.
- Establecer la dinámica y evaluar los cambios.

1.4 Metodologías

- Recopilación y análisis de material bibliográfico e información geológica e hidrogeológica a través de publicaciones científicas e información de la DGA u otras instituciones. Además de obtener una imagen satelital del área de estudio para poder desarrollar parte del modelo hidrogeológico conceptual.
- Identificación, caracterización y delimitación de las unidades de depósitos no consolidados y semiconsolidados que constituyen el relleno sedimentario del valle del río Copiapó en la zona de estudio.
- A través de información entregada por la Comunidad de Aguas Subterráneas 123, obtener los perfiles estratigráficos de los pozos activos de la zona de estudio, y a su vez las mediciones en terreno de los niveles estáticos del año 2017 al marzo de 2022, la cual nos ayudara a dilucidar el comportamiento hidrológico entre los años indicados.
- Con la información recopilada se obtendrá un modelo hidrogeológico conceptual con la ayuda del SIG ArcGIS 10.5.

II. ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación y accesos

La cuenca hidrográfica del Río Copiapó, ubicada en la Región de Atacama, tiene una extensión de 18.704,07 km² y una longitud de 162 km, en donde el Río Copiapó nace de la unión de los tributarios Jorquera, Pulido y Manflas (División de Planificación y Desarrollo, 2019). La Dirección General de Aguas (DGA), para gestión técnica y administrativa de las aguas subterráneas dividió el acuífero de Copiapó en 6 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (Figura 2), en donde la zona de estudio corresponde al Sector 3 (La Puerta – Mal Paso), coordenadas 27°52′ S, 70°26′ O – 27°81′S, 70°13′O, con una superficie de 1.439 km². El sector La Puerta se ubica en el límite SE y Mal Paso en el límite NW (Figura 1).

Dentro del lugar de estudio se encuentran las localidades de Nantoco, Totoralillo, Pabellón y La Puerta, junto a los sectores Fundo Villa María, El Yeso, Hornitos, Tres Puentes y La Puerta, todos pertenecientes a la comuna de Tierra Amarilla.

La zona es de fácil acceso, la cual se realiza por la carretera C-35, el inicio del Sector 3 se encuentra a 2 km al norte de la localidad de Nantoco, finalizando a 22 km al SE de la localidad de Pabellón (Sector La Puerta).

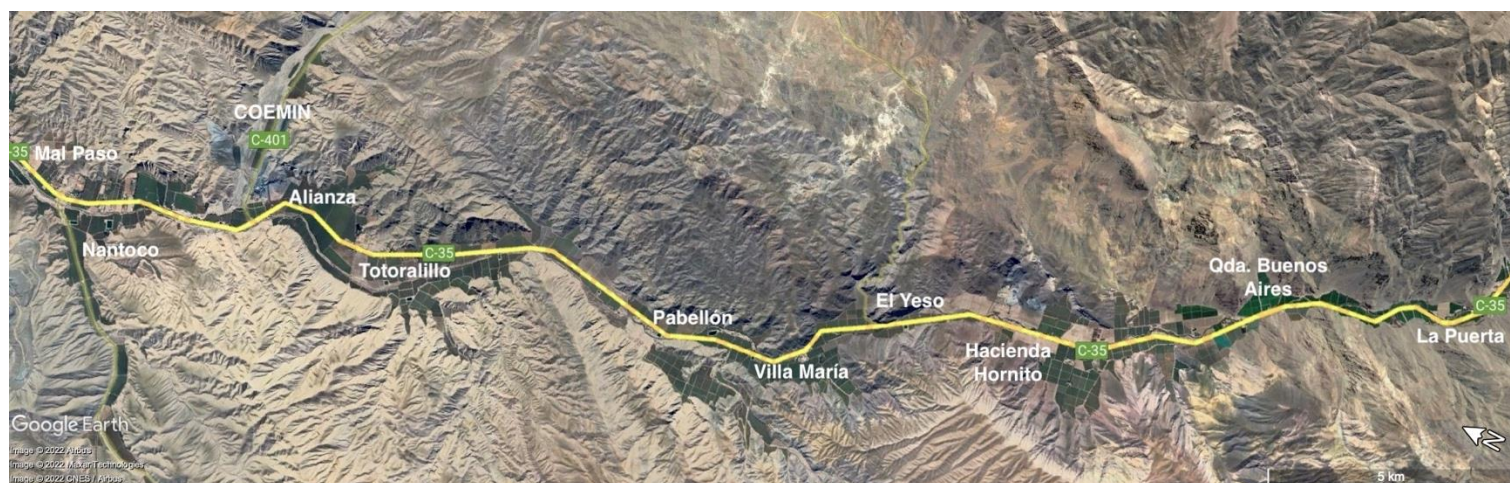


Figura 1. Mapa área de estudio (Sector 3). *Elaboración propia.*

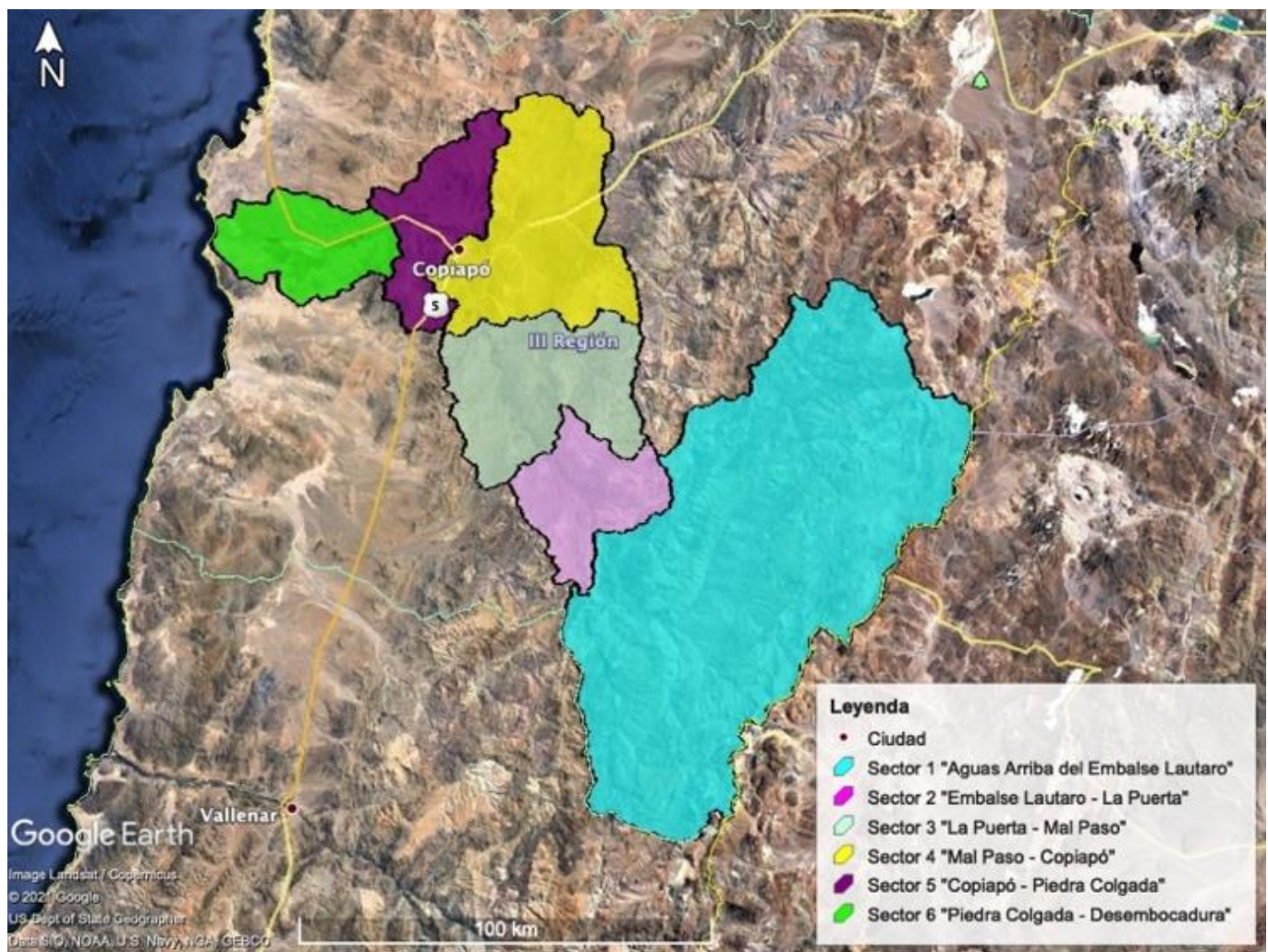


Figura 2. Mapa de ubicación 6 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común. *Elaboración propia.*

2.2 Clima

El desierto de Atacama se extiende entre los 18° y 31°S, siendo el desierto más seco y antiguo de la Tierra con una precipitación media anual inferior a 5 mm en sus zonas más secas (Bozkurt *et al.*, 2016). El clima del desierto de Atacama está controlado principalmente por dos factores: primero por su ubicación zonal entre los 15° y 30°S en el cinturón subtropical de alta presión. Aquí el aire del Anticiclón del sudeste del Pacífico es seco y descendiente, el cual es parte de una circulación global denominada Celda de Hadley, la cual inhibe el movimiento vertical del aire y por lo tanto la formación de nubes y precipitación. En segundo lugar, la corriente de Humboldt (corriente oceánica fría) inhibe la humedad de los vientos en la tierra, creando una inversión persistente que atrapa cualquier humedad del Pacífico por debajo de los 1000 m s.n.m. Por último, existe otro factor asociado a la Cordillera de los Andes, en donde se implementó un efecto de sombra de lluvia significativo para las masas de aire y humedad del océano Atlántico (Houston, 2006).

En las regiones desérticas la desecación llega a profundidades de varios metros. Efecto que se exacerba por la pérdida de agua que absorben las plantas a través de sus raíces. La transpiración se favorece con humedades bajas, temperaturas elevadas y viento. Algunos desiertos tienen un drenaje exorreico, como las partes meridionales del sur del desierto de Atacama, ya que tienen una gran alimentación procedente de los Andes (Elorza, 2008).

En Chile se monitorea la intensidad del Anticiclón de sudeste de Pacífico a través de mediciones de la presión atmosférica en estaciones meteorológicas a lo largo de sus bordes oriental, occidental y centro (Arica, Iquique, Antofagasta, Isla de Pascua, La Serena, Juan Fernández, Santiago y Concepción). Desde el 2007 se observa un aumento en la intensidad del anticiclón y coincide de manera casi exacta con lo que se conoce como mega sequía, en donde se reafirma la relevancia de este en las lluvias de Chile (Dirección Meteorológica de Chile, 2019).

La oscilación del anticiclón coincide con el ciclo de El Niño/a, donde la relación llamada Oscilación del Sur, indica que a mayor intensidad del anticiclón menor es la temperatura del Pacífico Ecuatorial, es decir el ciclo de La Niña, y en el caso contrario corresponde al ciclo de El Niño. En un evento de El Niño predominan las aguas cálidas en el Pacífico Ecuatorial (Figura 3), produciéndose a su vez la disminución de la presión superficial en la región del anticiclón, por otro lado, existe un incremento en las cercanías de Australia e Indonesia. Bajo un evento de La Niña ocurre el proceso inverso (Dirección Meteorológica de Chile, 2019).

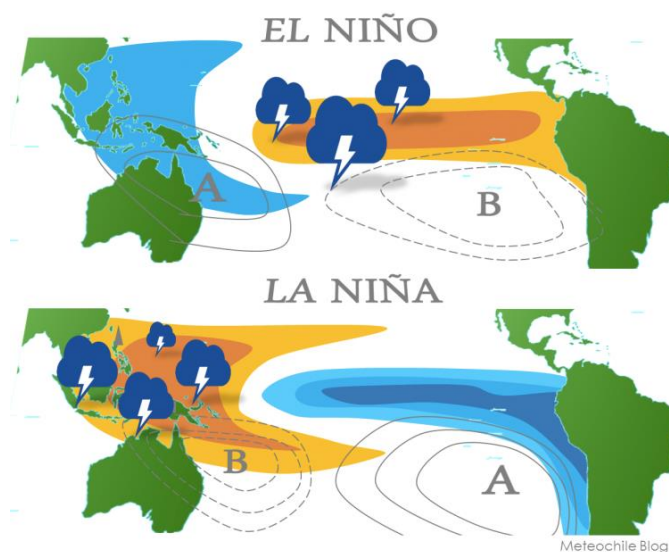


Figura 3. Distribución esquemática de los fenómenos de El Niño y La Niña. Los colores naranjos representan las aguas más cálidas y las más frías en azul. Tomado de <https://blog.meteochile.gob.cl/>.

Los eventos extremos pueden ocurrir en cualquier fase del ciclo de Oscilación del Sur de El Niño (ENSO). Se pueden reconocer tres fases: fase neutra, fase cálida que se conoce como "El Niño" y fase fría que se llama "La Niña". Existe una tendencia a eventos de lluvia más frecuentes en el norte de Chile durante los años que se encuentra presente el fenómeno de El Niño (Sparelli, 2018).

2.3 Hidrología

2.3.1 Pluviometría

Dado que la escasa precipitación constituye una de las principales fuentes de recarga del acuífero, el análisis de las estadísticas de precipitaciones cobra importancia para la estimación de los aportes al sistema subterráneo.

Los datos de precipitaciones mensuales entre los años 2017 – 2022, fueron entregados por la unidad de hidrología de la DGA, Copiapó. Se analizaron los datos de 9 estaciones pluviométricas que registran precipitación pluvial y 1 que mide precipitación nival (Figura 4).

La información de cada estación pluviométrica se presenta en la siguiente tabla:

Estación	Coordenada N	Coordenada E
Elibor Campamento	6935071	381452
Jorquera en La Guardia	6930458	433805
Rio Copiapó en La Puerta	6923599	388860
Los Loros	6921171	389736
Rio Copiapó en Pastillos	6902002	403931
Lautaro Embalse	6904740	401234
Rio Pulido en Vertedero	6892586	407371
Manflas Hacienda	6888488	404368
Iglesia Colorada	6885854	412757
Glaciar Maranceles	6851933	429154

Tabla 1. Coordenadas estaciones pluviométricas DGA. *Elaboración propia*

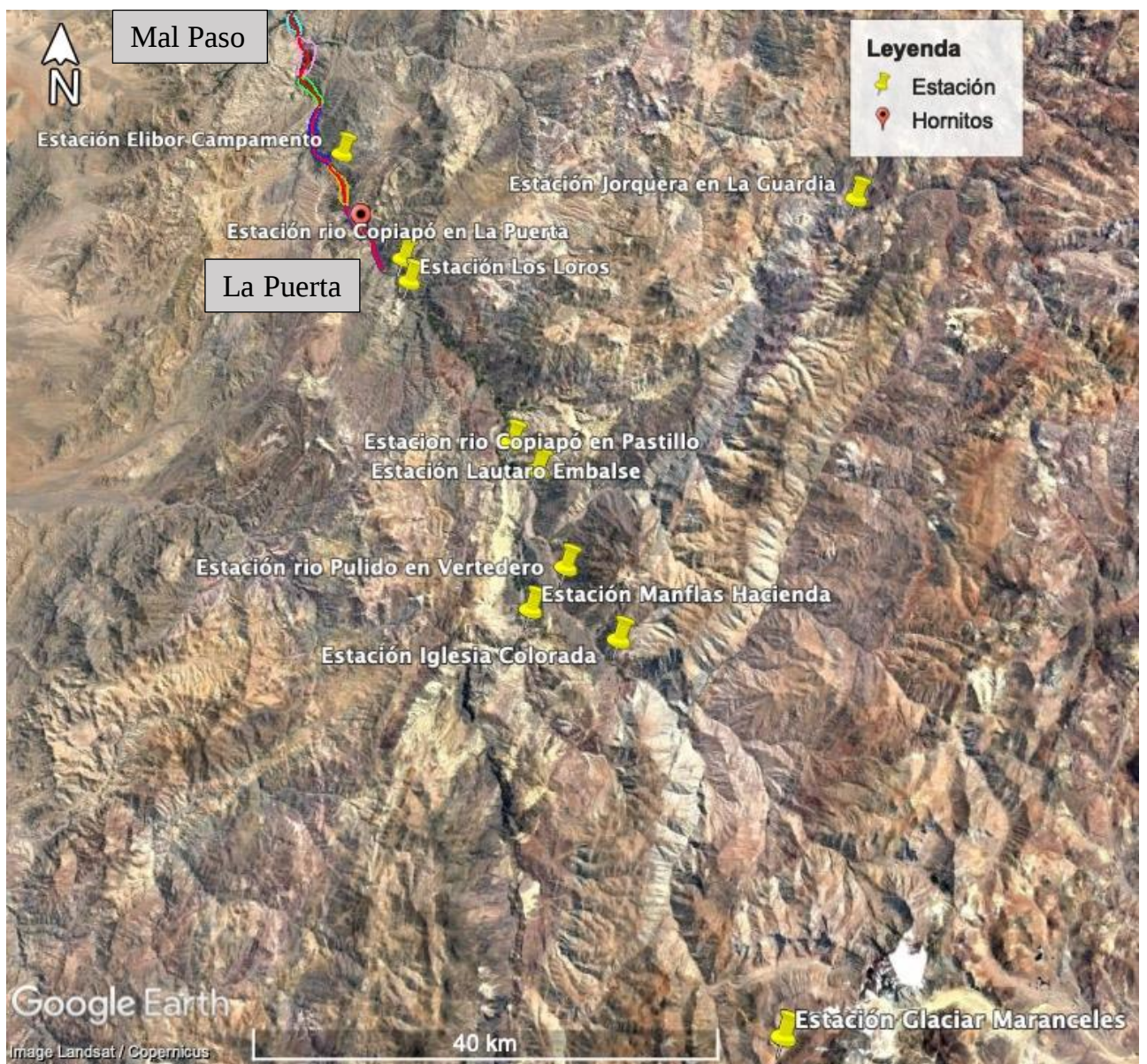
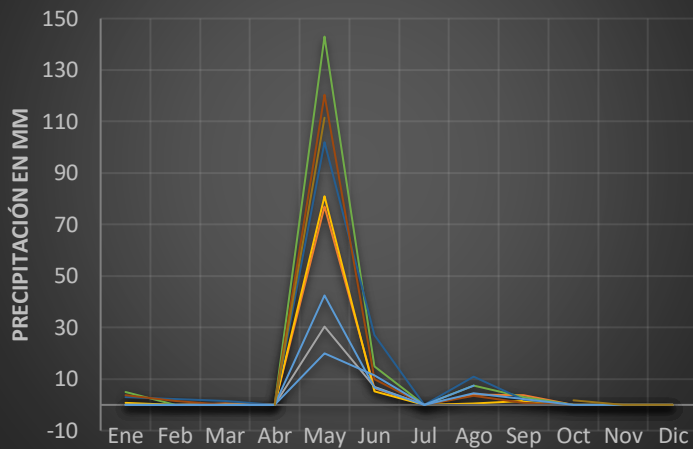


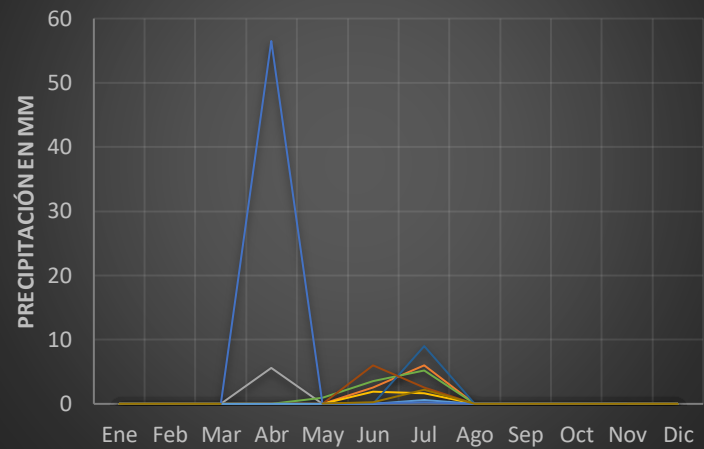
Figura 4. Ubicación estaciones pluviométricas en la cuenca del río Copiapó. *Elaboración propia.*

Los siguientes gráficos (Figura 5) representan los datos de precipitaciones mensuales entre los años 2017 – 2022.

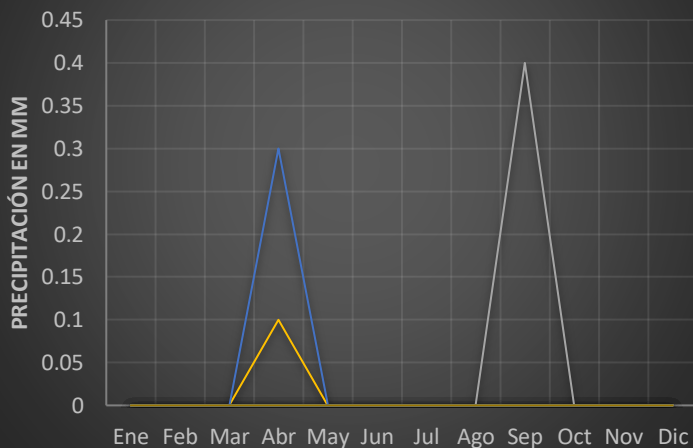
Precipitaciones mensuales año 2017



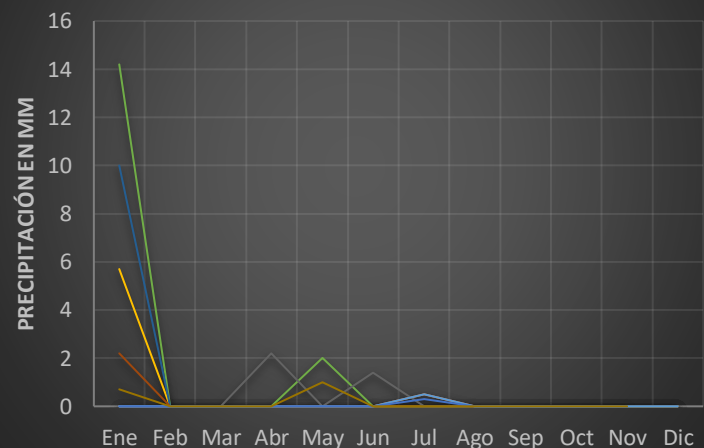
Precipitaciones mensuales año 2018



Precipitaciones mensuales año 2019



Precipitaciones mensuales año 2020



— Lautaro Embalse	— Los Loros
— Rio Copiapó en Pastillos	— Iglesia Colorada
— Jorquera en La Guardia	— Manflas Hacienda
— Glaciar Maranceles	— Elibor Campamento
— Rio Copiapó en La Puerta	— Rio Pulido en Vertedero

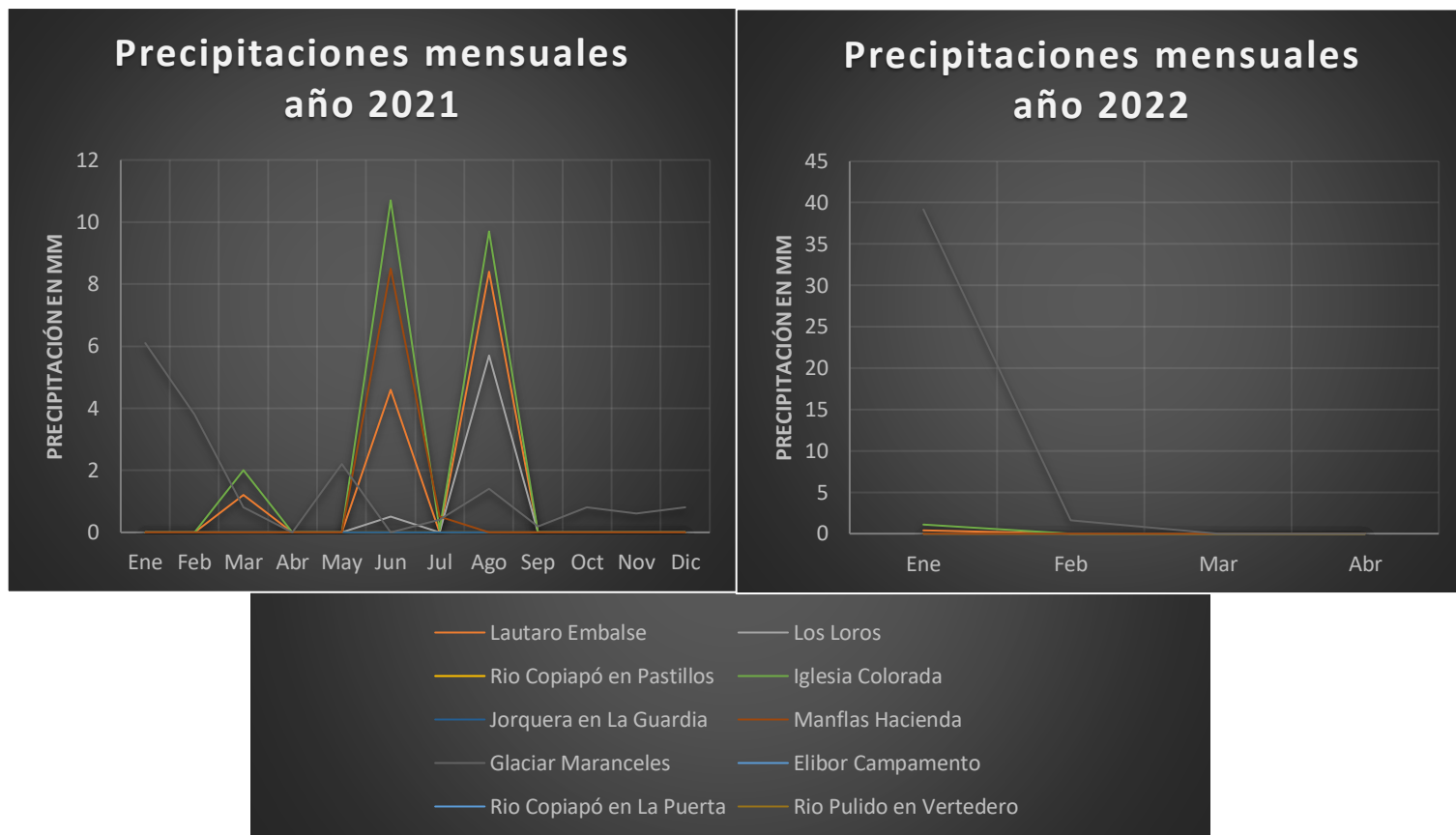


Figura 5. Gráficos de precipitaciones mensuales entre los años 2017 al 2022. Información basada en datos entregados por la unidad de Hidrología de la DGA, Copiapó. *Elaboración propia.*

La cantidad de precipitaciones anuales y su dispersión en el tiempo histórico en los años 2017 y 2018 se centran principalmente en los meses de otoño, 2019 en invierno – primavera, 2020 en verano, 2021 otoño-invierno e inicios de 2022 en verano.

En el año 2017 se observa un aumento de precipitaciones en todas las estaciones meteorológicas de la DGA entre los meses de abril y junio, siendo el mes de mayo el de mayor peak, llegando a los 143 mm en la estación Iglesia Colorada, a 1.550 m s.n.m. aproximadamente (Figura 5). Este evento provocó el desborde del río Copiapó en el sector Hornitos, afectando las localidades de Tierra Amarilla y Copiapó; significando una recarga importante para el acuífero, luego de la precipitación y evento aluvional del año 2015.

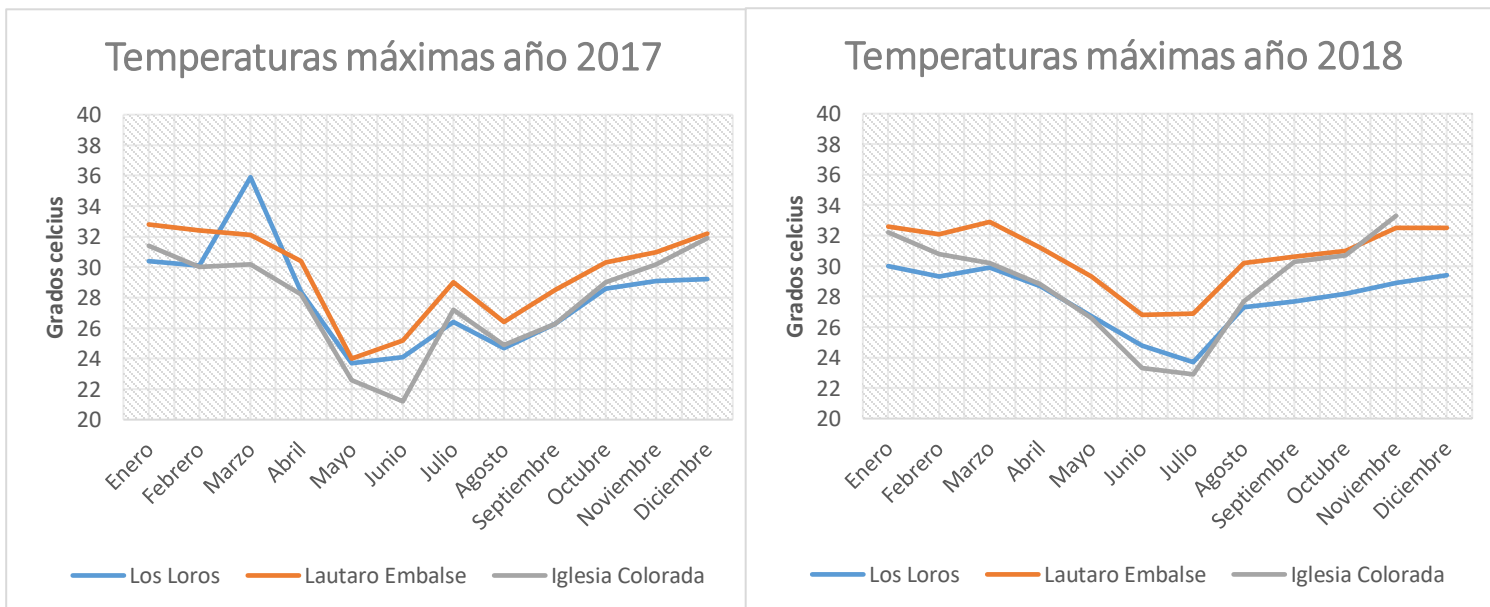
En general, los niveles de precipitaciones durante el año 2018 fueron bajos, siendo un máximo de 10 mm. Por otro lado, el año 2019 la precipitación fue prácticamente nula, existiendo una precipitación mínima en la estación Los Loros con 0,4 mm. No existió una recarga por precipitación al acuífero asociada a este año. En el año 2020 la precipitación se centró en el mes de enero con un máximo de 14 mm en la estación Iglesia Colorada y valores bajos de 3 mm aproximadamente entre los meses de abril y junio. En el año 2021 se observan 2 eventos de precipitación con un peak en los meses de junio y agosto, en donde estos se registraron en la estación Iglesia Colorada con 11 mm y 10 mm respectivamente.

2.3.2 Temperatura

Al igual que la información anterior, los siguientes datos de temperaturas máximas y mínimas diarias fueron entregados por la unidad de hidrología de la DGA, Copiapó.

Las estaciones observadas son 3: Los Loros, Lautaro embalse e Iglesia Colorada (Figura 4).

El período histórico presenta una tendencia en el aumento de la temperatura a través de los años.



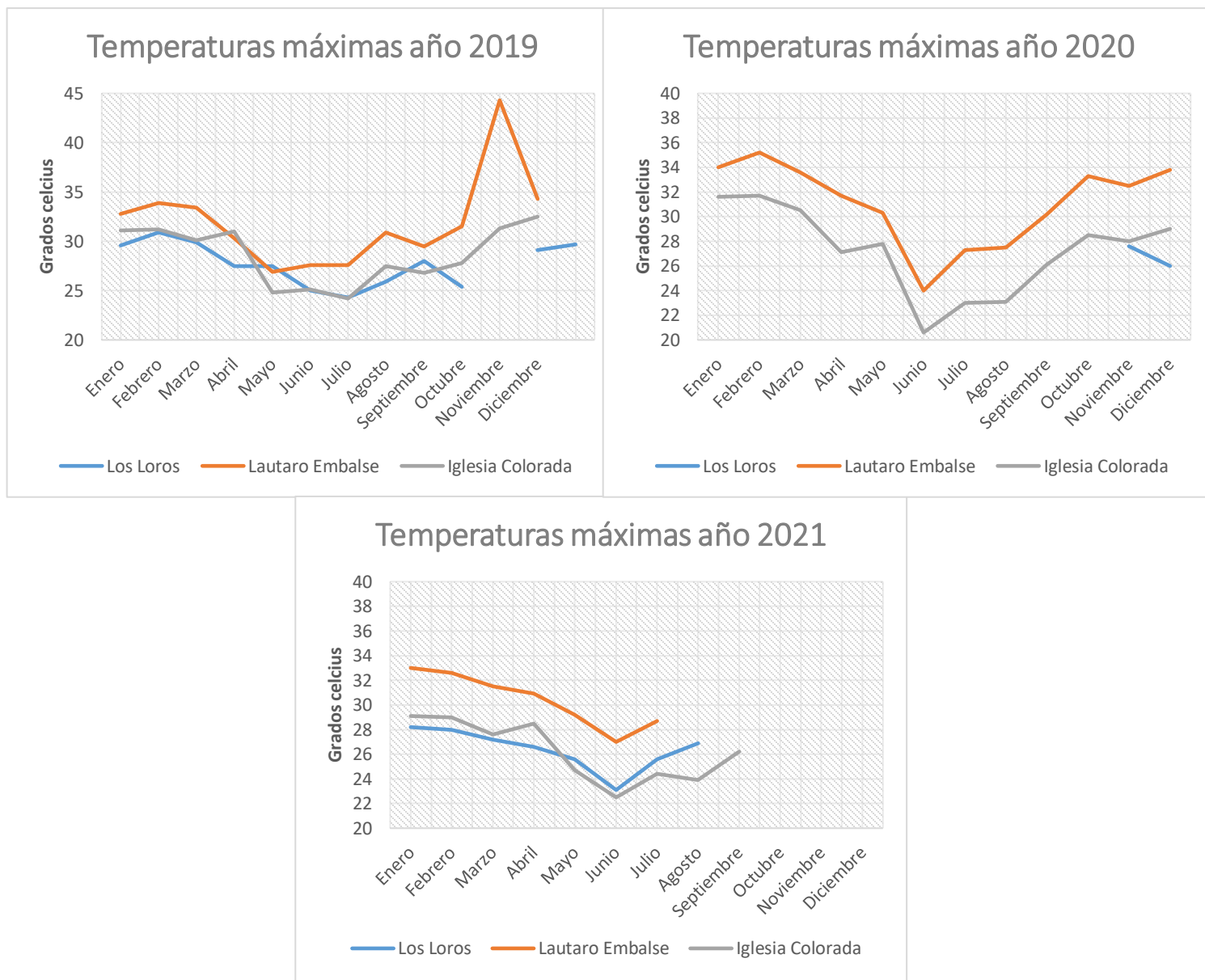


Figura 6. Gráficos de temperaturas máximas mensuales del año 2017 al 2021. Información basada en datos entregados por la unidad de Hidrología de la DGA, Copiapó. *Elaboración propia.*

De acuerdo a gráficos elaborados con las temperaturas máximas anuales desde el año 2017 hasta el 2021, se observa un incremento en la amplitud térmica a medida que ascendemos en el valle.

En el año 2017 durante los meses de verano existe un promedio de temperaturas máximas de 33°C, y durante el mes de junio un máximo de 21°C. Esta tendencia se repite en el año 2018.

En el año 2019 durante los meses de junio – julio se registró un máximo de 24°C y en el mes de noviembre existió un máximo de 45°C en la estación Lautaro Embalse. El 2020 durante el mes de febrero se registró un peak de 35°C y en junio una máxima de 21°C.

Por último, en el año 2021 se registró una máxima de 33°C en el mes de enero y una máxima de 23°C en el mes de junio.

2.3.3 Escorrentía superficial o caudal medio mensual

El río Copiapó escurre aguas abajo con una dirección general SE a NW.

Las tasas de escurrimiento se ven afectadas por las sequías. Según IGM (1984) los glaciares Los Helados, Maranceles y el cerro del Potro (5.830 m s.n.m.) en la Alta Cordillera, constituyen la mayor fuente de recurso hidrológico del río Copiapó (Aguirre *et al.*, 1999).

Los antecedentes sobre la escorrentía superficial corresponden a mediciones efectuadas en estaciones fluviométricas. Se obtuvieron datos de los caudales medios mensuales de 7 estaciones entre los años 2017 – 2022, los cuales fueron entregados por la unidad de hidrología de la DGA, Copiapó (Figura 7).



Figura 7. Ubicación estaciones fluviométricas en la cuenca del río Copiapó. *Elaboración propia.*

El escurrimiento del río Copiapó está influenciado por la presencia del tranque Lautaro desde el año 1939 y afectado por extracciones de agua subterránea mediante pozos, norias y canales. La Figura 7 muestra los caudales medios anuales del año 2017 hasta principios de 2022.

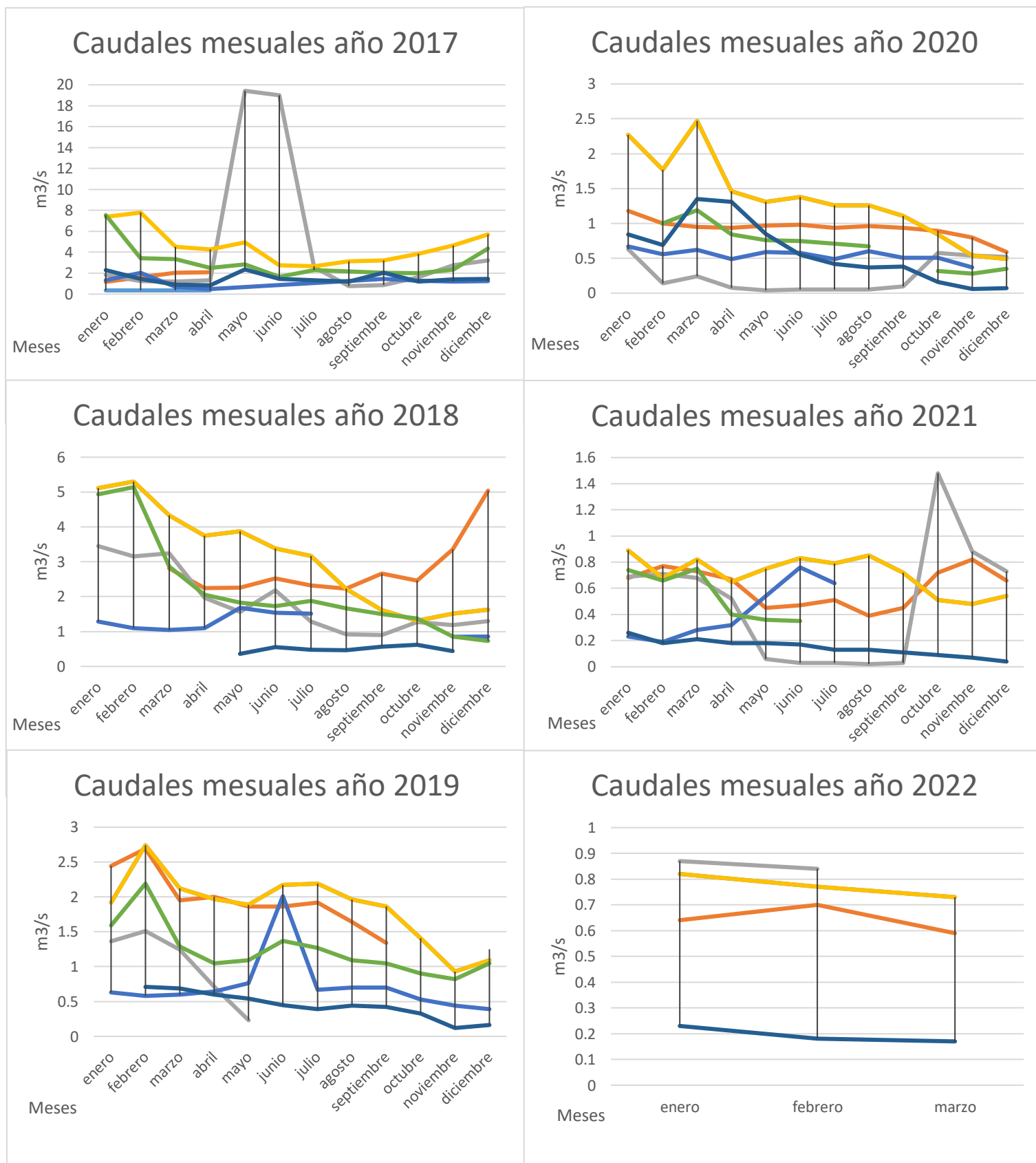
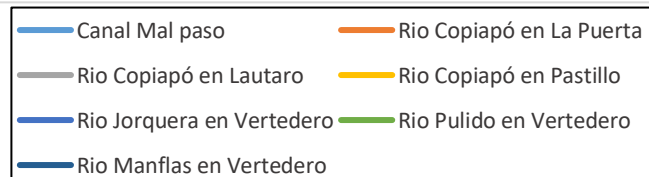


Figura 8. Gráficos de precipitaciones mensuales del año 2017 al 2022. Información basada en datos entregados por la unidad de Hidrología de la DGA, Copiapó. *Elaboración propia.*



Los valores medidos en las estaciones no corresponden al escurrimiento total natural ya que este se ve afectado por el embalse Lautaro y por las extracciones de agua para riego.

El año 2017 existe un aumento de caudal en los meses de otoño ($20 \text{ m}^3/\text{s}$), debido a un frente de mal tiempo el cual tuvo la cota de precipitación más alta de lo normal, desencadenando una fuerte crecida del río producto de la recurrencia de quebradas aguas abajo. Esto provocó un aluvión el cual afectó la comuna de Tierra Amarilla y Copiapó.

Consecutivamente el resto de los años se observa una brusca disminución del caudal, debido a la poca y escasa precipitación presente en la región, llegando a valores cercanos a 0 desde el año 2019 hasta el 2022.

III. ESTUDIOS PREVIOS

- **SERNAGEOMIN (2012).** Evaluación hidrogeológica de la cuenca del río Copiapó, con énfasis en la cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

En el sector 3 (La Puerta – Mal Paso) la variación de profundidades es muy amplia, va desde los 30 m hasta los 75 m b.s.t. Las mayores profundidades se encuentran en el sector de Elisa de Bordos mientras que las menores en el sector de Nantoco.

De acuerdo a Diagramas Piper, las aguas son clasificadas como aguas sulfatadas cálcicas a pesar de los cationes de algunas muestras entran en el campo del sodio y potasio. Se observa además un aumento en el porcentaje de cloruros, sin embargo, no alcanza a ser el anión dominante.

Según el Diagrama de Stiff, las aguas inicialmente son dulces mineralizadas o moderadamente salobres, luego existe un sector de transición para finalmente observar aguas salobres, los iones predominantemente continúan siendo el calcio y el sulfato.

De acuerdo al agua potable, se observan altos valores de As.

- **Aldunate (2017).** Evaluación de métodos de recarga gestionada en la cuenca de Copiapó.

Este trabajo muestra algunas de las alternativas posibles para buscar la recuperación del acuífero. Presentando resultados positivos con 2 modelos analizados con una mejora de 12,75% y 40%, siendo el modelo de pozos el que entregó mejoras destacadas en el balance hídrico. En la recuperación de niveles en el sector 3 hubo aumentos entre 5 y 30 m del acuífero.

En el sector la Puerta el basamento rocoso se encuentra a menor profundidad lo que permite el afloramiento de aguas subterráneas.

La calidad del agua que se busca introducir al acuífero es de suma importancia, debido a que no se busca cambiar las características hidroquímicas que posee y así evitar modificar las condiciones naturales.

- **UTP Hídrica – Eridanus (2020).** Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Copiapó.

Propone un plan estratégico para la cuenca del río Copiapó, para conocer la oferta y demanda actual, establecer un balance hídrico y sus proyecciones a los años 2030 y 2050. Solo con respecto al área de estudio (La Puerta – Mal Paso) se tiene que:

- Las demandas consuntivas del año 2019 son 60% agrícola, 30% mineras y 10% agua potable urbana.
- Los pozos de extracción identificados fueron 54.
- El modelo numérico acoplado en el período de calibración (1991-2019) se especifica un flujo interacuífero de 34 l/s y recarga superficie total 1.279 l/s, teniendo un total de entrada de 1.312 l/s, la recarga de superficie total corresponde a la suma de la recarga por riego y desde el río.
- La demanda hídrica APR actual y futura corresponde a: 2019 con 69.252 m³/año, 2030 con 149.874 m³/año y 2050 con 610.039 m³/año.
- Utilizando el valor de la variable de estado nivel freático dentro del modelo acoplado se obtuvo la variación del volumen para los 50 años de análisis, teniendo una variación de 7,4 % en el sector. Considerando que el volumen de explotación sustentable para este periodo de tiempo corresponde a una variación de 5%, no cumple con el criterio, por lo tanto, no posee un caudal sustentable a explotar.

- Se considera una iniciativa de implementación de recarga artificial del acuífero en la zona media de la cuenca del río Copiapó, correspondiente a los sectores La Puerta-Mal Paso y Mal Paso-Copiapó; con el fin de hacer frente al déficit hídrico actual. Esto se llevaría a cabo generando información sobre las características hidrogeológicas del sector, para que permitan identificar las mejores zonas de infiltración, además de analizar la calidad de las aguas que infiltrarían en las zonas escogidas, y seleccionar la metodología de recarga más adecuada (piscinas, pozos de inyección u otros).

IV. MARCO GEOLÓGICO

4.1 Geología local

En el valle del río Copiapó las diferentes unidades litológicas pueden ser agrupadas en depósitos no consolidados y basamento rocoso indiferenciado. Los primeros constituyen el relleno sedimentario del valle del río.

De acuerdo a la carta Geológica de Los Loros (2005) se encuentran las siguientes Unidades dentro de la zona de estudio:

JURÁSICO – CRETÁCICO INFERIOR

Grupo Chañarcillo (Cretácico Inferior): Las unidades de este periodo incluyen rocas sedimentarias agrupadas en el Grupo Chañarcillo (Fms. Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón) y rocas intrusivas Hipabisales de composición intermedia a básica.

Formación Abundancia: Secuencia de lutitas laminadas ubicadas al este de la mina Abundancia. La Formación se expone a ambos flancos del valle del río Copiapó y al oeste de la sierra El Bronce como una serie calcáreo-arenosa, bien estratificada, de alrededor de 200 m de espesor, que aparece cubierta en concordancia por las calizas de la Formación Nantoco y sobreyacen concordantemente a la Formación Punta del Cobre.

Secuencia formada por alternancia rítmica entre calcilutitas blanquecinas y grauwackas verde oscuras, aportando un aspecto “bandeado”. Lateralmente continuas, macizas e internamente gradadas a calcilutitas laminadas. En la parte basal y media se intercalan capas de volcarenitas verde oscuras de grano fino, muy grueso y conglomerático con gradación normal y bases erosivas (Arévalo, 2005).

Formación Nantoco: Secuencia monótona de calizas grises de 800 a 1.200 m de espesor que se apoyan en concordancia sobre los estratos de la Formación Abundancia y subyace, de la misma manera a la Formación Totoralillo.

Formación dividida en 2 miembros, el Inferior conformado por 600 a 1.000 m de calcilutitas y calcilutitas limosas (mudstones) en capas lateralmente muy continuas; y el miembro Superior conformado por calcilutitas negras finamente laminadas y calcarenitas amarillentas, lateralmente muy continuas (Arévalo, 2005).

Formación Totoralillo: Secuencia de calcilutitas de 180 a 300 m de espesor, buena estratificación y color de meteorización rojizo pálido a amarillento (color y abundante contenido faunístico son característicos de la unidad). Sobreyacen concordantemente a la Formación Nantoco y está cubierta de la misma manera por la Formación Pabellón. Las calcilutitas forman subsecuencias grano y estrato crecientes de calcilutitas con laminación plana milimétrica en la base, y calcilutitas arenosas macizas con intercalación de wackestones en el techo (Arévalo, 2005).

Formación Pabellón: Secuencia calcárea arenosa, en parte volcánica, de 550 a 2.100 m de espesor. Yace en concordancia sobre la Formación Totoralillo y aparecen expuestas al norte y sur del pueblo homónimo, en el valle del río Copiapó. Está cubierta a través de una discordancia de erosión por los estratos de la Formación Cerrillos. Al suroeste de Pabellón la secuencia aparece desplazada por una serie de cabalgamientos de vergencia al oeste, que producen engrosamiento tectónico.

La secuencia está formada predominantemente por calcilutitas gris claras amarillentas, calcilutitas bioturbadas y calcarenitas. En su parte más basal, presenta capas intercaladas de fangolitas montmorilloníticas negras derivadas de la desvitrificación de materiales cineríticos, comúnmente descritos como “cherts”, uno de los cuales constituye la capa guía indicativa de la base de la Formación. Entre la localidad de Pabellón y la quebrada Cachiyuyo, la Formación incluye en su parte superior un nivel muy continuo y parcialmente discordante con la estratificación, de megabrechas y pliegues sinsedimentarios. Las brechas incluyen bloques decamétricos, internamente deformados, de calcarenitas y andesitas en una matriz calcárea brechosa (Arévalo, 2005).

CRETÁCICO INFERIOR ALTO

Intrusivos Hipabisales dioríticos porfídicos de clinopiroxeno y olivino: Intrusivos de composición intermedia a básica, geometría tabular, se emplazan concordantemente y constituyen filones mantos individuales y enjambres de filones mantos. Intruye de preferencia a las Formaciones Totoralillo y Pabellón (Arévalo, 2005).

CRETÁCICO INFERIOR ALTO – CRETÁCICO SUPERIOR BAJO

Formación Cerrillos: Secuencia sedimentaria, volcánica y continental que yace en discordancia de erosión sobre la Formación Pabellón y sobre un sill de pórfido diorítico de piroxeno y olivino (facies Kihd a) emplazado en estratos de la Formación Pabellón. Está cubierta en discordancia por la Formación Hornitos. Espesor estimado de 6.000 m. Unidad esencialmente clástica, compuesta por una sección inferior de areniscas verde rojizas, de grano medio a muy grueso, con clastos andesíticos flotantes, dispuesta en capas planas con intercalaciones de paraconglomerados en capas gruesas. La sección superior incluye un espesor mínimo de 3.500 m de paraconglomerados y brechas volcánicas gruesas de buena estratificación, alternadas con areniscas gris rojizas de grano medio y con lavas andesíticas y andesítico-basálticas verde rojizas en parte amigdaloidales y brechas andesíticas autoclásticas (Arévalo, 2005).

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Hornitos: Potente secuencia sedimentaria y volcánica, que yace de manera discordante sobre la Formación Cerrillos y subyace con el mismo tipo de relación a tobas paleocenas de las calderas Lomas Bayas y Cerro Blanco. Espesor mínimo de 1.950 m, medidos en el valle del río Copiapó.

La secuencia está formada en la base por brechas y conglomerados verdosos con intercalaciones de paquetes lenticulares de areniscas rojas, fangolitas calcáreas amarillentas y calizas, y por niveles de tobas blanquecinas. Cuerpos irregulares a diapíricos formados por precipitados evaporíticos, principalmente de yeso bandeado,

internamente deformados de manera disarmónica, que se emplazan en distintos niveles de la facies, en ambas laderas del valle del río Copiapó, en las cercanías del poblado de Hornitos. Hacia el techo las rocas clásticas basales están cubiertas por una secuencia lateralmente muy continua de lavas basálticas y traquibasálticas.

Domos y lavas dacíticos se intercalan en todo el espesor de la secuencia, se asocian espacialmente a fallas de crecimiento, las que habrían sido utilizadas por los alimentadores de los cuerpos volcánicos para emplazarse (Arévalo, 2005).

MIOCENO

Gravas de Atacama: Unidad de gravas polimícticas, mal a medianamente consolidadas, con niveles de cenizas intercaladas, que se reconocen como terrazas remanentes que cubren unidades premiocenas, en una amplia extensión en la Precordillera de Atacama. Extensos depósitos se reconocen en las laderas del río Copiapó las que exponen en la base una superficie erosiva labrada en rocas de la Formación Cerrillos.

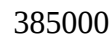
Se habrían formado como producto de la interacción mixta de procesos fluviales, aluviales y coluviales, asociadas a redes hidrográficas antiguas, que rellenaron el paisaje pre Mioceno de Atacama en forma sincrónica con el volcanismo del Mioceno Medio (16-11 Ma) en la Franja de Maricunga (Arévalo, 2005).

CUATERNARIO

Depósitos aluviales: Depósitos de ripio, gravas y arenas, que ocupan laderas de baja pendiente y rellenan quebradas. La formación de este tipo de depósitos se produce por la acumulación de flujos gravitacionales densos (corrientes de barro y/o flujos de detritos), aguas debajo de zonas altas, los que forman conos aluviales bajos, extendidos lateralmente. Los flujos se producirán por episodios pluviales esporádicos, pero de gran intensidad (Arévalo, 2005).

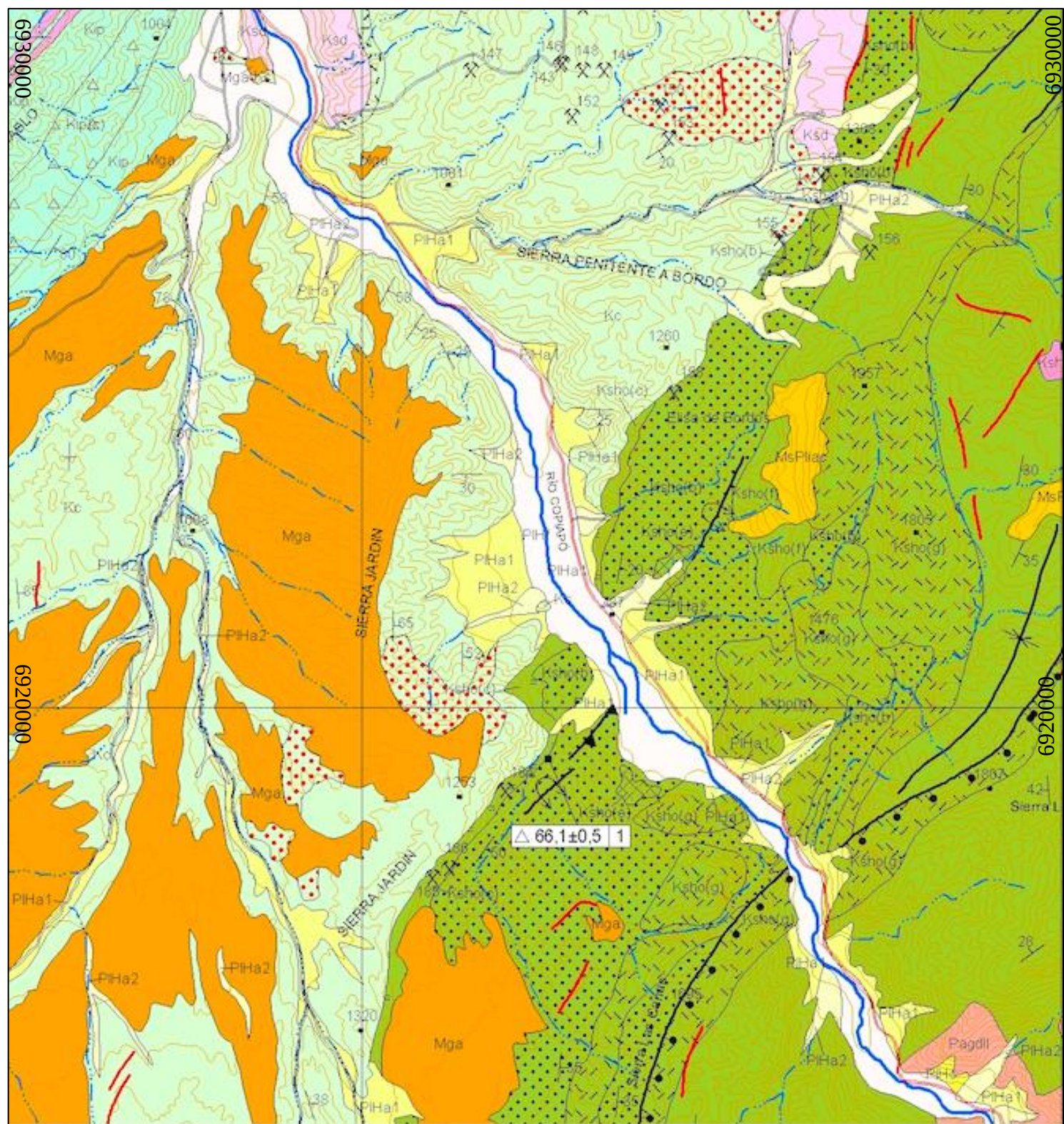
Depósitos coluviales: Gravas y rípios de bloques suelos de mala selección, constituidos principalmente por fragmentos homocomposicionales de formas angulosas. Se encuentran

385000



380000

390000



380000

390000

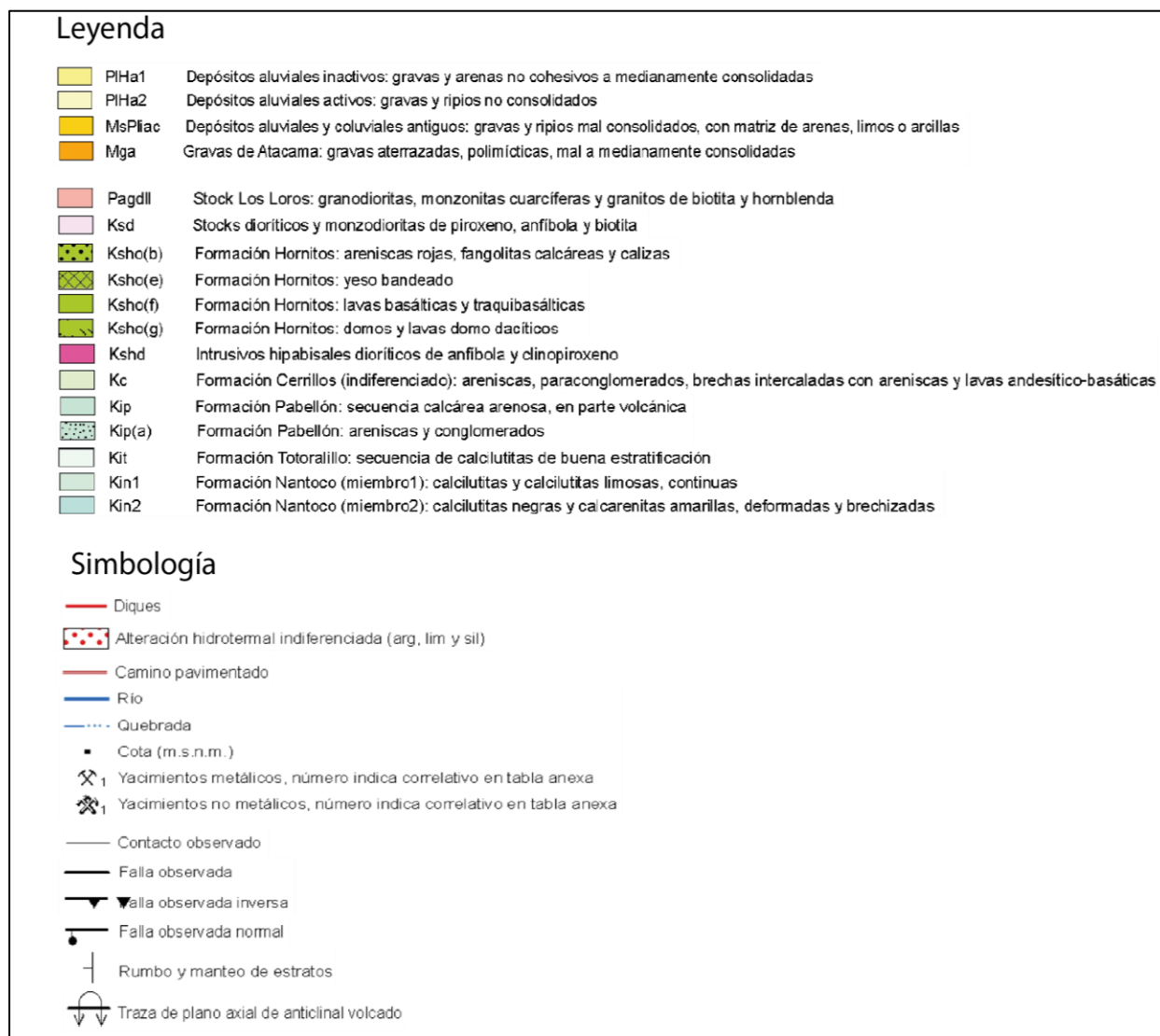


Figura 9. Extracto de Carta Los Loros de la zona de estudio. Arévalos, 2005.

V. ESTADO DEL ARTE

5.1 Hidrogeología

La hidrogeología es una rama de la geología que involucra otras disciplinas tales como geología, geomorfología, hidrología, climatología, hidráulica, hidrogeoquímica y geofísica. Estas se integran para conocer el medio acuífero, el cual constituye un sistema abierto que intercambia materia y energía desde y hacia las fronteras (Figura 10).

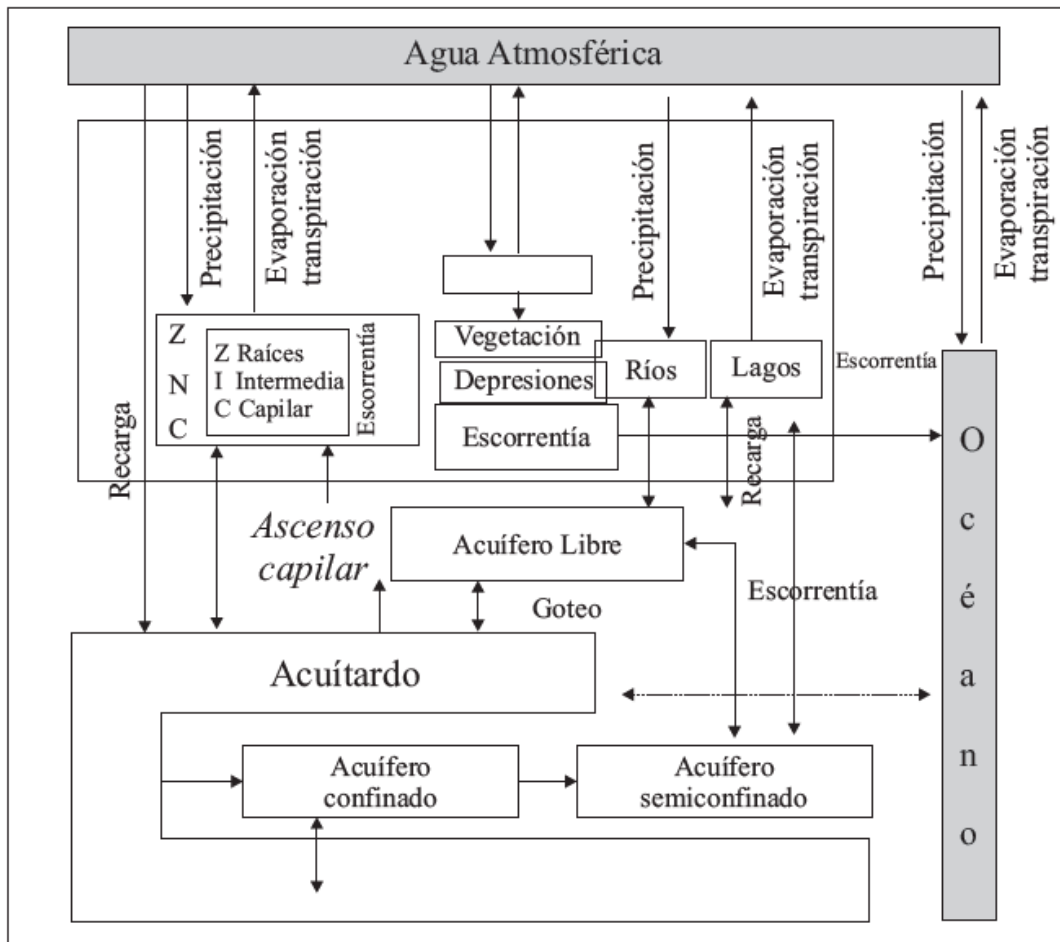


Figura 10. Sistema acuífero y sus interacciones con el entorno. *Betancur et al., 2009.*

5.2 Modelos

Un modelo es una representación aproximada y simplificada de la realidad, de mucha utilidad en las aguas subterráneas dada la escasez de información y complejidad inherente a distintas escalas.

Los modelos pueden ser físicos, análogos, conceptuales o matemáticas (analíticos o numéricos). Los modelos físicos intentan reproducir un sistema real en uno de menor escala, por ejemplo, una columna estratigráfica; los modelos análogos se utilizan para emular sistemas hidrogeológicos; los modelos conceptuales intentan reconocer las características más importantes de un sistema, sin llegar a cuantificarlo y, por último, los modelos analíticos y numéricos responden a una formulación matemática de los fenómenos de interés que permite cuantificarlos (Andreu y Salas, 1988).

La mayoría de los problemas de agua subterránea son abordados con un modelo matemático desarrollado a partir de un modelo conceptual. En cuanto más se aproxime el modelo conceptual a la situación de campo, más probable es que el modelo numérico proporcione información razonable y fiable (Anderson *et al.*, 2015).

Un modelo conceptual es el resultado de la síntesis y análisis de todos los datos relevantes e importantes del sistema de agua subterránea. Su complejidad estará basada en la cantidad de información hidrogeológica que se tenga sobre la zona; evaluará el potencial de la zona a ser explotada, contaminada, etc.

5.3 Oferta y demanda del acuífero

Se han producido serios y crecientes problemas en la satisfacción de las demandas de agua, dejando el recurso en una situación crítica.

Agua en la minería

El agua total es aquella necesaria para mantener el proceso productivo y corresponde al total de entrada de aguas, la cual puede provenir de distintas fuentes, 39% aguas

subterráneas, 38,6% aguas superficiales, 15,2% agua de mar y 6,7 de otras (Concha *et al.*, 2020).

Las empresas que se dedican a la extracción de los diferentes metales y minerales requieren de una cantidad importante de agua para la elaboración de sus procesos, con una demanda actual estimada de 13,61 m³/s. La demanda total del agua para el año 2020 será de 18,5 m³/s y se espera que para el año 2025 sea de 25,35 m³/s (Concha *et al.*, 2020).

Agua en la agricultura

La agricultura está considerada como el mayor consumidor de agua a nivel mundial, usando alrededor del 70% del agua que se extrae de diversas fuentes (Fernández *et al.*, 2020).

Una forma de mitigar el impacto que esta produce sería el uso de biosólidos implementando la economía circular del país, pudiendo aportar una gran cantidad de beneficios económicos y medioambientales, sin embargo, se debe analizar el monitoreo riguroso y persistente de los biosólidos y del suelo receptor ante su introducción al ecosistema (Fernández *et al.*, 2020).

5.4 Recarga artificial de acuíferos

- Piscinas de infiltración

En el sector de Nantoco la Junta de Vigilancia del Río Copiapó, en conjunto con el Municipio de Tierra Amarilla, Minera Candelaria y Agrícola Alianza, llevaron a cabo, durante el año 2018, la construcción de 2 piscinas de infiltración mediante “diques”, situados a lo largo del río Copiapó (DGA, 2020). El costo del proyecto fue de casi 9 millones de pesos y tuvo como objetivo principal reducir la cantidad de agua dulce que llega al mar por falta de infraestructura. Estas piscinas acumulan parte de los 10 hm³ que se infiltran en el tranque Lautaro (DGA, 2020).

- Plantas desalinizadoras

El agua potable en el norte de nuestro país tiene un costo similar y, en algunos casos, mayor que el agua de mar desalada, por lo que es posible sugerir que el agua de más desalada es una solución atractiva para el consumo humano.

El costo de un metro cúbico de agua desalada para el consumo humano fluctúa entre US\$ 0,6 y US\$ 1,0, sin considerar el costo del transporte. En comparación el costo del agua potable en el norte es de US\$ 1,31 (dólar con tipo de cambio a \$740) (Concha *et al.*, 2020). Actualmente existen 2 plantas desalinizadoras, una perteneciente a la Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC) y otra de la Compañía Minera del Pacífico (CAP), ambas implementadas para las necesidades hídricas de las labores de cada compañía (DGA, 2020)

Sumado a estas plantas, se encuentra en construcción la Planta Econssa, la cual se ejecutará en 3 etapas, teniendo finalmente una capacidad máxima de 1.200 l/s de agua tratada. El proyecto fue concebido con un costo total de US\$ 250.000.000. El agua tratada será impulsada a los distintos puntos de abastecimiento de agua potable de las comunas de Chañaral, Caldera, Copiapó y Tierra Amarilla.

VI. RESULTADOS

La información utilizada fue facilitada por la Comunidad de Aguas Subterráneas 123 (CAS 123), la cual corresponde a mediciones en terreno de los niveles estáticos de cada pozo activo, desde enero del año 2017 hasta inicio del 2022.

El lugar de estudio fue subdividido en 6 sectores (Figura 11), de acuerdo a un rango de semejanza de ± 5 m, en los valores de niveles estáticos.

Los sectores se describen a continuación:

- Sector 1: Mal Paso – Nantoco
- Sector 2: COEMIN – Alianza
- Sector 3: Totoralillo – Agrícola Millahue
- Sector 4: Pabellón – Villa María
- Sector 5: El Yeso – Hacienda Hornitos
- Sector 6: Quebrada Buenos Aires – La Puerta

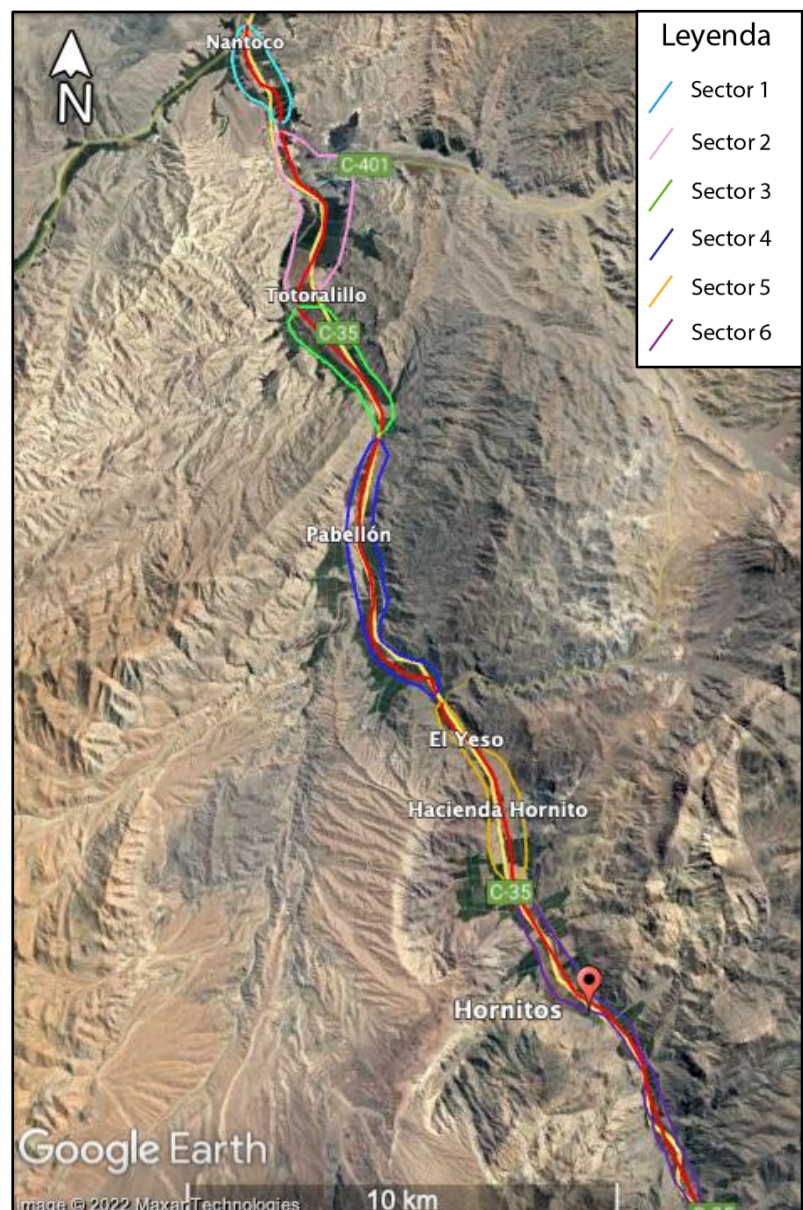


Figura 11. Ubicación de los 6 sectores en la zona de estudio. *Elaboración propia.*

6.1 Niveles estáticos

Se analizaron los niveles estáticos de 63 pozos activos de extracción de agua (de uso agrícola y minero). Estos pozos fueron agrupados de acuerdo a la semejanza de sus niveles estáticos ($\pm 2\text{m}$) en Pozos Representativos (P.R).

A su vez estos P.R fueron subdivididos en 6 sectores, con el mismo criterio de semejanza en los niveles estáticos ($\pm 8\text{ m}$, aproximadamente) y con el fin de poder analizar mejor cada subsector.

En la siguiente tabla se muestra la descripción de los pozos con sus respectivos P.R y sectores (Tabla 2).

P.R (Pozo Representativo)		Nombre pozos que representa	P.R (Pozo Representativo)		Nombre pozos que representa	P.R (Pozo Representativo)		Nombre pozos que representa
SECTOR 1	P.R 1	Pozo 11 y 2 (parcela 17)	SECTOR 3	P.R 11	Pozo 1B nuevo	SECTOR 5	P.R 24	Pozo 2 hornitos
	P.R 2	Pozo 10 Santa Laura, Pozo 12 y 9 (parcela 17)		P.R 12	Pozo 2 y 3B (Colina)		P.R 25	Pozo 1 y 3 (hornitos)
	P.R 3	Pozo 1 (parcela 17)		P.R 13	Pozo 5 valle escondido, Pozo 4 y 1B (Colina)		P.R 26	Pozo El Yeso
	P.R 4	Pozo 7, 6, 5 y 3 (parcela 15)		P.R 14	Pozo 1 Colina		P.R 27	Pozo 1 hornitos
	P.R 5	Pozo cerrillos		P.R 15	Pozo 3 Quebrada blanca		P.R 28	Pozo 3 hornitos, Pozo 1 El Sol
SECTOR 2	P.R 6	Pozo 3 (tranque), Pozo carretera	SECTOR 4	P.R 16	Pozo Catania	SECTOR 5	P.R 26	Pozo El Yeso
	P.R 7	Pozo 7 y 8 (COEMIN), Pozo 2 packing		P.R 17	Pozo AK, Pozo corte 24		P.R 27	Pozo 1 hornitos
	P.R 8	Pozo 9 y 10 (COEMIN)		P.R 18	Pozo 1 pabellón		P.R 28	Pozo 3 hornitos, Pozo 1 El Sol
	P.R 9	Pozo agrouva, Pozo 5 y 4 (agrofruta)		P.R 19	Pozo 2 pabellón	SECTOR 6	P.R 29	Pozo 12 A, Pozo 10, Pozo 6

	P.R 10	Pozo 1, 2 (agrofruta), Pozo 1 y 2 (Tropicana)		P.R 20	Pozo 1B nuevo pabellón		P.R 30	Pozo Cantera 1
				P.R 21	Pozo 4B		P.R 31	Pozo Cantera 2
				P.R 22	Pozo 2 y 1 (Villa María)		P.R 32	Pozo Buenos Aires
				P.R 23	Pozo 3 Villa María, Pozo sauce		P.R 33	Pozo 2
							P.R 34	Pozo 3
							P.R 35	Pozo parrón viejo, Pozo 3 soles

Tabla 2. Descripción de los diferentes sectores y sus pozos. *Elaboración propia.*

6.2 Hidrogeología

El acuífero del valle del río Copiapó es la unidad hidrogeológica de mayor importancia, por su productividad y extensión. Está conformado principalmente por depósitos fluviales de edad pleistocena a holocena, en este se concentran casi todas las extracciones de agua de la cuenca.

6.2.1 Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas del valle del río Copiapó son agrupadas según sus propiedades específicas que les permite experimentar recarga, almacenar y transmitir agua subterránea en depósitos no consolidados y basamento rocoso. En el estudio se distinguen 2 unidades hidrogeológicas, las que se describen a continuación:

Acuífero de gran importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados:

Depósitos fluviales: Se encuentra presente a lo largo de toda la zona de estudio en el valle del río Copiapó, intercaladas en zonas distales por depósitos fluvio-luviales. Conformado principalmente por potentes secuencias de ripios, gravas, gravas arenosas y arenas; en ciertas zonas se incorporan niveles de bolones y bloques rocosos, producto de episodios de escurrimiento torrencial o de gran energía. En profundidad los depósitos experimentan un deterioro en sus propiedades hidráulicas, concordante al aumento de niveles de limos

y arcillas. Concentran el mayor potencial hidrogeológico ya que en estas condiciones permite recarga, transmisividad y almacenar importantes volúmenes de agua. Los procesos de recarga se deben principalmente a deshielos cordilleranos y precipitaciones pluviales. La profundidad de los pozos perforados en el sector aumenta en dirección aguas abajo. Los acuíferos corresponden al tipo libre, donde la superficie freática señala el límite superior de la zona de saturación.

Acuíferos de importancia hidrogeológica media a baja en depósitos no consolidados:

Depósitos fluvioaluviales: Se encuentran principalmente en zonas de quebradas tributarias mayores. Estas zonas al confluir con el relleno sedimentario fluvial finalizan en grandes conos aluviales, los que se interdigita y/o coinciden con las trayectorias del flujo subterráneo. Niveles alternantes de ripios, gravas y gravas arenosas, con frecuentes lentes de arena y materiales dendríticos, permeabilidad media a baja (se vincula a niveles o bancos con mayores contenidos de arcillas). Desde el punto de visto hidrogeológico su complejo carácter litológico limita la capacidad de recargar, almacenar y transmitir agua subterránea. Genéticamente vinculados a dinámica hídrica de gran energía (ciclos pluviales de gran intensidad). Potencial hidrogeológico medio a bajo (Aguirre *et al.*, 1999).

Depósitos de conos aluviales: Vinculado a flujos torrenciales relleno cauces de quebradas menores. Variados niveles alternantes de gravas y gravillas arenosas, con muy escasos finos intersticiales: arcillas y en las zonas de cabeceras incorporan abundantes bloques. Porosidad media y permeabilidad media a baja. Gran capacidad de infiltración y transmisión de precipitaciones pluviales y nula capacidad de retención o almacenamiento. Mediano a bajo potencial hidrogeológico. Estos depósitos son ambientes muy favorables para la recarga subterránea local. Estas zonas de interdigita con los acuíferos del relleno fluvial (Aguirre *et al.*, 1999).

Acuíferos de importancia hidrogeológica baja a nula en rocas:

Basamento rocoso ígneo: Está conformado por rocas que constituyen los flancos y el basamento rocoso del valle del río Copiapó. Estos materiales impermeables poseen baja a nula capacidad para almacenar y/o transmitir agua subterránea, por lo que determina su escasa importancia hidrogeológica. En sectores focalizados de rocas recorridas por zonas de fallas y/o fracturas dominantes, sin relleno, persistentes en profundidad, demuestran una clara dependencia o control a la presencia de acuíferos de limitada extensión. Ejemplo

de estos casos se aprecia en las minas Amolanas, Carola, Santos y Cerro Imán (Aguirre *et al.*, 1999).

6.2.2 Propiedades hidráulicas: Transmisibilidad (T), Permeabilidad (K) y Coeficiente de Almacenamiento (Sy)

En marco de esta tesis, no se realizaron trabajos para determinar constantes hidráulicas de los acuíferos presentes en el valle del río Copiapó, no obstante, se presenta información resumida de los trabajos de la DGA, entre otros autores y referencias hidrogeológicas.

Coeficiente de transmisibilidad (T):

DGA, (1987b), la Figura 12 ilustra los valores de transmisibilidad establecidos en este trabajo.

Sector	Transmisibilidad [$\text{m}^2/\text{día}/\text{m}$]
Embalse Lautaro-Valle Hermoso	< 15.000-20.000
San Antonio-La Puerta	1.000-5.000
Elisa de Bordos	< 20.000
Elisa de Bordos-Jotabeche	1.000-5.000
Jotabeche-Nantoco	< 15.000-20.000
Tierra Amarilla-Paipote	1.000-5.000
San Fernando	< 15.000-20.000
Copiapó	1.000-10.000
Bodega	10.000-15.000
La Chimba-Piedra Colgada	1.000-5.000

Figura 12. Valores de transmisibilidades de los diferentes sectores. DGA, 1987b.

DGA, (1995), transmisibilidades medias a altas, fluctuando entre $1.000 \text{ m}^2/\text{día}$ en el segmento comprendido entre el Embalse Lautaro y La Puerta, aumentando a $6.500 \text{ m}^2/\text{día}$ en el segmento de La Puerta – Mal Paso.

DGA, (2013), indica transmisibilidades medias-altas con valores de 1.000 a $20.000 \text{ m}^2/\text{día}/\text{m}$.

Puig, (2017), la Figura 13 ilustra los valores de transmisibilidad establecidos en este trabajo, los cuales fueron obtenidos por la fórmula de Razack & Huntley (1991):

$$T=15,3 \cdot (q^{0,67})$$

Donde,

T: transmisibilidad del acuífero (m^2d)

q: caudal específico del acuífero (m^2d)

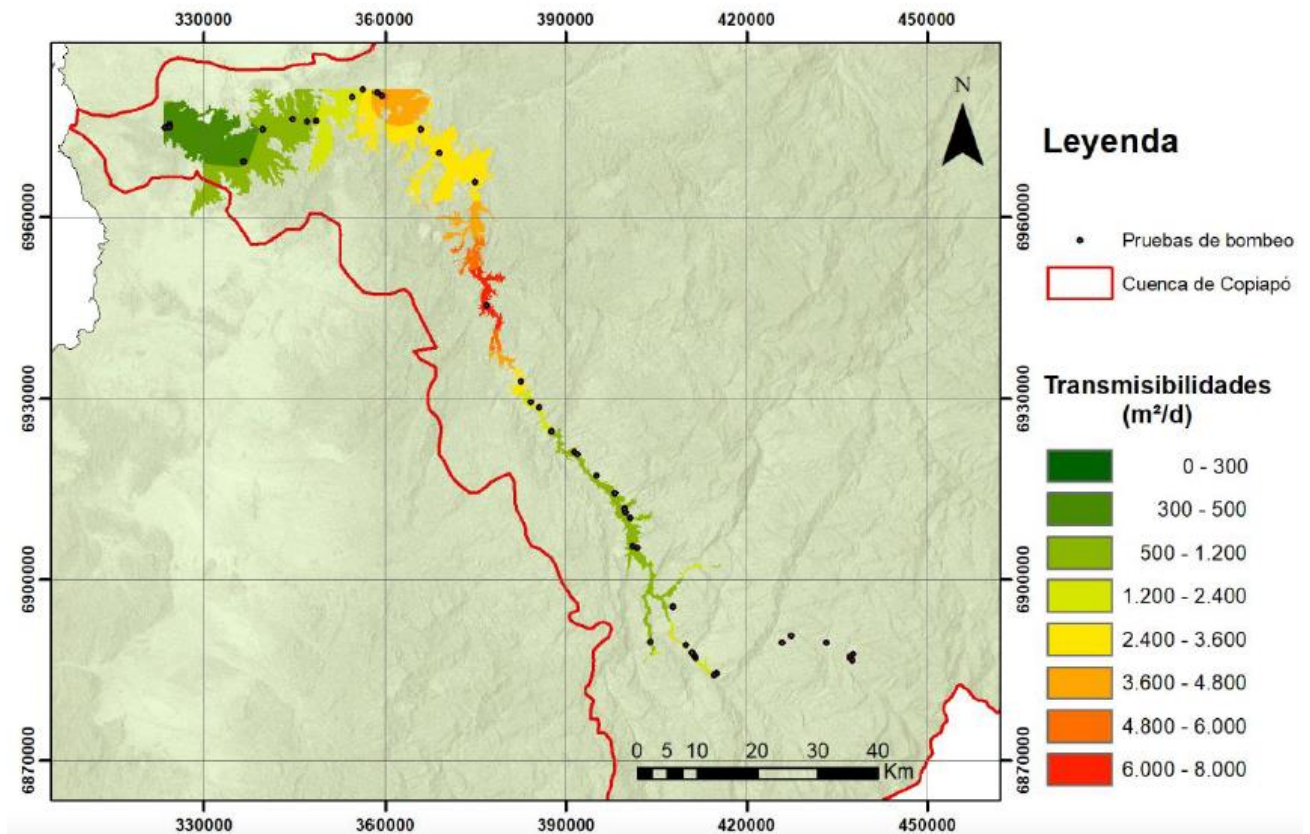


Figura 13. Mapa con valores de transmisibilidad en el acuífero del valle de Copiapó. Puig, 2017.

Permeabilidad (K):

Aguirre *et al.*, (1999), indican que influye mucho las variaciones granulométricas, composición y disposición del depósito. Concluyen que los valores de permeabilidad para los acuíferos de los depósitos fluviales y fluvioaluviales del río Copiapó presentan permeabilidades medias entre 10^{-7} y 10^{-3} m/s.

DGA y DICTUC, (2010), la Figura 14 ilustra los valores de permeabilidad establecidos en este trabajo. El área de estudio de la tesis corresponde al sector 3a-3b.

Límite Sector Acuífero	K (m/d)
1a – 1d	18,90
1b – 1c	14,50
1c – 1d	62,33
1d – 2a	20,96
2a – 3a	29,77
3a – 3b	75,93
3b – 4a	84,14
4a – 5a	184,45
5a – 6a	4,82
6a – 6b	18,94

Figura 14. Valores de permeabilidad en los límites entre los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. DGA y DICTUC (2010).

DGA, (2013), cálculos hidrogeológicos indican permeabilidades relativamente buenas de $3 - 6 \times 10^{-4}$ m/s, a través de registros puntuales se ha podido observar que la permeabilidad superficial de los depósitos fluctúa entre 10^{-5} y 10^{-7} m/s, con tasas de infiltración de 10^{-2} a 10^{-3} m/s.

Coefficiente de almacenamiento (Sy):

DGA, (1987b), señala valores en el rango de 0,16% y 11%.

DGA, (1995), indica valores medios de 5%, 10% y 15%.

DGA y DICTUC, (2010), en cuanto al coeficiente de almacenamiento, según los antecedentes se espera que el valor de Sy en el acuífero se encuentre entre 0,1 y 0,2. Por lo tanto, se adoptó una cifra de 0,10.

6.3 Estratigrafía

A través de la información obtenida de las pruebas de bombeo, se obtuvo la estratigrafía de cada uno de los pozos, complementada con la información de DGA & DICTUC S.A (2010).

Esta información se utilizó para realizar los perfiles estratigráficos de los 6 sectores.

Cabe destacar que la información de los sondajes mecánicos ha sido realizada por una variedad de empresas y/o instituciones tanto públicas como privadas. Esto genera algunas limitaciones como por ejemplo las descripciones realizadas con diferentes criterios dependiendo de la experiencia adquirida por cada profesional. Por lo que la caracterización y correlación de las variaciones granulométricas del relleno sedimentario superficial dificultan la adecuada caracterización de los acuíferos.

Existe un pozo en donde su último nivel está descrito como granito y en esa zona a nivel local no existen afloramientos graníticos. Además, se debe considerar como posibilidad que algunos sondajes hayan coincidido realmente con la presencia de cerros islas o altos de basamento.

6.3.1 Basamento rocoso en el área

Se caracteriza por una morfología de basamento impermeable fuertemente contrastante, con una silueta de basamento que evidenciaría zonas de falla y/o fracturas. La zona entre Elisa de Bordos – Paipote se caracteriza por la presencia de una morfología de basamento mucho más homogénea y regular en cuanto a las variaciones de profundidad (Aguirre *et al.*, 1999).

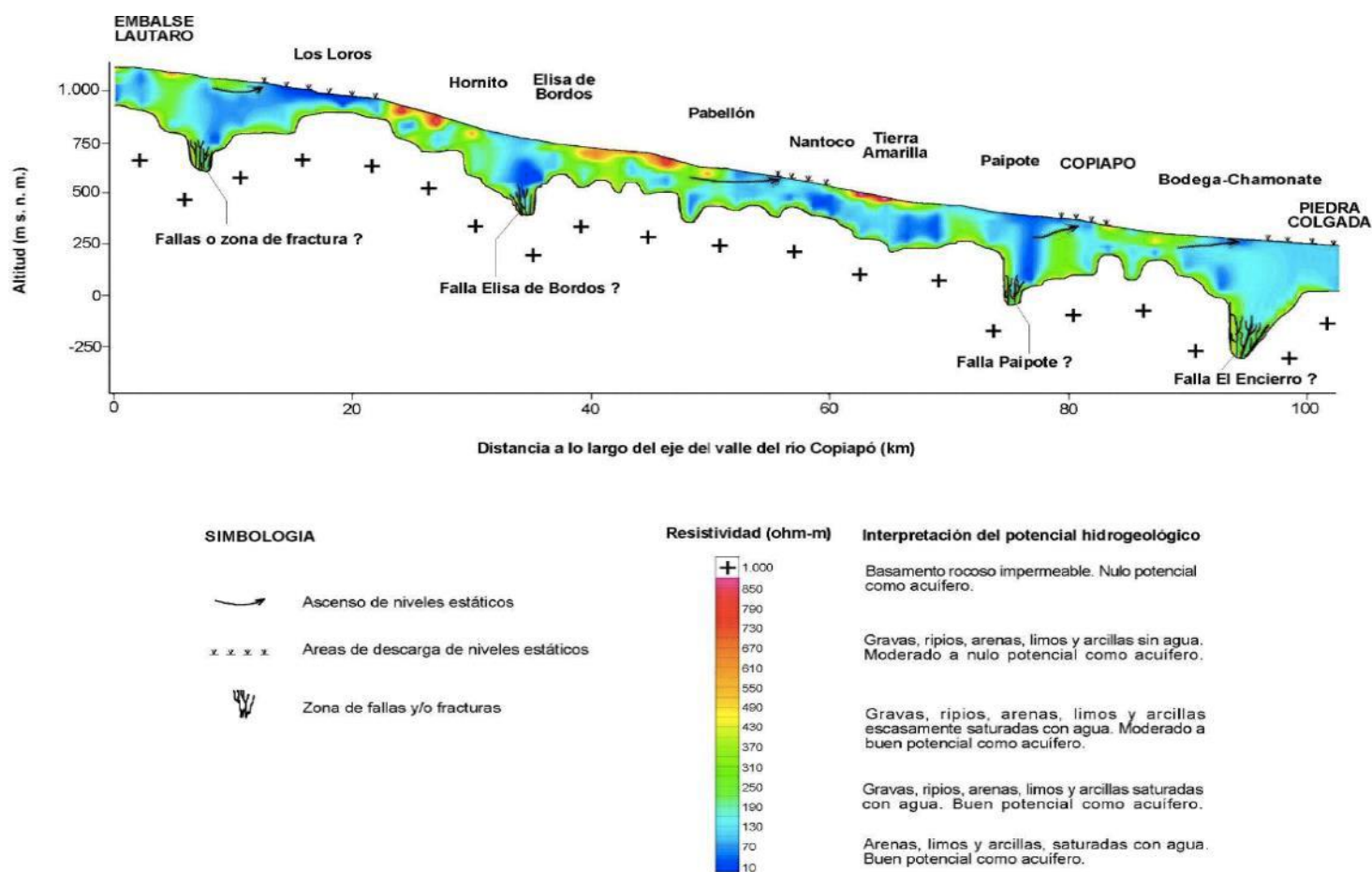


Figura 15. Perfil geoelectrico generalizado del basamento rocoso del valle del río Copiapó, entre el Embalse Lautaro y Piedra Colgada. *Aguirre et al., 1999.*

Tramo Embalse Lautaro – Elisa de Bordos

En el sector La Puerta el valle desarrolla estrechamientos en su sección transversal.

El segmento La Puerta – Elisa de Bordos, tanto geológica como estructuralmente es muy complicado, se observa una serie de contactos litológicos junto a numerosos pliegues y fallas, las que se concentran en torno al sector de Hornitos, donde se ubica la traza de la falla Elisa de Bordos; este tramo presenta curvas extremadamente anómalas. Por otro lado, el método de modelación supone un esquema de capas planas que en zonas de falla y/o fracturas subverticales no se cumplen, ello se traduce en interpretaciones erróneas que determinan una profundidad de basamento extremadamente grandes (Aguirre *et al.*, 1999).

De acuerdo a informaciones de sondeos mecánicos presentes en el sector indican que uno de ellos llega a una profundidad de 120 m (C47, año 1997) en donde no identifican que se encuentren con basamento rocoso y a una distancia de 450 m aguas arriba se encuentra otro pozo (C48, año 1995) con 115 m de profundidad en donde identifican presencia de basamento rocoso a los 110 m.

Tramo Elisa de Bordos – Paipote

La morfología del basamento en este tramo es impermeable y muy homogénea, subhorizontal, con una profundidad entre 108 y 265 m, este sector coincide con una zona de gran demanda de aguas subterráneas.

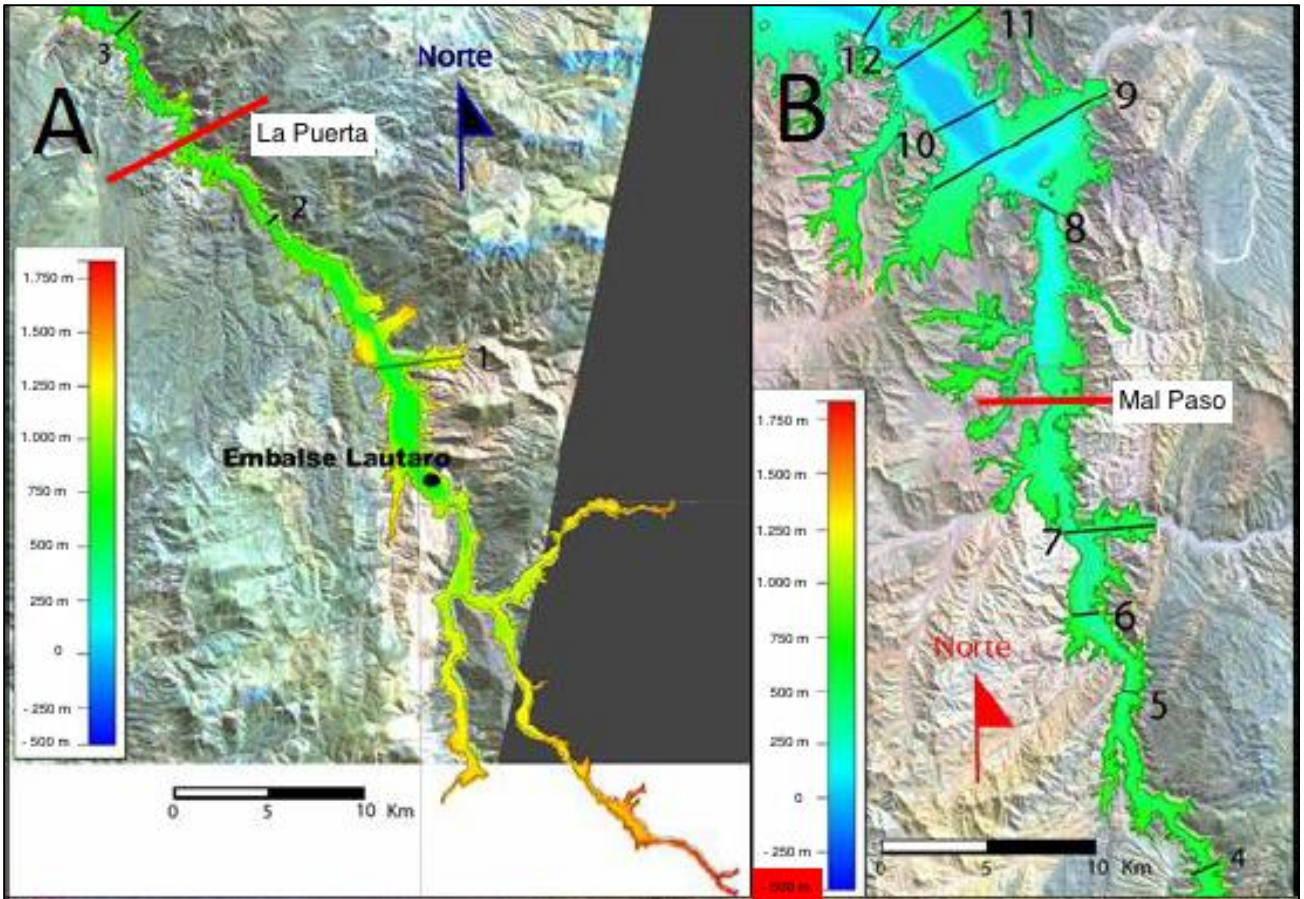


Figura 16. Mapa con cota del basamento rocoso en escala de colores (m s.n.m.) sobre una imagen Landsat (combinación RGB= 7 4 1). A) Parte alta del valle de Copiapó, B) sector ubicado entre Hornitos y la ciudad de Copiapó. *DGA & DICTUC S.A., 2010b.*

Las líneas rojas dentro de la Figura 16 indica el sector de estudio, correspondiente a La Puerta – Mal Paso. La cota del basamento desde La Puerta (zona más alta) hasta el sector de Pabellón fluctúa entre los valores de 750– 500 m de profundidad, donde luego hasta el sector Mal Paso la profundidad se encuentra entre los 500 – 300 m.

6.4 Perfiles estratigráficos

Se realizaron perfiles longitudinales en los 6 sectores, con la información estratigráfica de 59 pozos y el promedio anual de los niveles estáticos de 35 Pozos Representativos (P.R) entre los años 2017 e inicios del año 2022.

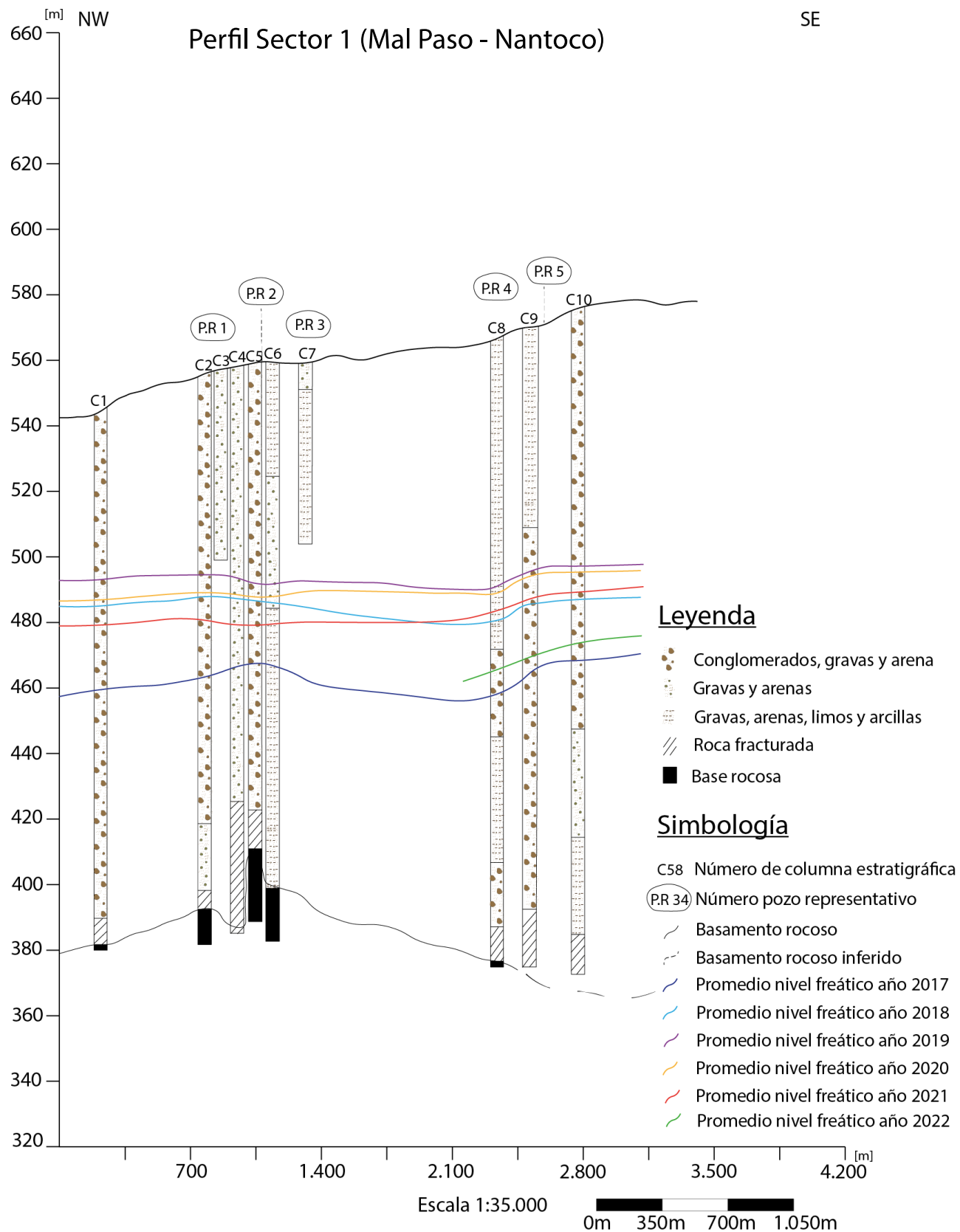


Figura 17. Perfil Sector 1 (Mal Paso – Nantoco). *Elaboración propia.*

Teniendo en cuenta una cota de superficie entre los rangos de 540 – 580 m, el nivel estático más profundo corresponde al año 2017 con valores entre 460 – 470 m.

Luego existe un aumento de los niveles en los años 2018 y 2019 debido que el año 2017 existió una recarga del acuífero por infiltraciones a través del río producto del evento del año 2017 y los consiguientes deshielos. Las tasas de ascenso en los niveles estáticos hasta el 2019 fueron de 15 a 17 m/año.

Desde el año 2019 (el año más seco) se ve una disminución en los niveles debido a las escasas y nulas precipitaciones hasta principios del año 2022. Las tasas de descenso de los niveles freáticos indican valores de 3 a 11 m/año.

De acuerdo al perfil geoeléctrico (Figura 9), la resistividad de las pseudocapas analizadas en este sector clasifica esta zona como un acuífero con buen potencial hidrogeológico.

Tipo de acuífero libre. El espesor máximo de las secuencias según los sondeos mecánicos, es de hasta 203 metros bajo la superficie (C10).

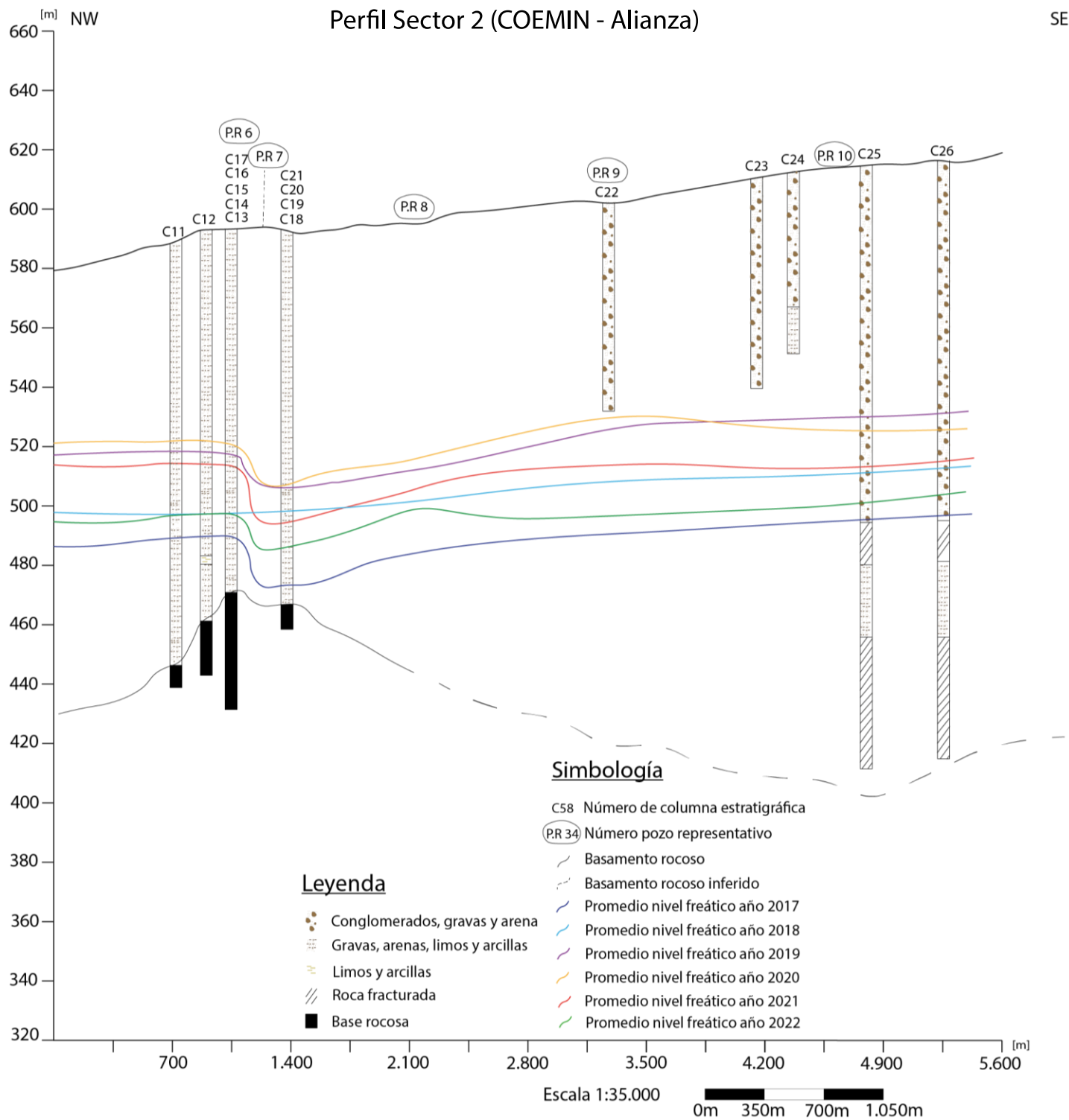


Figura 18. Perfil Sector 2 (COEMIN - Alianza). *Elaboración propia.*

Cota de superficie entre los rangos de 580 – 620 m, el nivel estático más profundo corresponde al del año 2017 con valores entre 486 – 498 m aproximadamente.

En el perfil del sector 2 se mantiene la misma tendencia de los ascensos y descensos de los niveles estáticos.

Las tasas de ascenso de los niveles estáticos hasta el año 2019 fueron de 12 a 15 m/año y las tasas de descenso hasta comienzos del año 2022 fueron de 10 a 13 m/año.

Tipo de acuífero libre. El espesor máximo de las secuencias según los sondeos mecánicos, es de hasta 204 m (C25).

De acuerdo al perfil geoelectrico (Figura 9), la resistividad de las pseudocapas analizadas en este sector clasifica esta zona como un acuífero con buen potencial hidrogeológico.

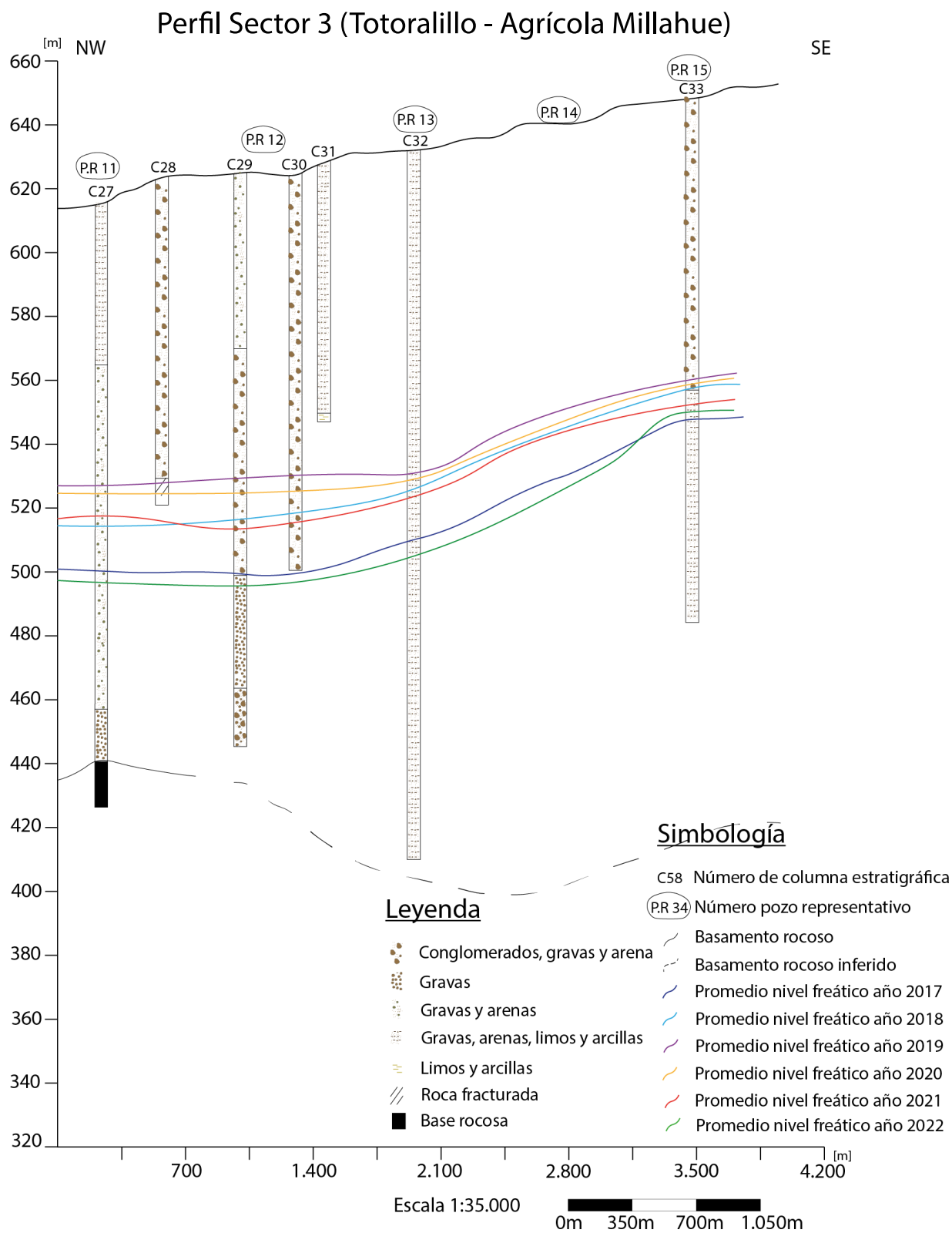


Figura 19. Perfil Sector 3 (Totoralillo – Agrícola Millahue). *Elaboración propia.*

Cota de superficie entre los rangos de 617 – 650 m, el nivel estático más profundo corresponde a los valores del inicio del año 2022 con valores entre 498 – 547 m aproximadamente.

En el perfil del sector 3 se mantiene la misma tendencia de los ascensos y descensos de los niveles estáticos.

Las tasas de ascenso de los niveles estáticos hasta el año 2019 fueron de 14 a 16 m/año y las tasas de descenso hasta comienzos del año 2022 fueron de 6 a 14 m/año.

Tipo de acuífero libre. El espesor máximo de las secuencias según los sondeos mecánicos, es de hasta 222 m (C32).

De acuerdo al perfil geoeléctrico (Figura 9), la resistividad de las pseudocapas analizadas en este sector clasifica esta zona como un acuífero con buen potencial hidrogeológico.

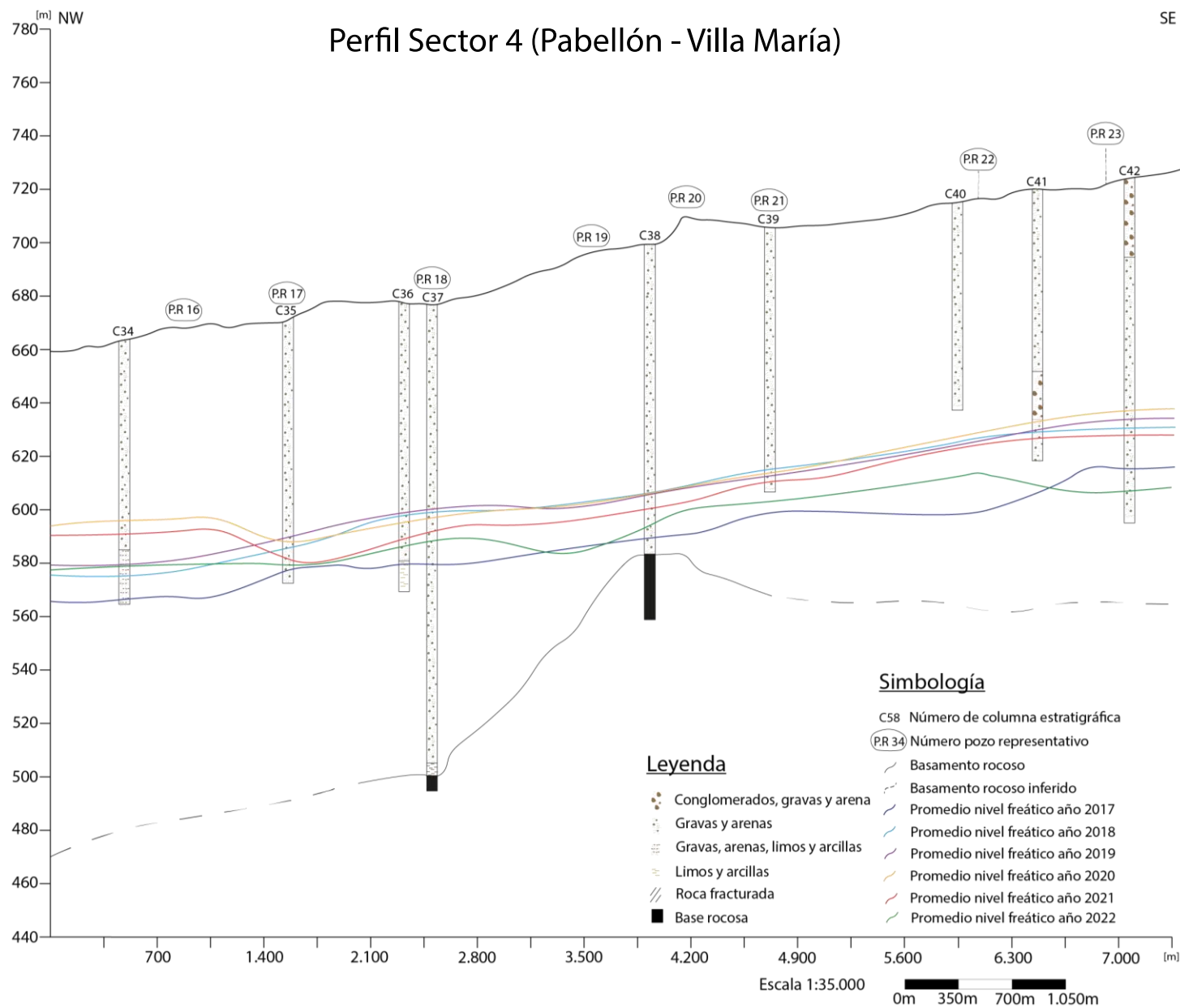


Figura 20. Perfil Sector 4 (Pabellón – Villa María). *Elaboración propia.*

Cota de superficie entre los rangos de 660 – 722 m, el nivel estático más profundo corresponde al año 2017 con valores entre 563 – 619 m aproximadamente.

En el perfil del sector 4 se mantiene la misma tendencia de los ascensos y descensos de los niveles estáticos.

Las tasas de ascenso de los niveles estáticos hasta el año 2019 fueron de 6 a 12 m/año y las tasas de descenso hasta comienzos del año 2022 fueron de 5 a 10 m/año.

Tipo de acuífero libre. El espesor máximo de las secuencias según los sondeos mecánicos, es de hasta 184 m (C37).

De acuerdo al perfil geoelectrico (Figura 9), la resistividad de las pseudocapas analizadas en este sector clasifica esta zona en la parte superficial (63 m aproximadamente) como un acuífero moderado a nulo potencial como acuífero, bajo esta zona se clasifica como un buen potencial hidrogeológico.

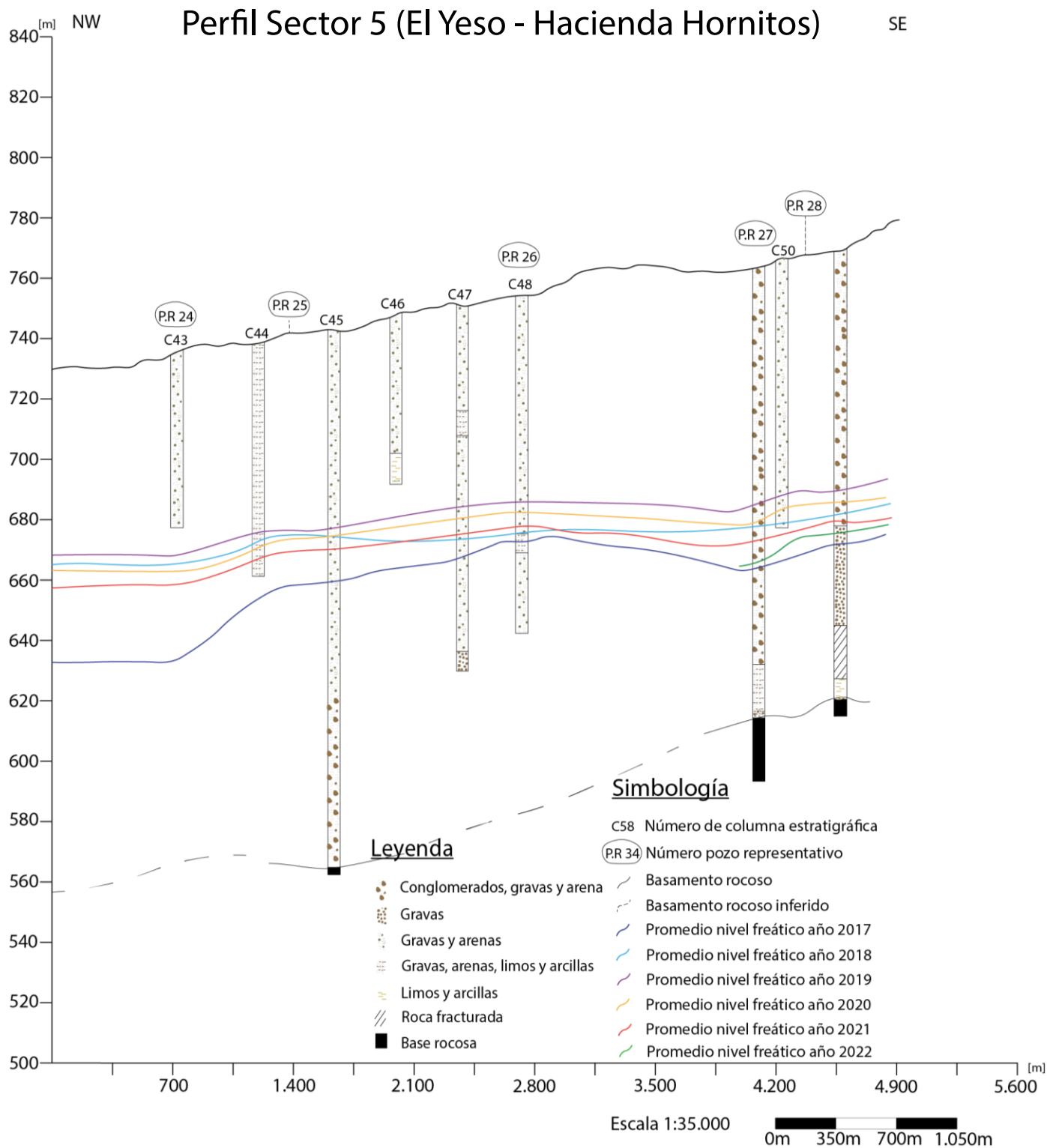


Figura 21. Perfil Sector 5 (El Yeso – Hacienda Hornitos). *Elaboración propia.*

Cota de superficie entre los rangos de 730 – 770 m, el nivel estático más profundo corresponde al año 2017 con valores entre 636 – 660 m aproximadamente.

En el perfil del sector 5 se mantiene la misma tendencia de los ascensos y descensos de los niveles estáticos.

Las tasas de ascenso de los niveles estáticos hasta el año 2019 fueron de 9 a 13 m/año y las tasas de descenso hasta comienzos del año 2022 fueron de 3 a 9 m/año.

Tipo de acuífero libre. El espesor máximo de las secuencias según los sondeos mecánicos, es de hasta 180 m (C45).

De acuerdo al perfil geoeléctrico (Figura 9), la resistividad de las pseudocapas analizadas en este sector clasifica esta zona como un acuífero con buen potencial hidrogeológico a excepción de un pequeño sector de las primeras columnas que tienen un potencial hidrogeológico moderado a bueno.

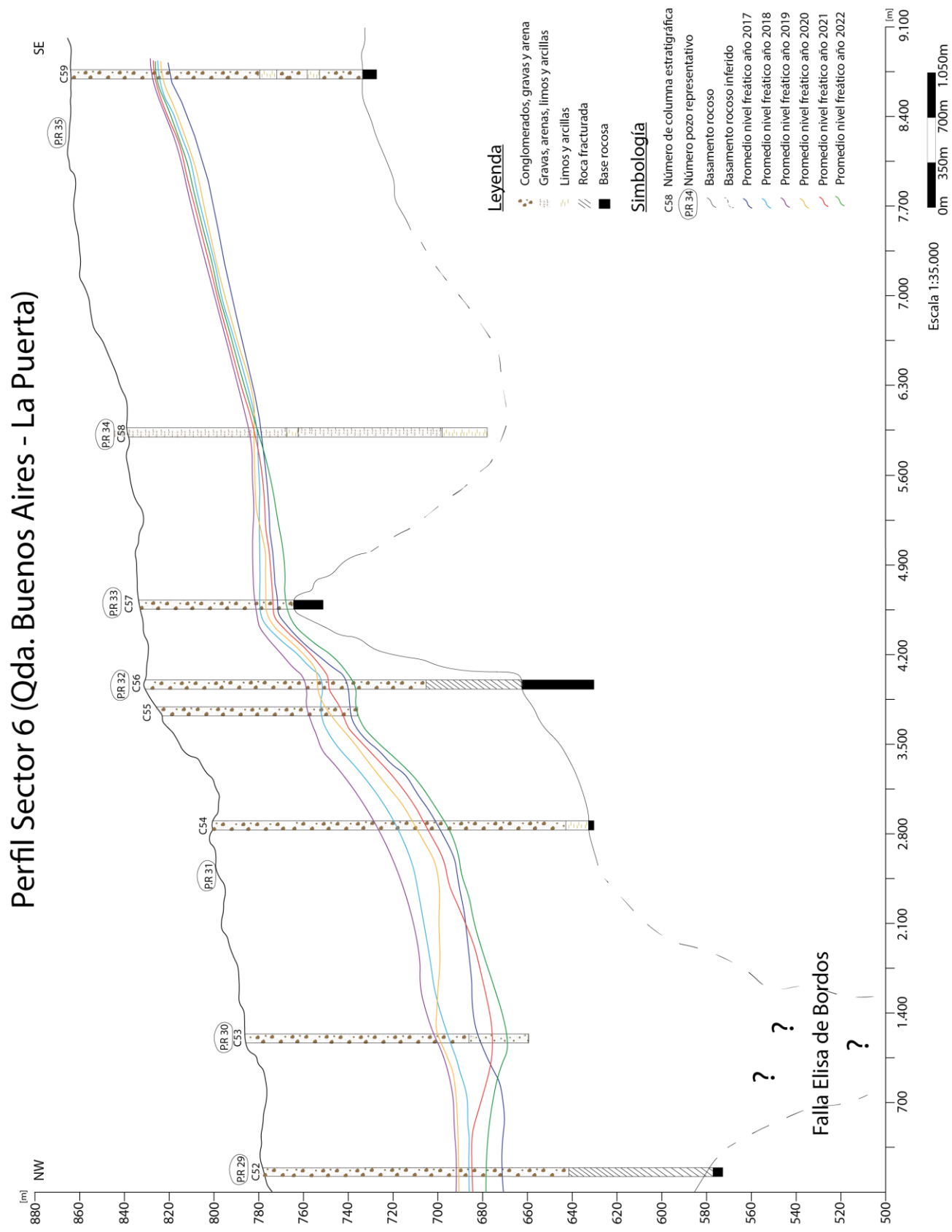


Figura 22. Perfil Sector 6 (Qda. Buenos Aires – La Puerta). *Elaboración propia.*

Cota de superficie entre los rangos de 777 – 863 m, el nivel estático más profundo corresponde al año 2017 con valores entre 650 – 822 m aproximadamente.

En el perfil del sector 6 se mantiene la misma tendencia de los ascensos y descensos de los niveles estáticos. Las tasas de ascenso de los niveles estáticos hasta el año 2019 fueron de 7 a 10 m/año y las tasas de descenso hasta comienzos del año 2022 fueron de 3 a 6 m/año.

Tipo de acuífero libre. El espesor máximo de las secuencias según los sondeos mecánicos, es de hasta 200 m (C52).

De acuerdo al perfil geoeléctrico (Figura 9), la resistividad de las pseudocapas analizadas en este sector clasifica esta zona como un acuífero con buen potencial hidrogeológico.

Bajo el Pozo Representativo (P.R 30) se encuentra la Falla de Elisa de Bordos, la cual es interpretada en el trabajo de Aguirre *et al.*, 1999 a través de un estudio geoeléctrico (Figura 15). Se deja expresada con línea punteada en el Perfil 6.

El perfil general de los 6 sectores (Figura fuera de texto), sirve para establecer el modelo hidrogeológico conceptual entre el sector La Puerta – Mal Paso, el cual indica su geometría, límites del acuífero y estratigrafía. El resultado de este modelo conceptual fue el resultado de la síntesis y análisis de todos los datos relevantes e importante del sistema de agua subterránea de la zona de estudio.

Con la información proporcionada en el modelo conceptual se puede inferir la tendencia general del flujo subterráneo, el cual va de SE a NW, aguas abajo desde el Sector La Puerta hacia el Sector de Mal Paso.

La tendencia del ascenso de los niveles estáticos de los años 2018 y 2019 se debe a que el evento aluvional del año 2017 produjo una recarga importante en el acuífero elevando los niveles entre 6 a 15 m/año. Luego de este peak de recarga existe una tendencia a la

disminución de los niveles estáticos hasta comienzos del año 2022, teniendo este último prácticamente el mismo nivel del año 2017.

VII. CONCLUSIONES

Las escasas precipitaciones anuales y su dispersión en el tiempo histórico se centran principalmente en los meses de invierno y eventos relacionados al fenómeno de “El Niño” en meses de verano, estas constituyen una de las principales fuentes de recarga del acuífero, junto a las precipitaciones nivales las cuales con el tiempo vuelve al acuífero a través de los deshielos cordilleranos.

El año 2017 contó con una precipitación de hasta 143 mm, generando una recarga importante en el acuífero. Los años siguientes fueron más secos, en donde el año 2019 existe una precipitación prácticamente nula. A diferencia de los años anteriores el año 2021 y comienzo del año 2022 tuvieron niveles de precipitación con máximos de 11 mm.

Con respecto a los valores de temperaturas máximas mensuales durante los años 2017, 2018, 2020 y 2021 en los meses de verano existe un promedio máximo de 33°C y en el año 2019 el mes de noviembre registro un máximo de 45°C.

Conforme los niveles de escurrimiento aguas abajo del rio Copiapó, en el año 2017 existió un aumento del caudal en los meses de otoño, llegando a los 20 m³/s. Consecutivamente el resto de los años se observa una brusca disminución del caudal, debido a la poca y escasa precipitación presente en la región, llegando a valores de 0 m³/s.

El basamento se caracteriza por ser impermeable en general y por presenciar amplias depresiones vinculadas a zonas de falla y/o fracturas. La cota del basamento entre La Puerta (zona más alta) hasta el sector Pabellón fluctúa entre los valores de 750 – 500 m, y hasta el sector Mal Paso se encuentra entre 500 – 300 m.

El impacto de la extracción de los pozos es mayor en los meses de septiembre a marzo (temporada alta para la agricultura), en cambio en los meses restantes el promedio baja. A través del análisis del modelo conceptual (mapa fuera de texto) se puede dilucidar que en el año 2017 hubo una recuperación de niveles debido al evento aluvional del mismo, esta recarga no se genera instantáneamente, por lo que se vio reflejada en el incremento de los niveles en los años siguientes hasta el año 2019, por sobre los 30 metros en el sector

Mal Paso y 10 metros aproximadamente en el sector La Puerta. En los siguientes años los niveles comenzaron a descender ya que no hubo mayor recarga y solo extracción. Además, la interferencia con el río se comenzó a ver afectada bajando los niveles de caudal a 2 m³/s y en el año 2022 llegó a valores cercanos a 0 m³/s. Es por esto que los niveles de los años 2017 y 2022 son prácticamente iguales en muchas zonas.

Esta información sumada al cambio climático, aumento de temperatura, disminución de las precipitaciones y poco o nulo escurrimiento aguas abajo refleja un mal escenario para el recurso hídrico en los próximos años.

Algunas de las formas de mitigar el impacto de la extracción de aguas por parte de las diferentes industrias serían el uso ya establecido de piscinas de infiltración, plantas desalinizadoras. Por otra parte, sería bueno establecer el método de pozos de infiltración para la recuperación de los niveles, en el cual se infiltraría al acuífero agua con las mismas calidades hidroquímicas con el fin de evitar modificar las condiciones naturales del acuífero.

VIII. REFERENCIAS

- Aguirre, I. (1999). Estudio hidrogeológico del valle del río Copiapó, segmento embalse Lautaro – Piedra Colgada, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile)*, Informe Registrado IR-99-17, 186 p., 2 mapas a escala 1:50.000. Santiago.
- Aldunate, T. (2017). Evaluación de métodos de recarga gestionada en la cuenca de Copiapó. [Título profesional]. Universidad de Chile. Santiago.
- Anderson, M., Woessner, W., Hunt, R. (2015). *Chapter 2 - Modeling Purpose and Conceptual Model*. Applied Groundwater Modeling (Second Edition). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-091638-5.00002-X>
- Andreu, J. & Salas, J.D. (1988). La Modelación en planificación hidráulica: modelos de simulación y síntesis de hidrología superficial. Ed. Universitat Politècnica de València, Servicio de Publicaciones.
- Arévalo, C. 2005. Carta Los Loros, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica*, No. 92, 53 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Bozkurt, D., Rondanelli, R., Garreaud, R y Arriagada, A. (2016). Impact of Warmer Eastern Tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama Floods. *Monthly Weather Review*. 144: 4441-4460.
- Concha, F., Alvez A y Vergara M. (2020). Minería, energía y agua. Series Comunicacionales CRHIAM 2020/04, Concepción, Chile. ISSN 0719-3009.
- Dirección General de Aguas. (2013). Actualización de la modelación integrada y subterránea del acuífero de la cuenca del río Copiapó, SIT N° 332, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Hidromas CEF Ltda.
- Dirección General de Aguas. (2018). Herramientas de gestión y actualización de los modelos numéricos del acuífero de Copiapó, SIT N° 436, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Hídrica Consultores SPA.
- Dirección General de Aguas. (2020). Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Copiapó, SIT N° 462, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: UTP Hídrica – ERIDANUS.
- Dirección General de Aguas y Dictuc S.A. (2010b). Análisis integrado de gestión en cuenca del río Copiapó – Tomo III. Sistematización y Levantamiento de Información de Usos y Demandas. Santiago, Chile.

- Dirección Meteorológica de Chile. (2019). Dirección general aeronáutica civil. [en línea] (fecha de consulta: 08/07/2019). Disponible en: <http://www.meteochile.cl>.
- División de Planificación y Desarrollo. (2019). Informe técnico Sistema territorial cuencas hidrográficas. Gobierno Regional de Atacama.
- Elorza, M. (2008). Geomorfología: Madrid, Pearson Prentice Hall, 920 pp.
- Fernández, G., Sandoval, M y Vidal, M. (2020). Reciclaje en la agricultura: Disposición de biosólidos al suelo. Series Comunicacionales CRHIAM 2020/04, Concepción, Chile. ISSN 0719-3009.
- Hartley, A.J., Chong, G., Houston, J y Mather, A. (2005). 150 million years of climatic stability: evidence from the Atacama Desert, northern Chile. *Journal of the Geological Society*. 162: 421 – 424.
- Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hidrological impact. *International Journal of Climatology*. 26: 2181-2198.
- Izquierdo, T., Abad, M y Carvajal, H. (2018) Urban flood scenarios in arid environments: the case of Copiapó in the Atacama Desert (Northern Chile). In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 20, p. 9248).
- Puig, G. (2017). Localización de áreas propicias para la gestión de recarga del acuífero en la cuenca del rio Copiapó, Región de Atacama. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad Andrés Bello, Santiago.
- Tully, C.D., Rech, J.A., Workman, T.R., Santoro, C.M., Capriles, J.M., Gayo, E.M y Latorre, C. (2018). In-stream wetland deposits, megadroughts, and cultural change in the northern Atacama Desert, Chile. *Quaternary Research*. 91: 63-80.
- Servicio Nacional de Minería y Geología – Corporación de Fomento de la Producción (2012). Evaluación hidrogeológica de la cuenca del rio Copiapó, con énfasis en la cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales subterráneos.
- Sparelli, I. (2018). Flash-floods in the Atacama Desert: geomorphological and stratigraphic analysis in “La Puerta” área (Quebrada Paipote, Chile). Tesi di laurea Magistrale in geología e geología técnica, Università Degli Studi Di Padova, Italy, 173 p