



ESCUELA DE
GEOLOGÍA

RECARGA ARTIFICIAL EN LA LOCALIDAD DE SAN MIGUEL- EL HUAPE, PRIMERA SECCIÓN DE LA CUENCA RÍO ACONCAGUA.

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para optar
al Título de Geóloga.

ALEXANDRA SOPHIA VAN TREEK JOFRÉ

Profesor guía:

LEONARDO ALMAGRO LANDÓ

Profesor co-guía:

ÍTALO PAYACÁN PAYACÁN

Miembro de la comisión:

CRISTIAN PINO COLL

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la empresa Aluvial Consultores.

SANTIAGO DE CHILE

2021

Índice

Índice de figuras	IV
Índice de tablas.....	VII
Resumen	IX
Agradecimientos.....	X
1. Introducción.....	- 1 -
1.1 Formulación del estudio propuesto.....	- 1 -
1.2 Ubicación zona de estudio.....	- 2 -
1.3 Situación legal de la cuenca.....	- 3 -
1.4 Hipótesis.....	- 5 -
1.5 Objetivos.....	- 5 -
1.5.1 Objetivo general.....	- 5 -
1.5.2 Objetivos específicos.....	- 5 -
1.6 Metodología.....	- 6 -
2. Antecedentes.....	- 9 -
2.1 Marco geológico.....	- 9 -
2.1.1 Geología superficial.....	- 9 -
2.1.2 Geomorfología.....	- 10 -
2.2 Marco hidrológico.....	- 14 -
2.2.1 Clima.....	- 16 -
2.2.1.1 Temperatura.....	- 17 -
2.2.1.2 Precipitaciones.....	- 19 -
2.2.1.3 Humedad relativa.....	- 20 -
2.2.2 Fluviometría.....	- 21 -
2.2.3 Uso de agua.....	- 23 -
3. Resultados.....	- 27 -

3.1	Disponibilidad hídrica para recarga.....	- 27 -
3.1.1	Caudal ecológico.....	- 28 -
3.1.2	Derechos de agua superficial registrados.....	- 29 -
3.1.3	Disponibilidad.....	- 30 -
3.2	Caracterización hidrogeológica.....	- 32 -
3.2.1	Caracterización piezométrica.....	- 32 -
3.2.1.1	Profundidad del nivel de agua.....	- 32 -
3.2.1.2	Caracterización espacial.....	- 37 -
3.2.1.3	Evolución temporal de los niveles.....	- 38 -
3.2.2	Unidades hidrogeológicas.....	- 41 -
3.2.3	Parámetros hidráulicos del acuífero.....	- 46 -
3.2.3.1	Permeabilidad.....	- 46 -
3.2.3.2	Transmisividad.....	- 48 -
3.2.3.3	Coeficiente de almacenamiento.....	- 50 -
3.3	Caracterización hidroquímica.....	- 51 -
3.3.1.1	pH.....	- 54 -
3.3.1.2	Conductividad eléctrica.....	- 56 -
3.4	Caracterización zona no saturada.....	- 58 -
3.4.1	Estratigrafía.....	- 58 -
3.4.2	Parámetros hidráulicos.....	- 59 -
3.5	Tipo de recarga a realizar.....	- 61 -
3.6	Modelación numérica.....	- 63 -
3.6.1	Descripción de HydroGeoSphere.....	- 63 -
3.6.2	Descripción de la estructura del modelo.....	- 63 -
3.6.3	Ubicación de la piscina de infiltración.....	- 66 -
3.6.4	Efectos de la recarga en el acuífero.....	- 67 -
3.7	Análisis de sensibilidad.....	- 76 -

4.	Discusión.....	- 79 -
4.1	Disponibilidad de agua para ser utilizada en la recarga artificial.....	- 79 -
4.2	Descenso de los niveles piezométricos.....	- 80 -
4.3	Modelación.....	- 81 -
4.4	Alcances del proyecto.....	- 82 -
4.5	Gestión y planificación.....	- 83 -
5.	Conclusión.....	- 85 -
5.1	Recomendaciones.....	- 87 -
6.	Bibliografía.....	- 88 -
7.	Anexos.....	- 91 -
7.1	Anexo I: Gráficos caudal medio diario.....	- 91 -
7.2	Anexo II: Columnas estratigráficas de los expedientes revisados.....	- 96 -

Índice de figuras

Figura 1:	Imagen satelital que muestra la ubicación del área de estudio.....	- 3 -
Figura 2:	Imagen satelital de la ubicación de las secciones de riego de la cuenca del río Aconcagua.....	- 4 -
Figura 3:	Geología del sector de estudio, construidas a partir de la hoja Quillota-Portillo (Rivano y Sepúlveda, 1993).....	- 9 -
Figura 4:	Mapa de elevación (msnm) y unidades geomorfológicas presentes en el acuífero de San Felipe y el área de estudio.....	- 11 -
Figura 5:	Mapa de pendiente del área de estudio.....	- 13 -
Figura 6:	Hidrología del acuífero de San Felipe, en rectángulo rojo el área de estudio, construidas a partir de datos publicados por DGA (2020b).....	- 14 -
Figura 7:	Imagen satelital con la ubicación de las estaciones de control de la DGA. construido a partir de datos publicados por DGA (2020b).....	- 16 -
Figura 8:	Temperaturas medias anuales entre los años 1990 al 2019 de la estación Vilcuya, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).....	- 17 -

Figura 9: Isolínea de evaporación [mm/año] en el área de estudio, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).....	- 18 -
Figura 10: Precipitación anual entre los años 1999 al 2019 en la estación río Aconcagua en Chacabuquito, la línea roja representa la línea de tendencia de estos valores, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).	- 19 -
Figura 11: Precipitaciones mensuales del año 2019 en la estación río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).	- 20 -
Figura 12: Curva de variación estacional río Aconcagua en Chacabuquito.....	- 21 -
Figura 13: Gráfico de comparación del caudal medio mensual de los años 2018 y 2019 con respecto al promedio histórico del río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).....	- 22 -
Figura 14: Ubicación de los derechos de aprovechamiento según su tipo y naturaleza, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).	- 23 -
Figura 15. Usos de derechos de agua según su naturaleza, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).....	- 24 -
Figura 16: Gráfico de derechos consuntivos según uso y naturaleza, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).....	- 25 -
Figura 17: Gráfico de comparación entre precipitaciones y caudal anuales en el río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a y 2020c).....	- 27 -
Figura 18: Gráfica con el caudal ecológico en el río Aconcagua en Chacabuquito.	- 29 -
Figura 19: Gráfico del caudal mensual de los derechos superficiales, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).....	- 30 -
Figura 20: Ubicación y valor de la profundidad del nivel del agua presente en el área de estudio, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.	- 33 -
Figura 21: Ubicación y profundidad de los niveles de agua de los pozos visitados en terreno del área de estudio y derechos concedidos por la DGA.	- 36 -
Figura 22: Piezometría correspondiente al área de estudio con isopiezas cada 30 m.....	- 38 -
Figura 23: Ubicación de los pozos de Agua Potable Rural.....	- 39 -
Figura 24: Gráfico de la evolución temporal de la profundidad del nivel de agua en los pozos del APR El Huape-San Miguel.....	- 40 -
Figura 25: Gráfico de la evolución temporal de la profundidad del nivel de agua del pozo en el APR El Sauce.....	- 40 -
Figura 26: Ubicación de los perfiles hidrogeológicos y profundidad de columnas estratigráficas, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.	- 42 -

Figura 27: Perfil hidrogeológico A-A', construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.....	- 44 -
Figura 28: Perfil hidrogeológico B-B', construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.....	- 45 -
Figura 29: Perfil hidrogeológico C-C', construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.....	- 46 -
Figura 30: Permeabilidades [m/día] en el área de estudio, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.....	- 47 -
Figura 31: Transmisividades [m ² /día] en el área de estudio, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.....	- 50 -
Figura 32: Ubicación pozos con hidroquímica y estación de calidad de aguas DGA, construido a partir de datos publicados por DGA (2020b).....	- 52 -
Figura 33: Diagrama Piper con información fisicoquímica de aguas subterráneas y superficiales, en tonos verdes aguas subterráneas y en rojo aguas superficiales, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).....	- 53 -
Figura 34: Diagrama Schoeller – Berkaloff con información fisicoquímica de aguas subterráneas y superficiales, en tonos verdes aguas subterráneas y en rojo aguas superficiales, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).....	- 54 -
Figura 35: Evolución temporal desde 1990 a 2019 del pH en estación Chacabuquito en el río Aconcagua según época de riego (azul) y no riego (anaranjado), construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).....	- 55 -
Figura 36: Evolución temporal desde 1990 a 2019 de la conductividad eléctrica en la estación Chacabuquito en el río Aconcagua según época de riego (azul) y no riego (anaranjado), construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).....	- 57 -
Figura 37: Columna estratigráfica tipo de la zona no saturada del área de estudio.....	- 59 -
Figura 38: Viabilidad de realizar recarga artificial en un determinado acuífero. Extraído de Murray y Tredoux, 1998.....	- 61 -
Figura 39: Ejemplo de la recarga de acuíferos gestionada con piscinas de infiltración. Extraído desde CNR.....	- 62 -
Figura 40: Vista desde el eje x de la discretización vertical del dominio. Extraída desde Paraview.....	- 64 -
Figura 41: Vista desde el eje z de la definición de la grilla del dominio con la piscina de infiltración. Extraída desde Google Earth.....	- 65 -

Figura 42: Simulación con exageración vertical del modelo en el estado inicial de saturación del subsuelo (tiempo 0.01 días). Extraída desde Paraview.....	- 67 -
Figura 43: Simulaciones con exageración vertical del modelo en el área de estudio para diferentes tiempos posteriores al inicio de la recarga. Extraída desde Paraview.	- 68 -
Figura 44:Gráfico de la tasa de infiltración en el área de estudio.	- 69 -
Figura 45: Simulación con exageración vertical del modelo del área de estudio luego de 100, 200, 365 y 700 días después de iniciada la recarga. Extraída desde Paraview.	- 70 -
Figura 46: Movimiento de isopiezas durante y posterior a la infiltración. Extraída desde Paraview.	- 71 -
Figura 47: Gráfica del ascenso de los niveles piezométricos versus el tiempo de infiltración en pozos de observación ubicado a 150 m del centro de la piscina de infiltración en cuatro direcciones noreste (azul), suroeste (anaranjado), sureste (gris) y noroeste (amarillo.).....	- 73 -
Figura 48: Imagen satelital con los gráficos de los pozos de observación en el borde noreste y suroeste del modelo numérico. Extraído de Google Earth.	- 74 -
Figura 49: Gráfico del volumen total acumulado en el tiempo de la recarga artificial.	- 75 -
Figura 50: Análisis de sensibilidad del modelo respecto a la conductividad hidráulica horizontal, en azul 25 m/día, en anaranjado 10 m/día y en gris 5 m/día.	- 76 -
Figura 51: Gráficos de los pozos de observación al borde SO (1350 m del centro de la piscina) y NE (650 m del centro de la piscina) del modelo para las conductividades de 25 (azul) y 5 m/día (anaranjado).	- 77 -
Figura 52: Volumen acumulado de la recarga en el modelo de conductividad hidráulica horizontal saturada de 25 y 5 m/día de color azul y anaranjado respectivamente.	- 78 -

Índice de tablas

Tabla 1: Estaciones de control DGA en el área de estudio, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).	- 15 -
Tabla 2: Temperatura media mensual entre los años 1990 al 2019 de la estación Vilcuya, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).	- 17 -
Tabla 3: Precipitaciones medias mensuales en la estación río Aconcagua en Chacabucuito entre los años 1999 al 2019, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).	- 20 -
Tabla 4: Probabilidad de excedencia de los caudales (m ³ /s) del río Aconcagua en Chacabucuito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).	- 21 -

Tabla 5: Promedio, mínimo y máximo del caudal medio mensual (m ³ /s) de la estación del río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).....	- 22 -
Tabla 6: Caudal ecológico mínimo para el río Aconcagua en Chacabuquito.	- 29 -
Tabla 7: Caudal por mes de los derechos superficiales desde la estación río Aconcagua en Chacabuquito hasta la desembocadura, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).	- 30 -
Tabla 8: Disponibilidad hídrica mensual.....	- 31 -
Tabla 9: Registro histórico de la profundidad de nivel de agua (m) en el área de estudio, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.	- 35 -
Tabla 10: Rangos de conductividad hidráulicas para la recarga artificial.....	- 61 -
Tabla 11:Parámetros ingresados al modelo.....	- 66 -
Tabla 12:Parámetros hidráulicos y condiciones hidrogeológicas del área de estudio para seleccionar la piscina de infiltración.....	- 66 -
Tabla 13: Niveles piezométricos a diferentes tiempos iniciada la infiltración y ascenso máximo de estos.....	- 72 -

Resumen

Con el fin de poder mitigar el problema de escasez hídrica presente en la región de Valparaíso se realiza un estudio de recarga artificial en la provincia de los Andes, en el sector de San Miguel - El Huape, primera sección de la cuenca del río Aconcagua. El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología aplicada a estudios de recarga artificial de acuíferos, que contemple los procesos que ocurren en la zona no saturada y determinar la viabilidad en un sector del acuífero del río Aconcagua.

Para esto se realiza un modelo conceptual, el cual permitió conocer las condiciones hidrogeológicas de la zona no saturada y saturada en el lugar donde se propone realizar la piscina de infiltración, San Miguel – El Huape. En esta zona el acuífero San Felipe, se caracteriza por ser de carácter libre conformado principalmente por gravas y en menor medida por sedimentos finos y tener un espesor de 120 m aproximadamente, mientras que la zona no saturada presenta un promedio de 40 m de espesor. Además, se determinó la disponibilidad de agua superficial para ser utilizada en la recarga correspondiente a un total de 25.62 m³/s distribuidos en 3 meses (noviembre, diciembre y enero).

Posterior a esto, se construyó un modelo numérico en el software HYDROGEOSPHERE para analizar el funcionamiento de la recarga artificial tanto en la zona no saturada como saturada. El modelo numérico muestra que, para una piscina de 100 x 100 m el sistema acuífero infiltra a una tasa de 0.17 m³/s y un volumen total de 1.370.410 m³. Los mayores ascensos de los niveles se sitúan en cercanías a la piscina de infiltración, de hasta 11 m durante el periodo de infiltración (90 días). Además, se evaluó la sensibilidad del modelo ante variaciones de la conductividad hidráulica horizontal.

En base a los resultados se concluye que la recarga sería viable en el sector de San Miguel – El Huape y tendría principalmente como beneficiarios a los usuarios de APR El Sauce, dada a la cercanía de este con la ubicación de la piscina de infiltración (250 m desde el centro de la piscina). Además, la metodología elaborada ha permitido estimar el agua disponible para recargar artificialmente al acuífero, evaluar los beneficios de dicha recarga sobre el acuífero y permitió reducir las incertidumbres en la toma de decisiones para la materialización de la recarga artificial de acuíferos.

Se puede concluir que la distribución y la efectividad de la recarga queda determinada principalmente por la conductividad hidráulica vertical y transmisividad del acuífero receptor.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a todos los profesores (as) que estuvieron involucrados en mi formación como geóloga en la Universidad Mayor.

Quiero agradecer también a Leonardo Almagro, profesor guía de este trabajo, quien me brindo la oportunidad de poder realizar la memoria en un tema que me encanta y apasiona, se dio el trabajo de orientarme, aconsejarme y guiarme durante la creación de esta memoria.

Además, me gustaría agradecer a Ítalo Payacán, profesor co-guía de este trabajo, quien tuvo el trabajo de aconsejar y orientarme durante la memoria.

Por otro lado, me gustaría agradecer a Cristian Pino parte de la comisión evaluadora de la memoria, quien fue un pilar fundamental en la modelación, estuvo presente ante cualquier duda que tenía, dispuesto a ayudarme, a enseñar y a ofrecerme todos sus conocimientos de la mejor manera.

También me gustaría agradecer a todos mis amigos de la vida y a los que cree en las universidades, que estuvieron dándome animo en todo momento e hicieron que mi estadía en la universidad fuese más divertida y memorable, apoyándome en mis locuras, en especial a Javier, que siempre me apoyó y jamás dudo un segundo de mis conocimientos, dándome ánimo cuando no sabía que era lo que me gustaba y apoyándome hasta el último minuto.

En especial me gustaría terminar agradeciendo a toda mi familia, que los adoro con todo mi corazón, gracias a mis papas, Hans y Erika por aguantar mis mañas y decisiones, gracias por darme ánimo y creer que era capaz de realizar lo que me propusiera y de cumplirlo con honores, a mis hermanas Isidora y María Renata que las adoro y que fueron pilar fundamental en todo momento y a mi abuela Gladys, que siempre me mandaba las mejores vibras.

1. Introducción.

1.1 Formulación del estudio propuesto.

El agua subterránea es un recurso vital para los seres humanos, dado que es utilizada para abastecer el riego y el consumo humano cuando las aguas superficiales se encuentran escasas. Bajo dicha premisa, las aguas subterráneas serían de particular interés en Chile, ya que, en el año 2015, un estudio realizado por el World Resources Institute señaló a Chile como una de las naciones con mayores probabilidades de enfrentar una disminución en el suministro del agua, debido a las bajas precipitaciones y al incremento de las temperaturas (Maddocks, Young, & Reig, 2015).

Durante los últimos 10 años, la zona central de Chile ha sido afectada por una prolongada sequía, registrándose una disminución de las precipitaciones, lo que ha provocado una reducción de los caudales de los ríos en las regiones de Coquimbo y Valparaíso que han alcanzado un déficit de hasta un 70% aproximadamente con respecto al caudal de un año normal (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015). Lo anterior ha generado un déficit en la recarga natural de los acuíferos, lo que, sumado al aumento de las superficies de plantaciones y al crecimiento de la población que demandan una mayor extracción de agua subterránea, ha provocado la recesión de los niveles de los acuíferos.

La situación antes descrita ha obligado al Ministerio de Agricultura a decretar emergencia agrícola por escasez hídrica en algunas regiones de la zona central de Chile en el año 2019. Por otro lado, el Ministerio de Obras Públicas ha declarado zona de escasez hídrica varias comunas y regiones de la zona central de Chile, entre las que se encuentra la región de Valparaíso. La región de Valparaíso ha sufrido con mayor severidad las consecuencias de la sequía y actualmente se encuentra bajo un decreto de excepción que declara la región como zona de catástrofe por sequía (Decreto N°308/2019) (MinInterior, 2019).

La cuenca del río Aconcagua se encuentra en la zona central de Chile, en el extremo sur de los valles transversales ubicados en la región de Valparaíso. Intermitentemente, desde el año 2008, la Dirección General de Aguas (DGA) ha declarado a esta cuenca con escasez hídrica y ha establecido el área como zona de restricción. Debido a esto, la cuenca se encuentra con mecanismos de resguardos para la extracción de las aguas subterráneas y constitución de nuevos derechos de aprovechamiento.

Frente a la situación antes descrita, con el fin de dar solución a esta problemática y satisfacer la demanda por el recurso en el sector afectado, es de sumo interés efectuar una propuesta de recarga artificial de los acuíferos.

La recarga artificial de un acuífero, también llamada recarga de acuíferos gestionada (RAG), es un método de gestión hídrica que permite adicionar agua en los acuíferos de manera intencional para su recuperación y uso posterior con el propósito de producir un beneficio ambiental y socioeconómico (CNR, Sin fecha). Esta recarga debe ser controlada a través de estructuras diseñadas para recargar de forma artificial el acuífero, que permitan introducir el agua proveniente de lluvias, escurrimientos superficiales, aguas residuales tratadas u otras, para luego ser recuperada para distintos tipos de uso. Existen diversos mecanismos para realizar una recarga artificial, según Bouwer, (2002), los mecanismos se clasifican en 3 sistemas: los sistemas de recarga en superficie, sistemas de recarga en la zona no saturada (ZNS) y los sistemas de recarga en la zona saturada (ZS).

Es por esto que en este trabajo se propone desarrollar una estrategia y metodología que ofrezca soluciones a corto plazo para el escenario actual que presenta el sector, reteniendo el agua que escurre por el río Aconcagua, favoreciendo así la recarga al acuífero. De esta forma se puede utilizar el agua disponible en los periodos de abundancia, para poder utilizarlo en épocas donde este recurso sea escaso y a su vez requerido.

Para realizar la recarga de manera óptima, se requiere tener disponibilidad del recurso hídrico, conocer las características del acuífero, su capacidad de admitir y transmitir el agua de recarga, teniendo la precaución de no afectar la calidad del agua del acuífero. Con el fin de determinar la viabilidad de realizar la recarga artificial, se deben efectuar estudios que permitan caracterizar hidrogeológicamente la zona saturada y no saturada de los sistemas hídricos.

1.2 Ubicación zona de estudio.

La zona de estudio se ubica en el río Aconcagua, en el sector acuífero de San Felipe de la provincia de los Andes, región de Valparaíso.

El área de estudio tiene una extensión de 112,6 km² y se ubica entre las coordenadas UTM 347977 E, 6371441 N y 360150 E, 6362102 N datum WGS 84 huso 19 S entre la ciudad de Los Andes, localidad de Paidahuen y El Huape (Figura 1).

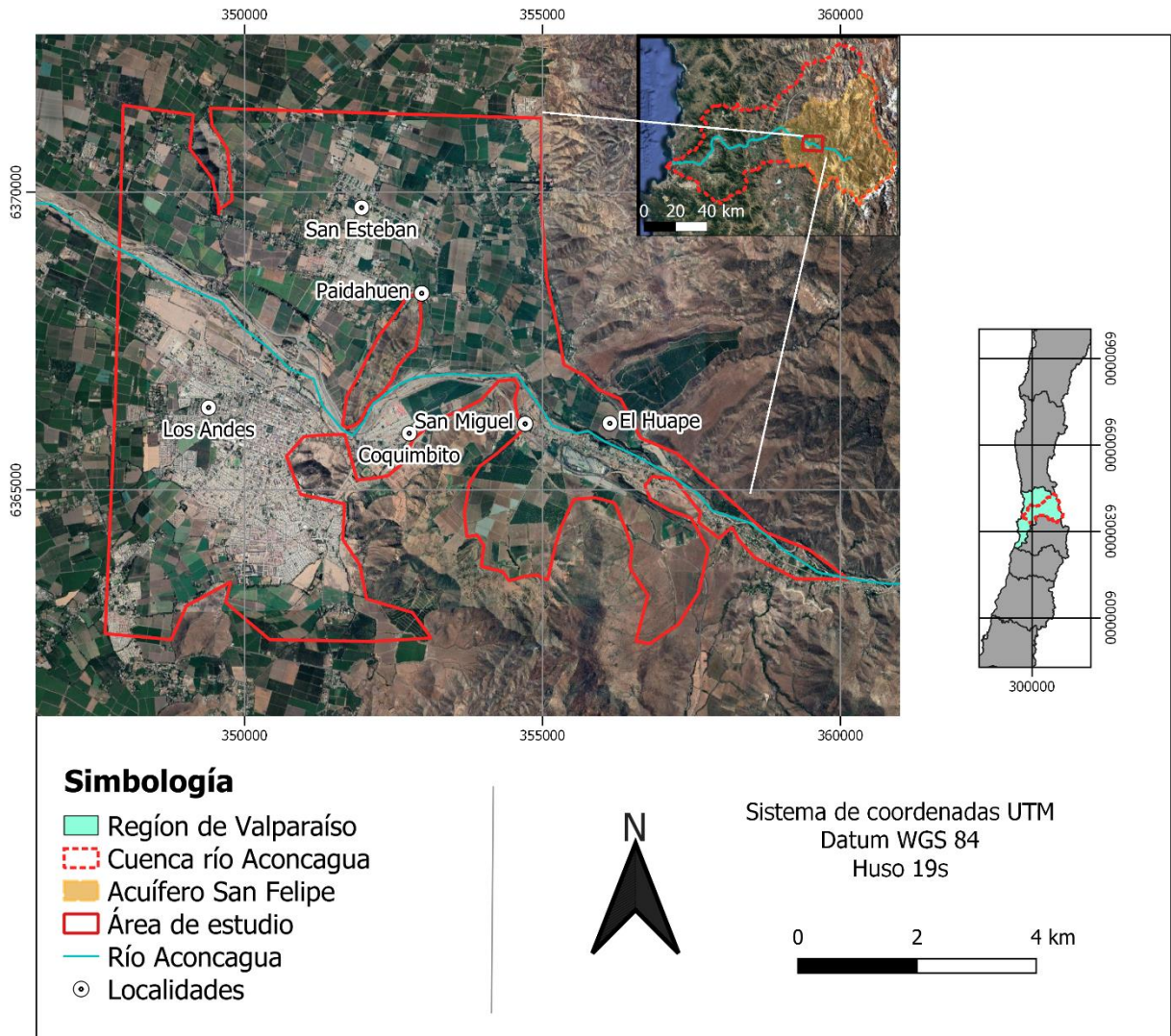


Figura 1: Imagen satelital que muestra la ubicación del área de estudio.

1.3 Situación legal de la cuenca.

La DGA ha subdividido la cuenca del río Aconcagua en 5 secciones administrativas en función de otorgamiento de derechos (Figura 2). Algunas de estas secciones se encuentran declaradas legalmente agotadas y otras poseen juntas de vigilancia, la cual regula el uso de los derechos de aguas otorgados (DGA, 2004a). Estas secciones son las siguientes:

1. **Primera sección:** Abarca de los ríos Juncal, Blanco y Colorado en la Cordillera de los Andes hasta el puente del Rey, que corresponde a la entrada sur de la ciudad de San Felipe.

2. **Segunda sección:** Comprende desde el fin de la primera sección, hasta el lugar donde pasa el río Aconcagua frente a la puntilla de Romeral.
3. **Tercera sección:** Comprende entre La puntilla de Romeral y el puente de ferrocarril ubicado después de la junta del río Aconcagua con el estero San Isidro.
4. **Cuarta sección:** Conformada por el tramo comprendido entre el puente del ferrocarril ubicado después de la junta del río Aconcagua con el estero San Isidro y la desembocadura del río Aconcagua.
5. **Putauendo:** Conformada por toda la subcuenca del río Putaendo, desde su nacimiento en la cordillera hasta la desembocadura del río Aconcagua en su segunda sección.

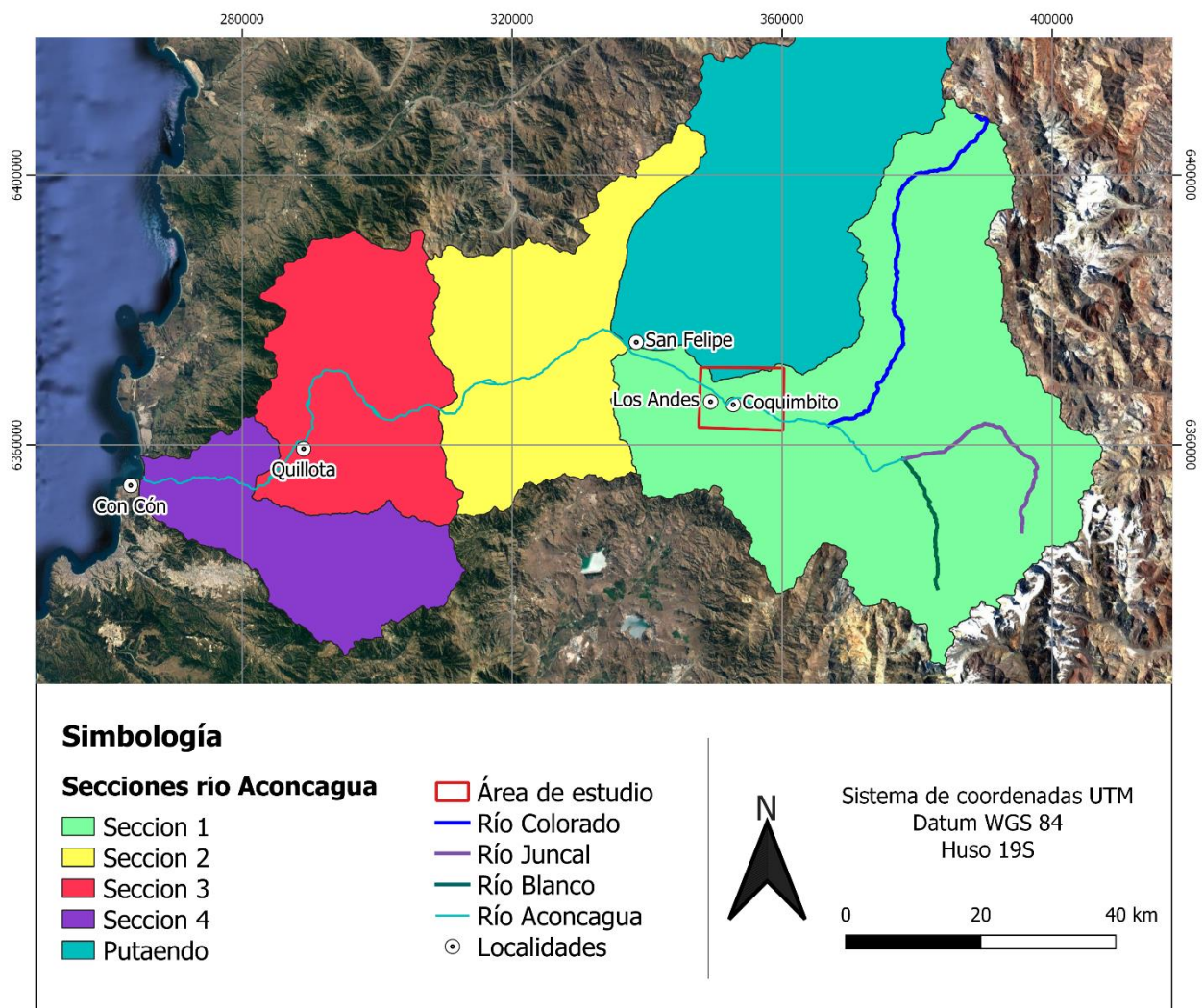


Figura 2: Imagen satelital de la ubicación de las secciones de riego de la cuenca del río Aconcagua.

El área de estudio se encuentra inmersa en la primera sección y el principal recurso de agua proviene desde el caudal del río Aconcagua y los ríos Juncal y Colorado (Figura 2).

Esta sección posee una organización legal denominada “Junta de Vigilancia de la Primera Sección del río Aconcagua” por Decreto Supremo N° 52 de 5 de enero de 1955. Esta sección se declaró agotada el 22 de mayo de 1985 según la Resolución DGA n° 209. Esta junta distribuye las acciones correspondientes a los derechos consuntivos (1 acción =1.8 l/s) y posee la jurisdicción sobre algunas asociaciones de canalistas (DGA, 2004a).

1.4 Hipótesis.

Mediante la elaboración de una metodología adecuada que contemple los procesos que ocurren en la zona no saturada, que considere el agua disponible para infiltrar en el tiempo y los beneficios que tendrá dicha recarga sobre el acuífero, es factible reducir las incertidumbres en la toma de decisiones para la materialización de la recarga artificial de acuíferos.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo general.

Desarrollar una metodología aplicada a estudios de recarga artificial de acuíferos, que contemple los procesos que ocurren en la zona no saturada y determinar la viabilidad en un sector del acuífero del río Aconcagua.

1.5.2 Objetivos específicos.

Con el propósito de maximizar la viabilidad de proyectos de recarga artificial, se proponen los siguientes objetivos específicos.

1. Comprender y analizar el funcionamiento hidrogeológico de la primera sección del acuífero río Aconcagua a través de un modelo conceptual.
2. Evaluar la disponibilidad hídrica en la primera sección del acuífero del río Aconcagua para realizar la recarga artificial.
3. Cuantificar el caudal que es capaz de transmitir la ZNS y el tiempo de tránsito desde la superficie hasta el acuífero.
4. Determinar el efecto del agua infiltrada sobre los niveles piezométricos, tanto espacial y temporalmente.

5. Analizar la viabilidad de la recarga artificial.

1.6 Metodología.

La metodología que se llevó a cabo en este estudio según los objetivos específicos consiste en:

- 1. Comprender y analizar el funcionamiento hidrogeológico de la primera sección del acuífero río Aconcagua a través de un modelo conceptual.**

Para la realización de este objetivo, se hace una recopilación de los antecedentes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de la cuenca, específicamente de la primera sección del río Aconcagua. Esto se efectuará a través de la recopilación de información disponible en fuentes como Comisión Nacional de Riego (CNR), Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), tesis de universidades, Dirección General de Aguas (DGA), entre otras.

Desde los datos disponibles en DGA se revisan las mediciones de las estaciones en línea y los derechos de aprovechamiento de agua para luego analizarlas y determinar las características hidrológicas e hidrogeológicas, como la estratigrafía, parámetros hidráulicos, calidad de agua, extracciones y niveles de agua presentes en el acuífero.

Mediante la información disponible de las pruebas de bombeo (tomadas de los expedientes de la DGA) se estimaron a través del método de Jacob con la corrección de espesor variable las transmisividades, mientras que las permeabilidades fueron estimadas con respecto a la transmisividad y el espesor saturado del acuífero. Estas fueron comparadas con la literatura existente, y en conjunto con la estratigrafía recopilada, se confeccionarán perfiles hidrogeológicos. Estos permitirán definir las unidades hidrogeológicas presentes en el sector.

Por otro lado, se realizará una caracterización piezométrica del acuífero a partir de los niveles de profundidad recopilados. Lo que permitirá determinar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

- 2. Evaluar la disponibilidad hídrica en la primera sección del acuífero del río Aconcagua para realizar la recarga artificial.**

En primer lugar, se recopilan los antecedentes fluviométricos de la estación Chacabuquito (DGA), para determinar el caudal presente en el río Aconcagua y conocer el nivel base del caudal en el sector.

En segundo lugar, se calcula el caudal ecológico mínimo a considerar en el río Aconcagua para el sector, donde la DGA establece que debe corresponder a un porcentaje determinado del caudal del río, dependiendo si el caudal con 95% de excedencia es menor o mayor al 10% del caudal medio anual.

A partir de los derechos de aprovechamiento registrados en la DGA, se recopilan los derechos superficiales consuntivos desde la estación Chacabuquito hasta la desembocadura del río Aconcagua.

Concluyendo, con la información disponible del caudal ecológico, el caudal de los derechos de agua superficial y el caudal de la estación base se determina la disponibilidad de agua que existe en el área de estudio.

3. Cuantificar el caudal que es capaz de transmitir la ZNS y el tiempo de tránsito desde la superficie hasta el acuífero.

En primer lugar, se determinan los parámetros hidráulicos de la zona no saturada, los cuales se estiman a partir de un análisis granulométrico de la zona para poder obtener los valores representativos del sector. Posteriormente a través del software HYDRUS 1D, se estiman los parámetros faltantes para el modelo van Genuchten.

A partir de los parámetros estimados de la ZNS y con la información del modelo conceptual se realiza un modelo numérico con el código HydroGeoSphere (HGS) ingresando la información recopilada para crear un modelo que represente la recarga hecha en el sector.

Posterior a esto se visualiza los resultados en el software Paraview y se realizan gráficas con los archivos de salida, los cuales muestran el caudal capaz de transmitir y el tiempo que se demora en llegar el agua recargada al acuífero, considerando su variación temporal en función de la variación del contenido de humedad.

4. Determinar el efecto del agua infiltrada sobre los niveles piezométricos, tanto espacial y temporalmente.

Tomando los resultados de las simulaciones, mediante el software Paraview se caracteriza el comportamiento del domo de recarga y el efecto espacial sobre los niveles piezométricos. Posterior a esto, con algunos archivos de salida del modelo y utilizando códigos basados en Python se realizan gráficos que muestran los ascensos de los niveles piezométricos durante el periodo de infiltración para determinar los efectos que se producen en el tiempo.

Luego, se ubicaron pozos de observación simulados dentro del dominio definido para observar los efectos de los niveles piezométricos que se producen en sectores aledaños a la ubicación de la piscina, determinando a quienes beneficia especialmente y por cuanto tiempo.

5. Analizar la viabilidad de la recarga artificial.

En primer lugar, se ha realiza un análisis de sensibilidad del modelo y de la recarga respecto a la conductividad hidráulica horizontal para el acuífero para corroborar la credibilidad del modelo.

Posterior a esto, se analiza en base a los resultados obtenidos y a los requerimientos que permiten la infiltración para conocer si es que la recarga es factible en el sector.

2. Antecedentes.

2.1 Marco geológico.

2.1.1 Geología superficial.

La zona que abarca este estudio está compuesta principalmente por rocas volcanoclásticas y rocas sedimentarias continentales que presentan edades del Cretácico Inferior al Cretácico Superior. Además, existe una importante extensión del sector que se encuentra cubierta por depósitos sedimentarios no consolidados, los cuales corresponden a depósitos aluviales y coluviales (Qac) y a depósitos de terraza continental (Qt) (Figura 3).

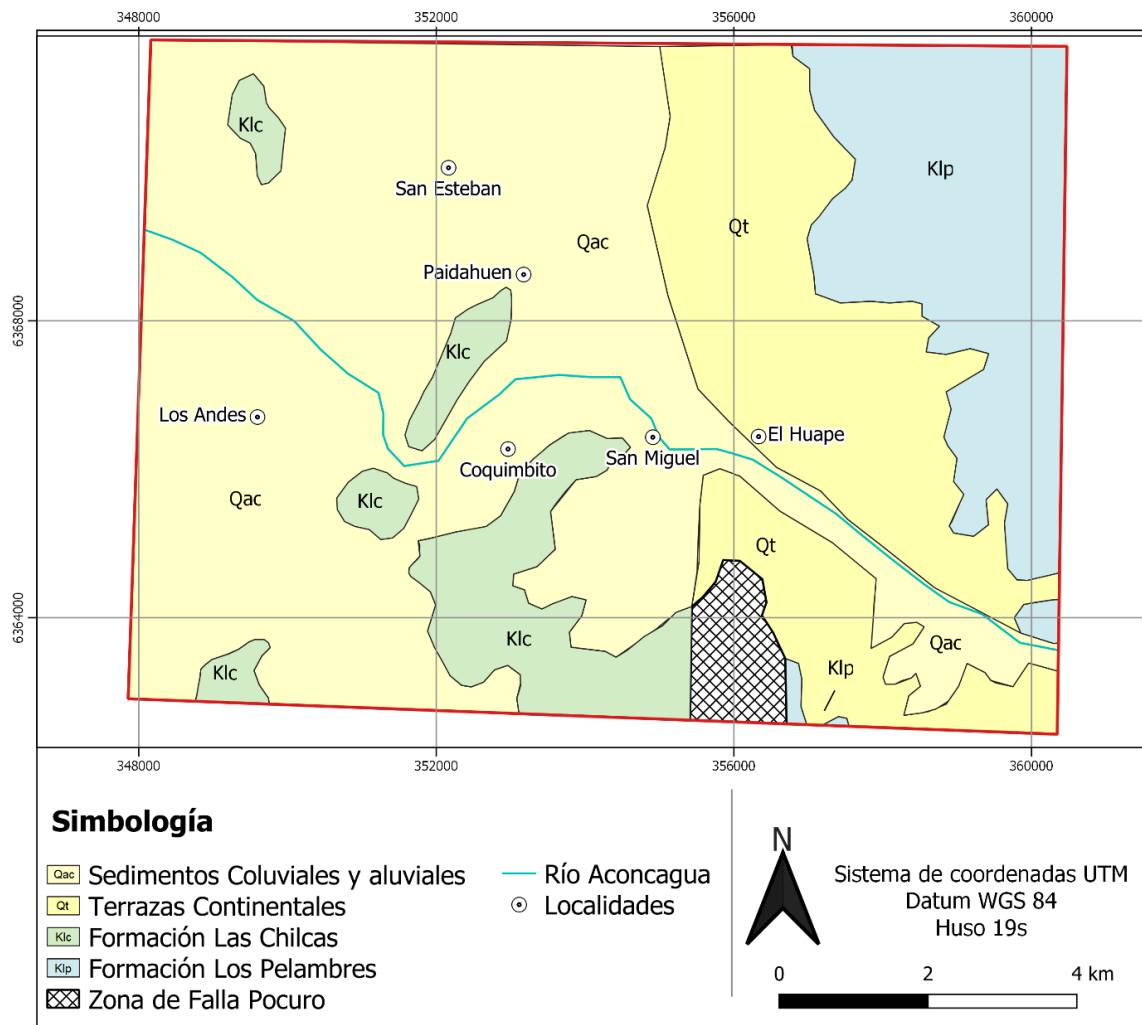


Figura 3: Geología del sector de estudio, construidas a partir de la hoja Quillota-Portillo (Rivano y Sepúlveda, 1993).

Según la carta geológica de Quillota-Portillo (Rivano y Sepúlveda, 1993), los depósitos aluviales y coluviales (Qac) están formados por acumulaciones de gravas, rípios de regular a mala estratificación, arenas y limos con buena estratificación. Estos están relacionados con los cursos de agua actual (río Aconcagua) y al colapso gravitacional correspondiente a deslizamiento en masa de grandes proporciones situados a lo largo de la Mega falla de Pocuro. Por otro lado, los depósitos de terrazas continentales (Qt) se presentan principalmente al este del valle y consisten en acumulaciones de arena medias y conglomerados finos a medios, los cuales se distinguen de los depósitos anteriores por encontrarse en altos topográficos (Figura 3).

A su vez, entre la ciudad de Los Andes y al noroeste de esta misma se depositan la mayor cantidad de sedimentos gruesos, debido al cambio de energía que presenta el río Aconcagua al momento de pasar de un dominio de alta energía en la cordillera a uno de baja energía (GCF, 2007). En esta zona, el basamento se encuentra a profundidades superiores a 200 m, aflorando en cerros islas construidos principalmente por rocas cretácicas de la Formación las Chilcas (Klc).

La presencia y actividad de la zona de falla Pocuro, situada en el borde oriental de la cuenca, marcando el límite entre el Dominio Central y el Dominio Cordillerano ha generado varios colapsos gravitacionales, derrumbes y terrazas del borde oriental de la cuenca (Rivano y Sepúlveda, 1993).

2.1.2 Geomorfología

Dentro del contexto regional, el área de estudio se ubica en la zona de transición de los valles transversales por el norte, y la depresión central por el sur. En el acuífero de San Felipe se pueden distinguir cuatro unidades geomorfológicas: Cordillera andina, Precordillera andina, Cuencas transicionales semiáridas y Cordones transversales.

La zona de estudio en particular se encuentra inmerso entre la Precordillera andina y las Cuencas transicionales semiáridas (Figura 4). La primera se encuentra ubicada en la zona este del área de estudio, presenta laderas abruptas y de altas pendientes, mientras que la segunda unidad geomorfológica presenta una orientación norte-sur, y específicamente en el sector se caracterizan por tener una gran planicie de ancho variable, con una inclinación hacia el oeste.

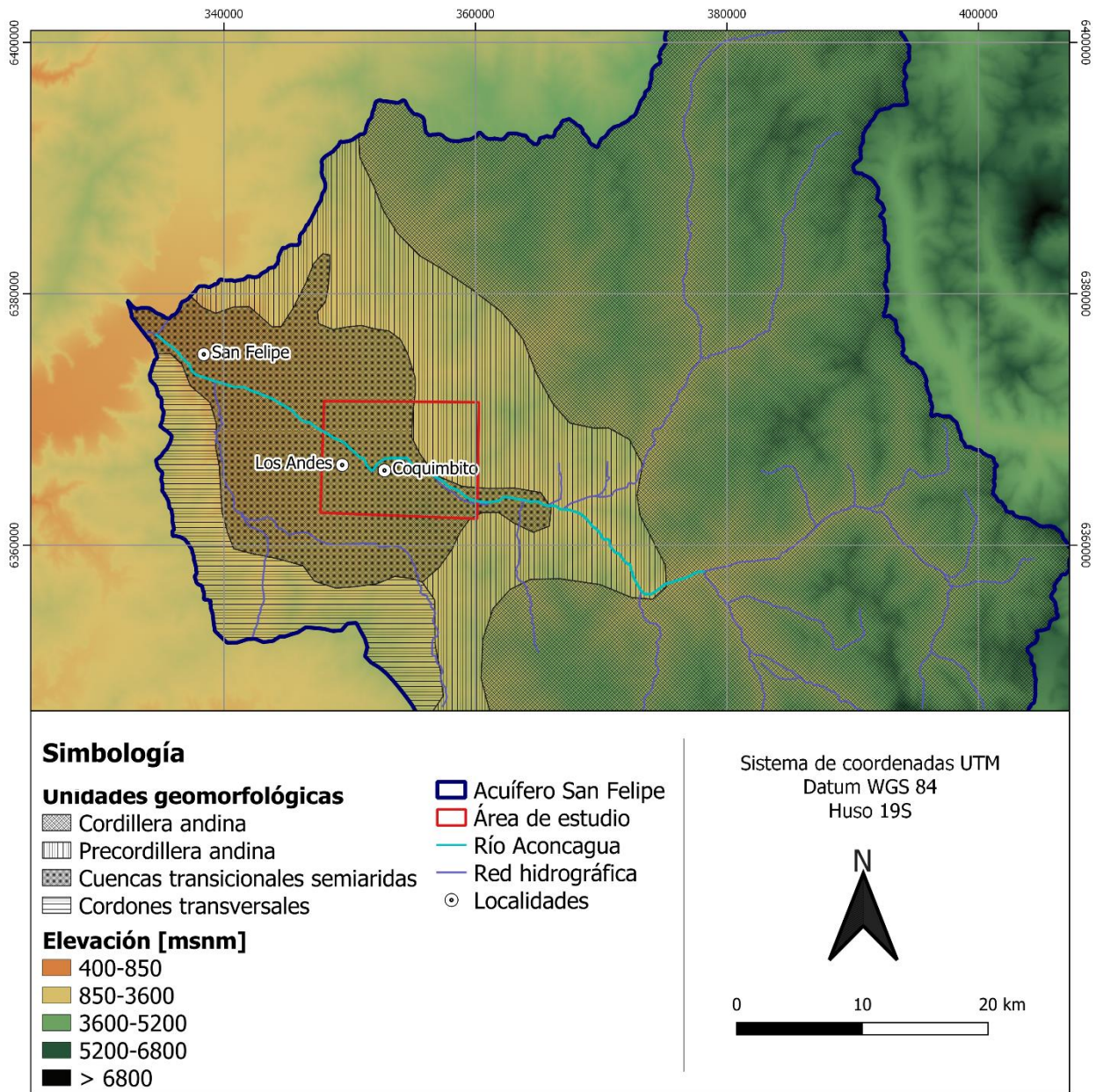


Figura 4: Mapa de elevación (msnm) y unidades geomorfológicas presentes en el acuífero de San Felipe y el área de estudio.

En cercanías de la localidad de Coquimbito, presenta una altura que varía entre los 800 y 900 msnm con una pendiente promedio de 3° observándose una topografía parcialmente regular y plana (Figura 5). Producto de esta baja pendiente que presenta el río en el valle, puede esperarse que las velocidades del río sean menores en el sector, lo que favorecería a una mejor infiltración del agua a las napas subterráneas en comparación a zonas con mayor pendiente, siempre que la presencia de agua sea suficiente.

Por otro lado, es importante mencionar la presencia de cerros islas en la zona de estudio, los cuales tienen alta pendiente (entre 10°- 30°). Estos cerros están asociados a formaciones rocosas correspondientes al basamento, lo que podría estar permitiendo que este último se encuentre en menores profundidades en este sector, proyectándose con una pendiente similar a la superficie (Figura 5).

Al sur de Paidahuen se encuentra el cerro del mismo nombre, que presenta una orientación preferencial al NE-SO, y al sur de ese cerro se encuentra el cerro La Virgen, el cual no presenta una orientación preferencial. Ambos se encuentran compuestos principalmente por rocas de la formación Las Chilcas (Klc).

En el curso del río Aconcagua, el valle está ocupado por una superficie inclinada llana. Al pie de las montañas situadas al este, la superficie se encuentra cubierta por depósitos coluviales y aluviales que han descendido a lo largo de las laderas de mayor pendiente, depósitos que son arrastrados cuando el río se aproxima a los costados.

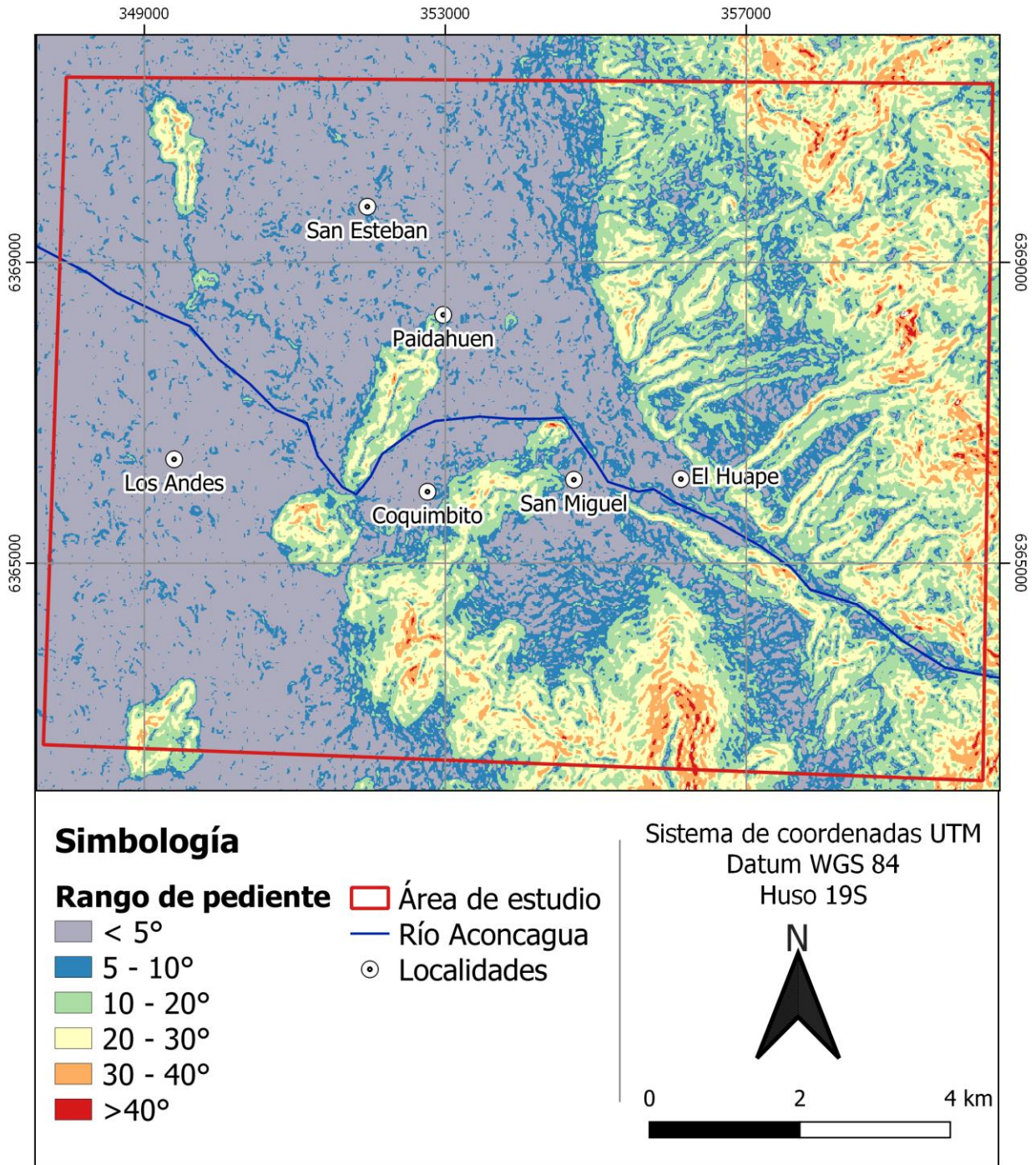


Figura 5: Mapa de pendiente del área de estudio.

2.2 Marco hidrológico.

El río Aconcagua se forma por la confluencia de los ríos Juncal y Blanco a los 1.430 msnm, recibiendo aportes del río Colorado. El río Aconcagua se extiende por 177 Km desde su origen hasta la desembocadura, mientras que en el acuífero de San Felipe tiene una extensión de 54 Km aproximadamente (Figura 6).

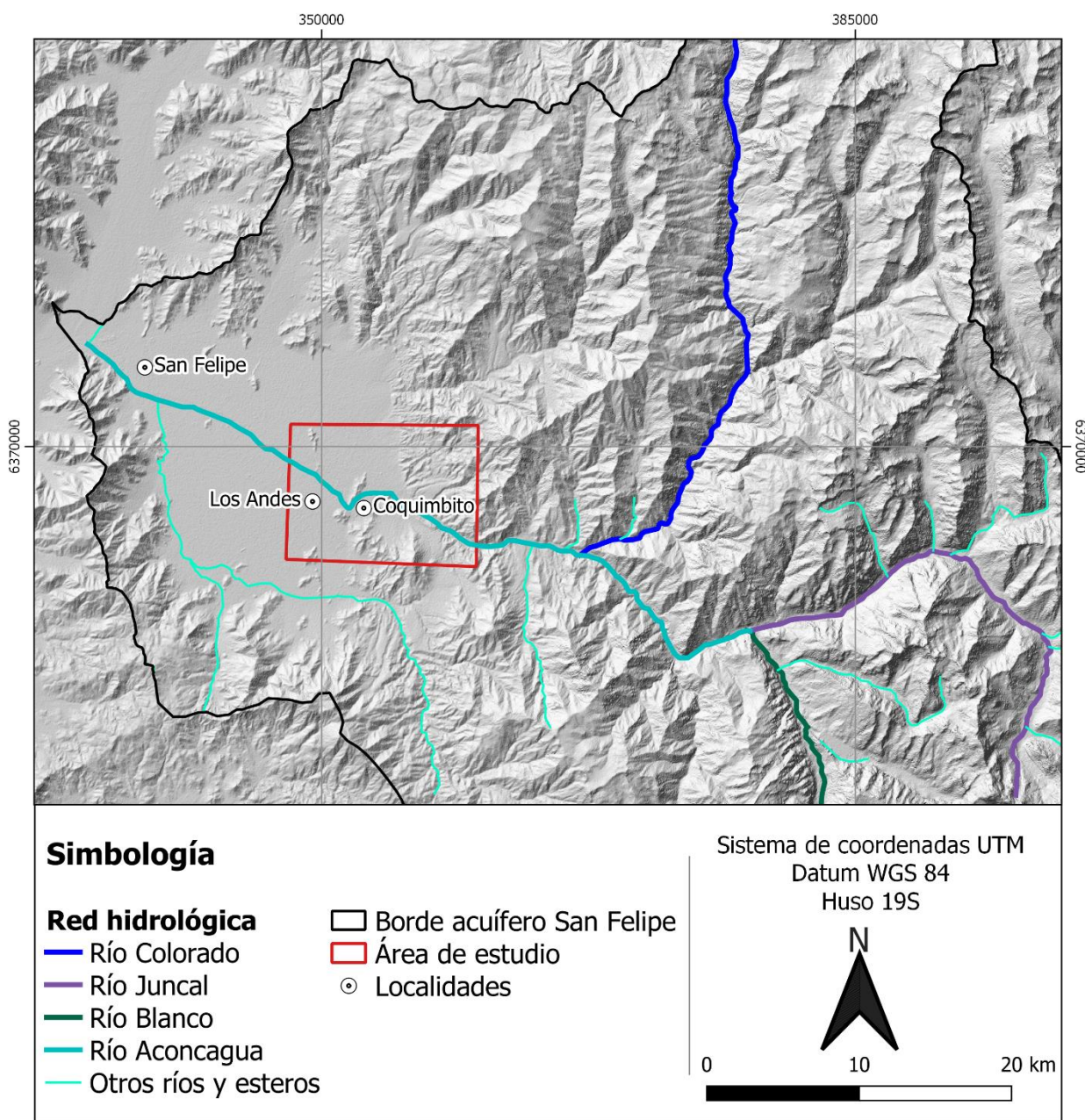


Figura 6: Hidrología del acuífero de San Felipe, en rectángulo rojo el área de estudio, construidas a partir de datos publicados por DGA (2020b).

Estos ríos provenientes de la cordillera permiten que el río Aconcagua tenga un régimen principalmente nival en su zona alta. En su desarrollo hasta su desembocadura va recibiendo aportes de diversos afluentes predominando un régimen pluvial, lo que permite caracterizar hidrológicamente al río Aconcagua como de un régimen de alimentación mixta o nivo-pluvial (DGA, 2004b). El recurso superficial disponible específicamente en la primera sección del río Aconcagua proviene del caudal del mismo río.

Para la caracterización hidrológica del área, se considera las mediciones obtenidas en las estaciones meteorológicas y fluviométrica del valle del río Aconcagua disponibles hasta el presente año en la DGA (Tabla 1; Figura 7).

Tabla 1: Estaciones de control DGA en el área de estudio, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

Estaciones DGA					
Nombre	Tipo de estación	Altura (msnm)	Fecha inicio	Ubicación	
				Norte	Este
Río Aconcagua en Chacabuquito	Fluviométrica y meteorológica	950	01/05/1966	6364286	358752
Vilcuya	Meteorológica	1.100	1/12/1964	6363236	362293

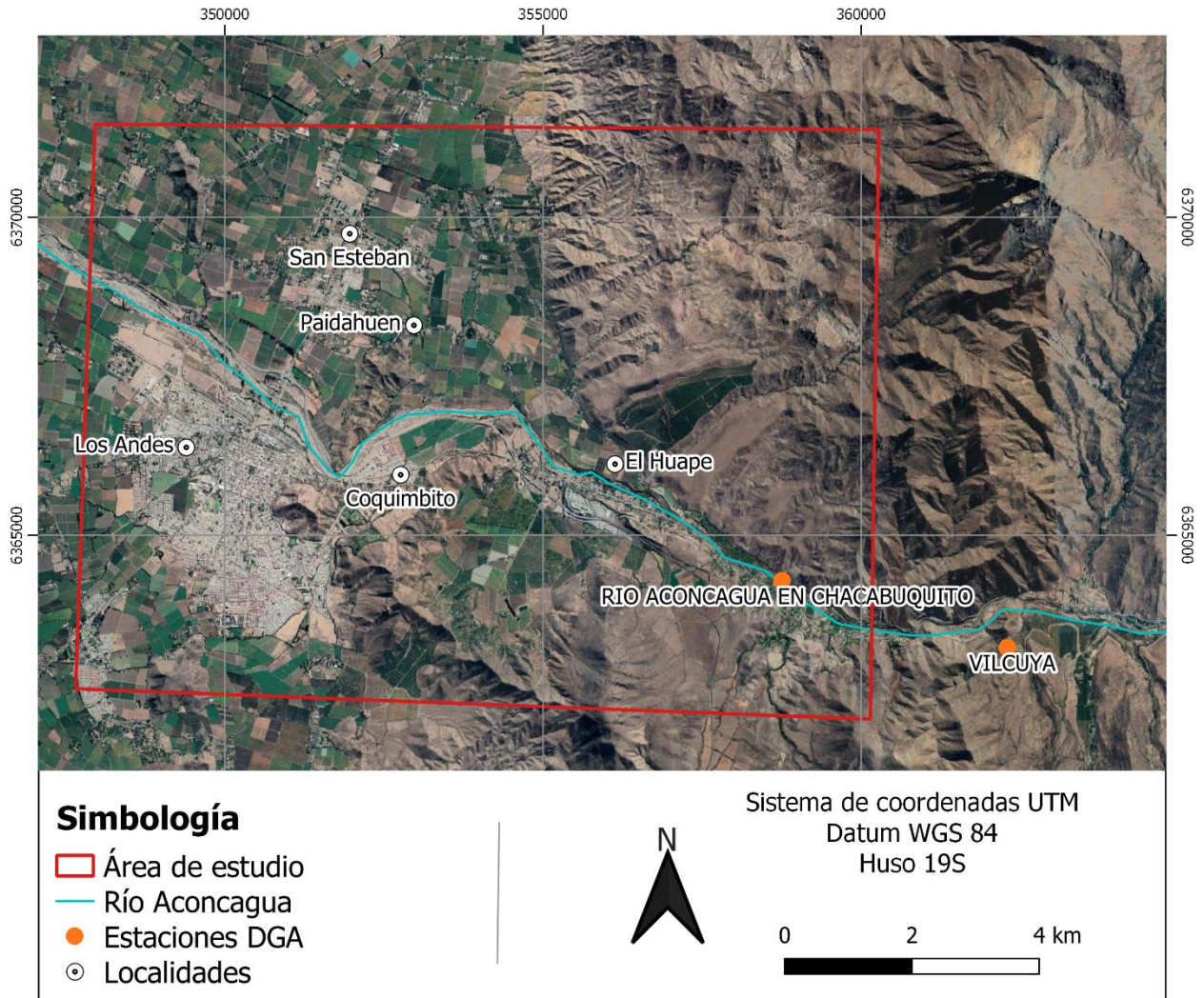


Figura 7: Imagen satelital con la ubicación de las estaciones de control de la DGA. construido a partir de datos publicados por DGA (2020b).

2.2.1 Clima.

A modo general, los climas que se distinguen en la cuenca del Aconcagua corresponden a templado tipo mediterránea con estación seca prolongada y frío de altura en la Cordillera de los Andes. El primero se encuentra prácticamente a lo largo del valle del Aconcagua mientras que el segundo se localiza en la Cordillera de los Andes por sobre los tres mil metros de altura permitiendo que la nieve se acumule y generando campos de hielo permanente en la cumbre y quebradas de la alta cordillera (DGA, 2004b).

2.2.1.1 Temperatura.

Usando los registros de temperatura de los años 1990 al 2019 de la estación meteorológica más cercana con información disponible (Vilcuya) se obtuvo la temperatura media anual y las temperaturas medias mensuales.

La información muestra que la temperatura media anual es de 15.2°C, observándose una variación interanual pequeña, que va desde 13.8°C a 16.3°C (Figura 8).

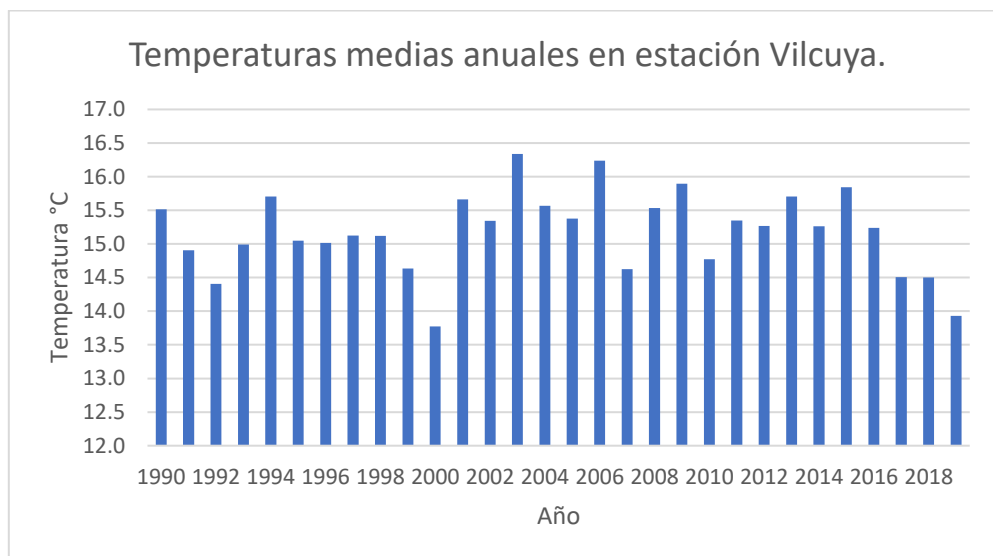


Figura 8: Temperaturas medias anuales entre los años 1990 al 2019 de la estación Vilcuya, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

Los meses con mayor temperatura son enero y febrero alcanzando un promedio de 21°C, mientras que con los con menor temperatura son junio y julio con 11°C y 10°C respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2: Temperatura media mensual entre los años 1990 al 2019 de la estación Vilcuya, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

MES / °C	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
TEMPERATURA MEDIA	15.3	12.5	10.5	9.6	11	12.3	14.6	17.3	19.6	21.2	20.7	19

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente se debe considerar la evaporación presente en el área de estudio, para contabilizar las pérdidas de agua que pueden estar asociadas a las

temperaturas encontradas en el sector. Según las isólineas de evaporación calculadas a través del método tanque U.S.W.B clase A registrado en la mapoteca de la DGA, la evaporación generada en el área de estudio es de 2000 mm/año (Figura 9).

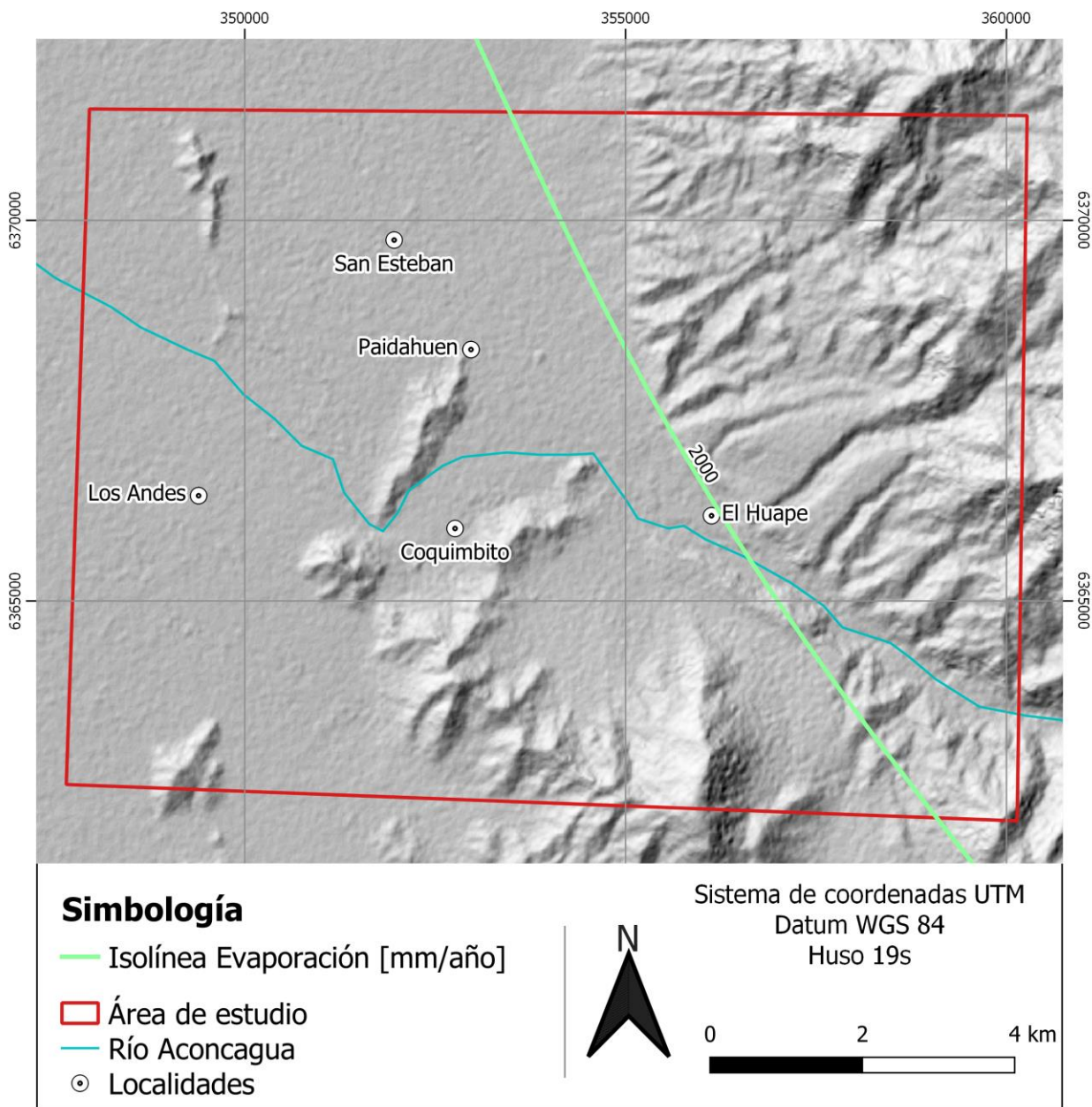


Figura 9: *Isolínea de evaporación [mm/año] en el área de estudio, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).*

2.2.1.2 Precipitaciones.

Las precipitaciones en la cuenca del Aconcagua son de carácter nival en la zona cordillerana, mientras que en la depresión central y la costa son principalmente pluvial (DGA, 2004b).

Se recopilaron los antecedentes disponibles de la estación meteorológica río Aconcagua en Chacabuquito, la cual presenta información de precipitaciones para los últimos 20 años (1999-2019).

El promedio de las precipitaciones registrado en esta estación es de 253 mm/año, apreciándose una variación interanual importante, ya que el valor mínimo de caída de agua es de 23.6 mm correspondiente al año 2019 y un máximo de 478.7 mm correspondiente al año 2002. Por otro lado, se puede ver que en los años del 2007 al 2019 se ha visto una disminución de las precipitaciones anuales, a excepción del periodo del 2015 al 2017, observándose una tendencia general a la disminución de las precipitaciones durante los últimos 20 años. (Figura 10).

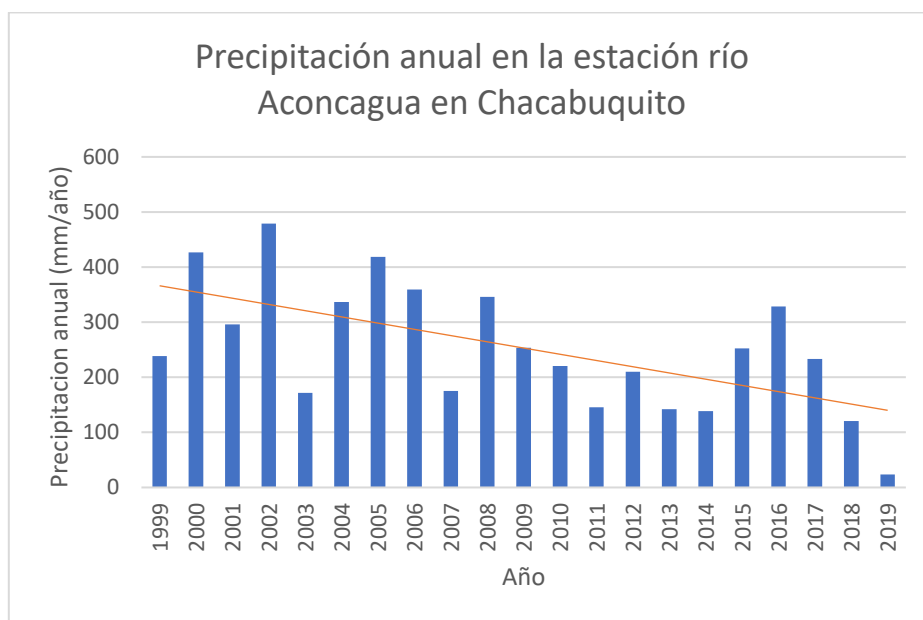


Figura 10: Precipitación anual entre los años 1999 al 2019 en la estación río Aconcagua en Chacabuquito, la línea roja representa la línea de tendencia de estos valores, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

Específicamente en el año 2019 solo hubieron 23, 6 mm de precipitaciones medidas en la estación Chacabuquito, siendo el mes de mayo y julio los meses con mayores precipitaciones de 8.3 y 9.1 mm respectivamente (Figura 11).

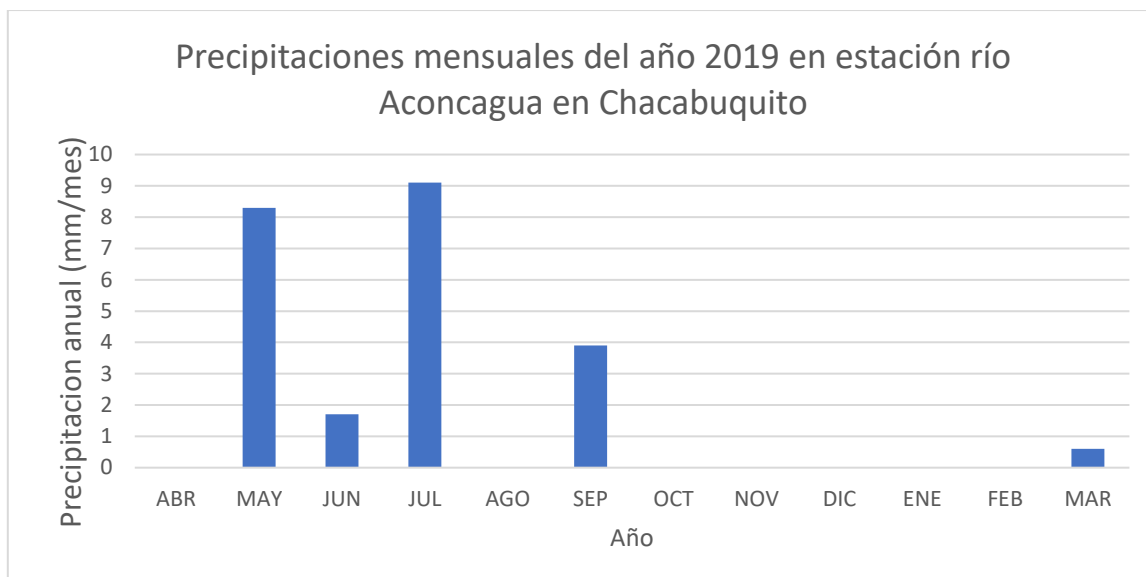


Figura 11: Precipitaciones mensuales del año 2019 en la estación río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

Al realizar un análisis de las precipitaciones en términos estacionales, se puede apreciar que, en promedio, los meses con mayores precipitaciones corresponden a los meses de junio a agosto, mientras que las más bajas concentraciones de precipitaciones se asocian a los meses de noviembre a enero (Tabla 3).

Tabla 3: Precipitaciones medias mensuales en la estación río Aconcagua en Chacabuquito entre los años 1999 al 2019, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

MES / mm/mes	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
PRECIPITACIÓN MEDIA	11.4	35.4	63.7	47.7	44.9	24.2	15.5	6.8	3.8	2.1	0.8	5

2.2.1.3 Humedad relativa.

La humedad real anual en de la zona de estudio está entre 55% y 65%, mientras que en invierno oscila entre 60% en su sector oriental y 80% en el occidental, la cual disminuye hacia la zona cordillerana (Infraeco,2011). Sin embargo, la primera sección del río Aconcagua se caracteriza por presentar valores absolutos relativamente altos. La humedad esta ocasionada principalmente por el relieve y la distancia con el océano.

2.2.2 Fluviometría.

Para poder cuantificar el caudal en el río Aconcagua en el sector del área de estudio, se analiza la información de estación fluviométrica río Aconcagua en Chacabuquito la cual se encuentra aguas arriba del área a 950 msnm a uno 8 km arriba de la ciudad de Los Andes, durante el periodo de los últimos 30 años. Se escoge esta estación producto a que es la primera estación aguas arriba del sector a estudiar, por otro lado, esta es importante, debido a la representatividad del caudal del río a la entrada del valle.

Al analizar los caudales mensuales en m^3/s para las distintas probabilidades de excedencia (PE), se puede observar que los mayores caudales se presentan en los meses de noviembre a febrero, producto de los deshielos producidos en la cordillera en esta época, correspondiendo a un marcado régimen nival. Por otro lado, el periodo con menores caudales en el río es en los meses de abril a agosto (Tabla 4: Figura 12).

Tabla 4: Probabilidad de excedencia de los caudales (m^3/s) del río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

PE	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5%	23.77	31.03	32.10	27.77	29.54	37.65	54.65	110.61	148.985	139.82	75.55	37.37
10%	19.93	17.26	25.60	25.54	28.84	33.91	51.08	98.41	132.56	126.71	63.65	32.76
20%	16.92	15.55	21.74	19.46	21.64	25.63	42.71	73.39	106.63	75.12	38.84	26.18
50%	13.24	10.82	10.54	11.74	11.48	17.14	26.12	46.78	53.72	40.97	26.38	18.80
85%	8.69	6.57	6.91	6.46	6.49	8.87	13.64	21.75	23.485	23.69	19.68	13.17
95%	7.98	5.85	5.09	5.58	5.29	6.09	7.67	12.94	15.275	18.48	15.76	12.25

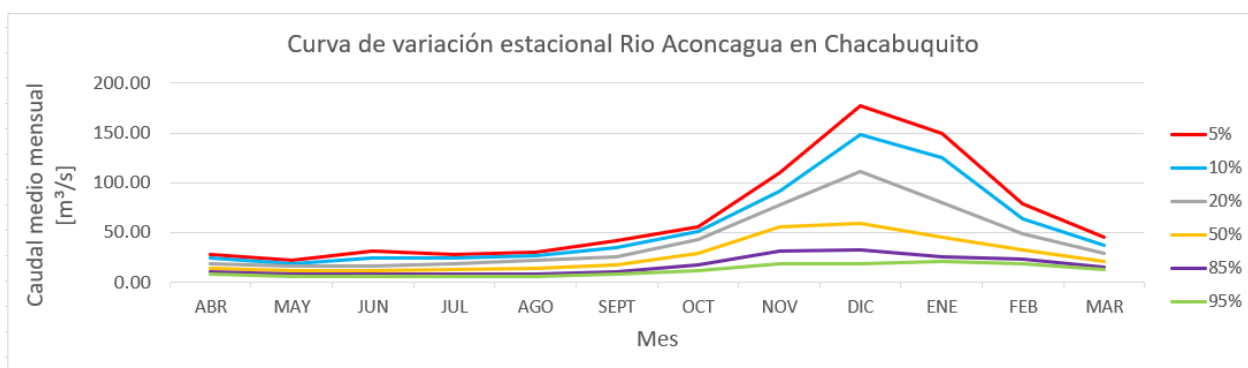


Figura 12: Curva de variación estacional río Aconcagua en Chacabuquito.

Además del análisis de las mediciones fluviométrica de esta estación, a partir de los datos se obtuvo un caudal medio anual de $28.12 m^3/s$. Un análisis estacional muestra que el mes con mayor caudal promedio corresponde al mes de diciembre con $64.34 m^3/s$, mientras que el mes

con menor caudal promedio corresponde a mayo con 12.17 m³/s (Tabla 5), lo que sigue corroborando que en este sector este río tiene un régimen principalmente nival.

Tabla 5: Promedio, mínimo y máximo del caudal medio mensual (m³/s) de la estación del río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

MES/ m ³ /s	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Promedio	13.59	12.17	13.51	13.27	14.16	18.38	28.16	51.18	64.34	51.47	32.30	20.45
Mínimo	7.85	5.70	4.85	5.55	5.08	5.51	6.09	12.11	14.50	17.25	15.36	12.05
Máximo	26.05	43.25	32.21	28.15	30.12	37.97	55.88	111.40	162.80	145.96	76.42	39.59

En relación a los caudales medios de los dos últimos años (2018 y 2019), se puede apreciar una importante disminución sobre todo en el periodo entre noviembre y enero, produciéndose un déficit del 75% en el mes de diciembre en comparación al promedio histórico. Además, realizando una comparación entre el 2018 y el 2019, también se aprecia una disminución en los meses de septiembre a diciembre en el año 2019 con respecto al 2018 (Figura 13).

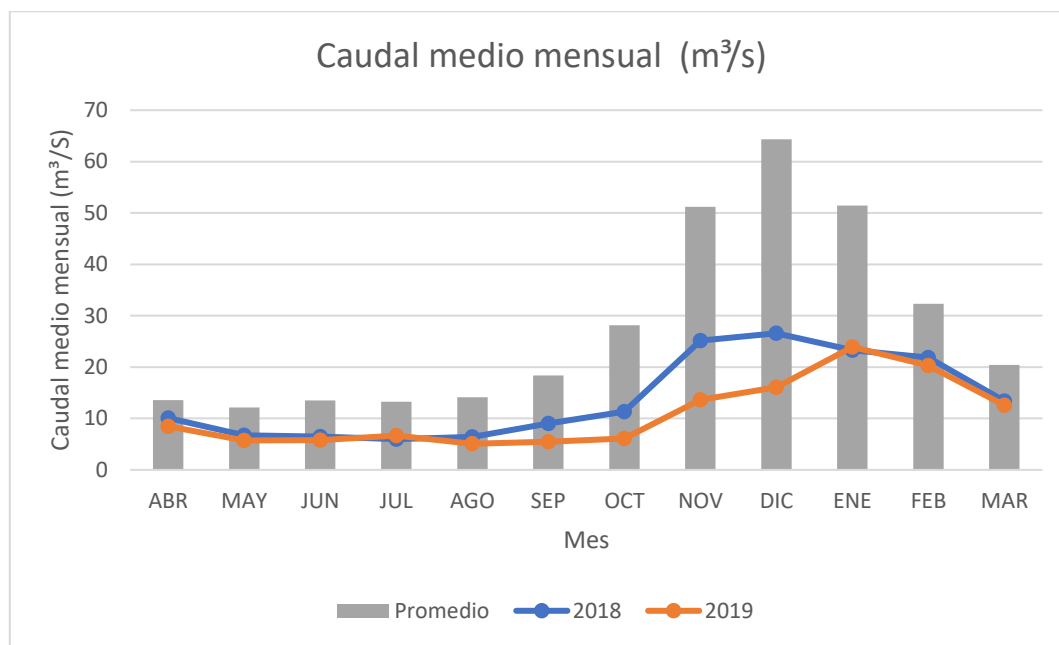


Figura 13: Gráfico de comparación del caudal medio mensual de los años 2018 y 2019 con respecto al promedio histórico del río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

La disminución del caudal del río Aconcagua es ocasionado por la disminución de las precipitaciones que se vio anteriormente, el aumento de la temperatura y la disminución de la isoterma 0°, la cual estaría afectando las reservas de agua de la cordillera.

2.2.3 Uso de agua.

En el área de estudio se registran 137 derechos de aprovechamiento de agua en la DGA, estos corresponden a 8 no consuntivos y 129 derechos consuntivos, estos últimos corresponden a los derechos que una vez que el agua sea usada, no se devuelve al medio donde se ha captado (Figura 14).

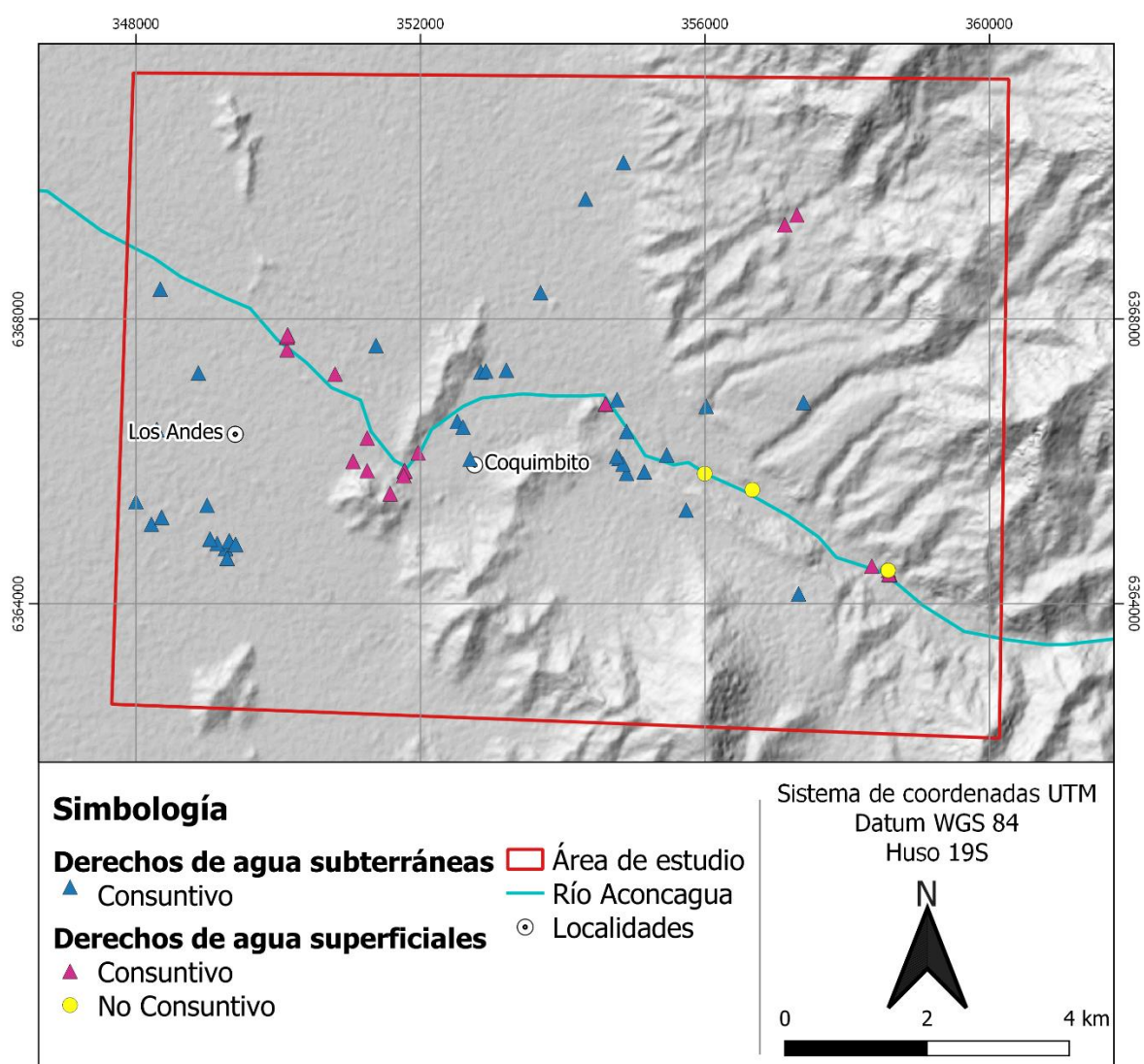


Figura 14: Ubicación de los derechos de aprovechamiento según su tipo y naturaleza, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).

Por otro lado, estos derechos se pueden categorizar según su naturaleza en derechos superficiales (82) y subterráneos (55), estos tienen diferentes usos asociados entre ellos se pueden encontrar, el uso de riego, hidroeléctrica, industrial, entre otros usos. Además, existen derechos donde no se estipula el uso que tienen, por lo que se consideran sin información (Figura 15).

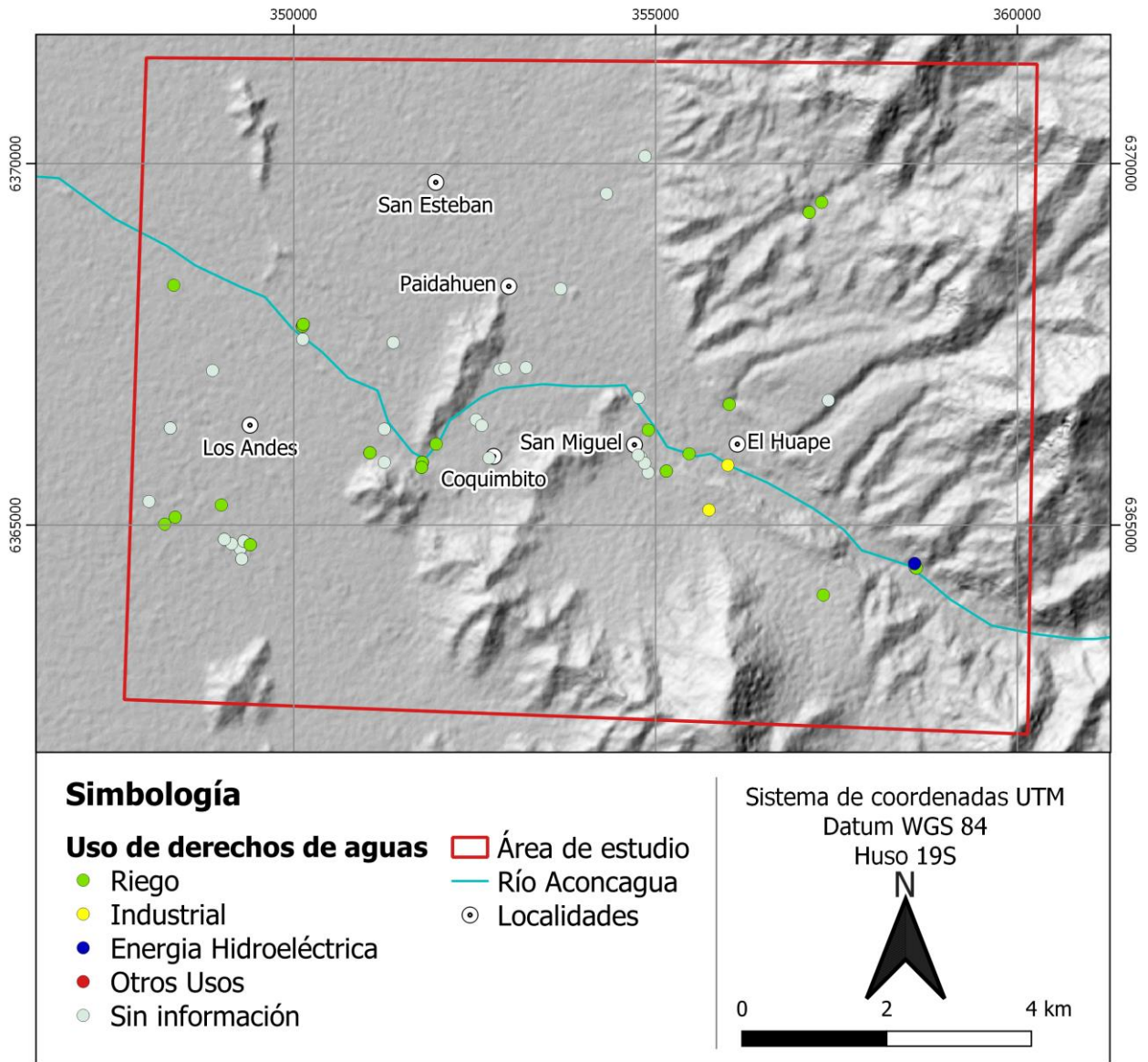


Figura 15. Usos de derechos de agua según su naturaleza, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).

Cabe mencionar, que solo se analizaran los derechos de agua registrados en la DGA, quedando en duda el uso de los pozos que no están inscritos y funcionan de manera informal en el sector.

Se observa que, de los derechos consuntivos, 55 se encuentran clasificados de naturaleza subterránea, la mayoría corresponde a uso del riego (16), y solo 1 al uso industrial, es importante mencionar que una importante cantidad de derechos se encuentran sin categorizar su uso (38). Además, tenemos que los de naturaleza superficial se dividen en dos, superficial y superficial de corriente, para realizar este análisis se juntaron dando un total de 74 derechos con esta naturaleza, de los cuales 35 tienen uso de riego y 39 de estos derechos se encuentran sin información sobre el uso (Figura 16).

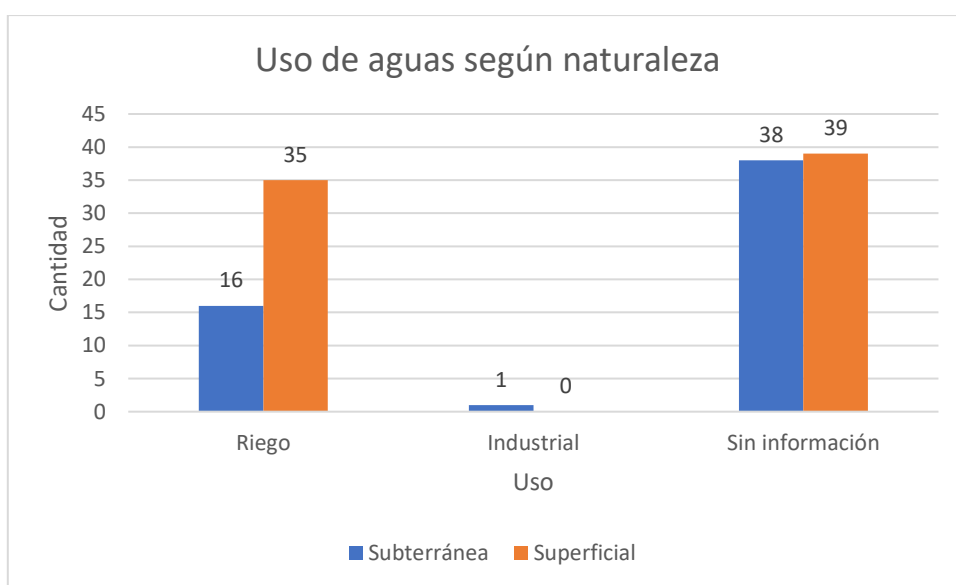


Figura 16: Gráfico de derechos consuntivos según uso y naturaleza, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).

Por otro lado, los 8 derechos no consuntivos corresponden a derechos de naturaleza superficial, los cuales corresponden a 3 de uso hidroeléctrico, 1 industrial, 3 correspondientes a otros usos y 1 se encuentra sin información sobre el uso.

Los datos muestran que el principal uso de los derechos de agua es de riego en el sector. El uso de las aguas para riego puede distinguirse en dos tipos: irrestricto y restringido. El primero hace referencia a que el uso es regular en cada una de las etapas de desarrollo de los cultivos; en cambio, el restringido, la aplicación se debe controlar, debido a que no son adecuadas para utilizarlas en todas las etapas de los cultivos. Sin embargo, no se separan estas clasificaciones, ya que no hay antecedentes para hacerlo (DGA, 2004b).

Esto nos da un indicio de la posibilidad de tener disponibilidad de agua que no sea utilizadas en ciertos periodos de regadío para poder almacenarla y/o recargarla cuando se necesite.

3. Resultados.

3.1 Disponibilidad hídrica para recarga.

La disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas producto del cambio climático afectan las reservas de agua que se encuentra el sector (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015), por lo que se debe contabilizar la disponibilidad actual y futura para la recarga artificial (Figura 17).

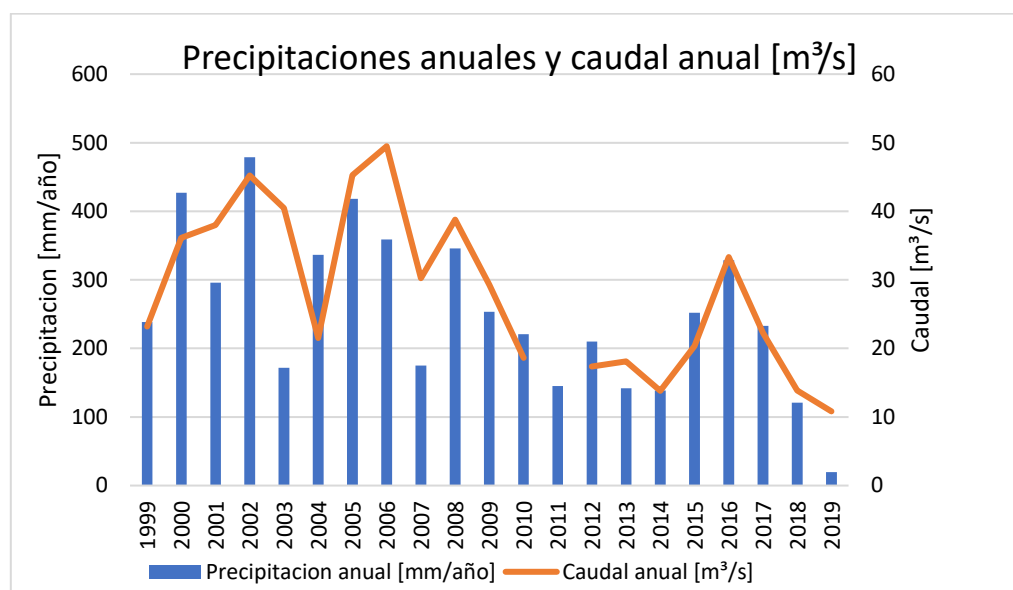


Figura 17: Gráfico de comparación entre precipitaciones y caudal anuales en el río Aconcagua en Chacabuquito, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a y 2020c).

Considerando que la principal fuente que se tiene para realizar la recarga artificial corresponde al agua del río Aconcagua, y que su principal aporte corresponde a los deshielos que ocurren en época de primavera-verano, se debe contabilizar el agua disponible para estimar la recarga. Para esto, es importante considerar la mantención tanto del caudal ecológico hacia aguas abajo como del caudal correspondiente a las extracciones de los derechos de agua superficial consuntivos agua abajo desde el punto donde se realizará la recarga artificial. Se tomará en cuenta como caudal del río en el sector de la recarga, el caudal de la estación río Aconcagua en Chacabuquito, por ser la estación con información disponible.

Teniendo en consideración lo estipulado, el caudal disponible para infiltrar (Q_d) se calculará a partir del caudal del río en la estación río Aconcagua en Chacabuquito (Q_r), menos los derechos

superficiales que se encuentran entre esa estación y la desembocadura del río (Q_{ds}) y el caudal ecológico (Q_{eco}):

$$Q_d = Q_r - (Q_{ds} + Q_{eco}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

3.1.1 Caudal ecológico.

El caudal ecológico se ha definido como el agua mínima necesaria para preservar los valores ecológicos en el cauce de ríos u otros cauces de aguas superficiales. de tal manera que los efectos abióticos (profundidad, velocidad de la corriente, turbulencia, calidad del agua, ancho mojado, etc.), producidos por la disminución de caudal no alteren significativamente la dinámica del ecosistema, permitiendo mantener el objetivo ambiental según el estado de referencia que se aplique (Boettiger, 2013) y para estimar este, la DGA ha considerado que se debe calcular determinando un porcentaje del caudal del río utilizando para ello, considerando un mínimo de 25 años hidrológicos con una estadística a nivel medio mensual. En este caso se consideraron 30 años para hacerlo más representativo a la situación actual, ya que, como se ha visto anteriormente, en el sector ha habido una disminución del caudal del río de hasta un 70%.

En el informe DGA (2004b) se estipula que para calcular el caudal ecológico mínimo de cada mes del año en la cuenca del río Aconcagua se debe utilizar el criterio establecido en la letra a) del artículo 3° del título II del Decreto N°14/2012 sustituido (DGA, 2008) que señala:

- a) Cauce con derechos constituidos con caudal ecológico mínimo del 10% Caudal medio anual (Q_{ma}).

Se considerarán los caudales asociados a 50% del caudal con probabilidad de excedencia (PE) del 95% (50% del $Q_{95\%PE}$), para cada mes, con las restricciones siguientes:

- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del $Q_{95\%PE}$ es menor al caudal determinado para el 10% Q_{ma} , entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 10% Q_{ma} .
- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del $Q_{95\%PE}$ es mayor al caudal determinado para el 10% Q_{ma} y menor que el caudal determinado para el 20% Q_{ma} , entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 50% del $Q_{95\%PE}$.

- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es mayor al caudal determinado para el 20%Qma, entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 20% Qma.

Se realizaron cálculos con un caudal medio anual de 28.12 m³/s, por lo que el 10% Qma es del 2.81 m³/s y el 20%Qma es del 5.62 m³/s. Los resultados de estos cálculos muestran que el caudal ecológico estimado para el meses de abril, mayo, septiembre y octubre es del 50% Q 95% PE, mientras que el caudal ecológico más bajo corresponde a los meses de junio a agosto con valores de 2.81 m³/s, Por último, para los meses de noviembre a febrero se presenta el mayor caudal ecológico estimado en 5.14 m³/s, esto es debido a que en estas épocas el caudal promedio en el río es mayor que en los meses invernales producto al régimen de este río (Tabla 6; Figura 18).

Tabla 6: Caudal ecológico mínimo para el río Aconcagua en Chacabuquito.

(m ³ /s)	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
50% Q95% PE	3.99	2.93	2.55	2.79	2.65	3.04	3.83	6.47	7.64	9.24	7.88	6.13
20% Qma	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62
10% Qma	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81
min 50% Q95% PE	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55
Qeco (a)	3.99	2.93	2.81	2.81	2.81	3.04	3.83	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62

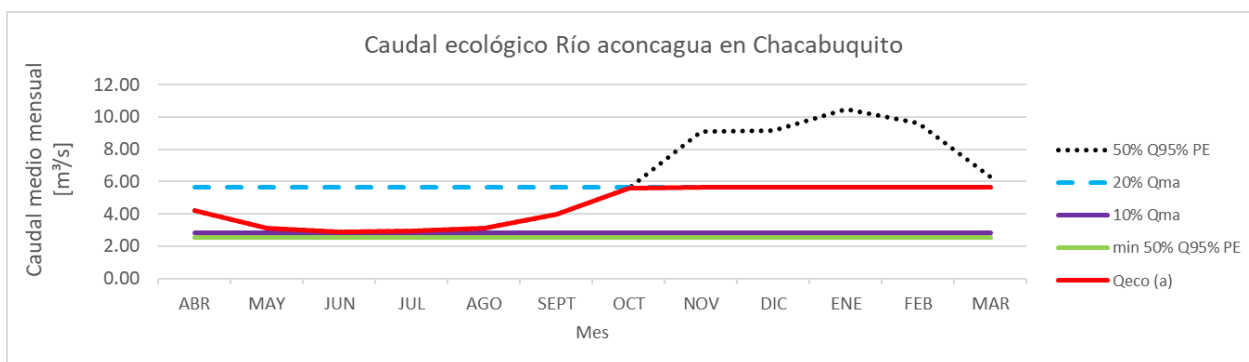


Figura 18: Gráfica con el caudal ecológico en el río Aconcagua en Chacabuquito.

3.1.2 Derechos de agua superficial registrados.

Se contabilizan los 216 derechos de aprovechamiento superficiales consuntivos registrados en la DGA entre la estación fluviométrica río Aconcagua en Chacabuquito y la desembocadura del río Aconcagua. De la suma de los caudales concedidos mensuales, se nota que el mes con mayor caudal de extracción corresponde al mes de noviembre con 45.34 m³/s de caudal total, mientras

que el mes con menor caudal de extracción corresponde al mes de abril con 29.96 m³/s (Tabla 7).

Tabla 7: Caudal por mes de los derechos superficiales desde la estación río Aconcagua en Chacabuquito hasta la desembocadura, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).

Caudal m ³ /s											
ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
29.96	35.74	35.73	35.73	35.73	35.74	44.31	45.34	41.79	37.39	37.49	35.28

Según los caudales concedidos de los derechos de aprovechamiento por cada mes desde la estación fluviométrica hasta la desembocadura, en las épocas de primavera/verano, exactamente los meses de octubre a diciembre, es cuando se usa un mayor caudal de los derechos de aprovechamiento superficiales, mientras que en los meses de mayo a septiembre existe una estabilización de estos cercanos a los 35.7 m³/s (Figura 19).

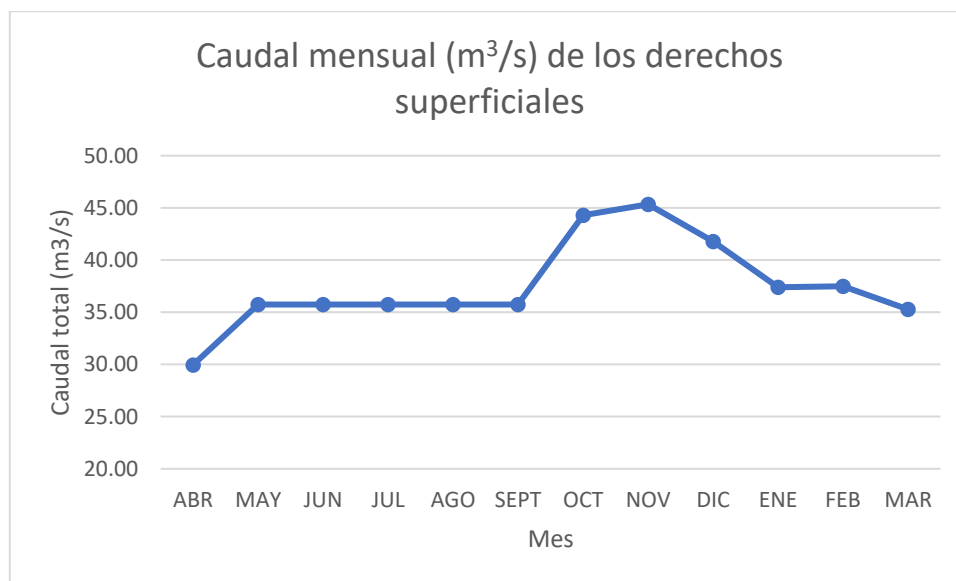


Figura 19: Gráfico del caudal mensual de los derechos superficiales, construido a partir de datos publicados por DGA (2020c).

3.1.3 Disponibilidad.

Considerando los resultados del caudal ecológico, el caudal de los derechos de agua superficial y el caudal de la estación base de río Aconcagua en Chacabuquito se puede establecer la disponibilidad histórica que existe en el área de estudio. Según el análisis realizado con respecto

al promedio mensual de los caudales, los meses de noviembre, diciembre y enero presentan caudal disponible para realizar la recarga (Tabla 8).

Tabla 8: Disponibilidad hídrica mensual.

Mes/ m ³ /s	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Caudal base promedio	13.59	12.17	13.51	13.27	14.16	18.38	28.16	51.18	64.34	51.47	32.30	20.45
Caudal ecologico	3.99	2.93	2.81	2.81	2.81	3.04	3.83	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62
Caudal derechos superficiales	29.96	35.74	35.73	35.73	35.73	35.74	44.31	45.34	41.79	37.39	37.49	35.28
Caudal disponible	-20.36	-26.50	-25.04	-25.27	-24.39	-20.41	-19.99	0.22	16.93	8.47	-10.82	-20.45

Durante el resto de los meses del año, existe un déficit en el caudal del río para cumplir con las extracciones aguas abajo y considerar el caudal ecológico mínimo necesario en el sector.

Los caudales disponibles son interesantes, ya que si se considera solo una fracción del caudal disponible de diciembre (1 m³/s), este sería suficiente para llenar una piscina de infiltración de tamaño 50 m x 50 m y 1 m de profundidad (2500 m³ de agua) en 2500 segundos, lo que correspondería un llenado total de la piscina en 41,7 minutos. El tiempo que se demoraría en infiltrarse y alcanzar el acuífero se determina en capítulos posteriores.

Sin embargo, para tener una mejor estimación de la recarga, se calcula la disponibilidad actual con los caudales medios diarios desde el año 2015 al 2019 del río Aconcagua en Chacabucuito. Donde se logra distinguir una importante disminución de los caudales del río con los años, lo que genera un déficit en la disponibilidad presente para los últimos años (2018 y 2019), Por ejemplo, en noviembre del 2015, hubo 8 días con caudal disponible, mientras que para el mes de diciembre existió disponibilidad durante todo el mes. Con relación a lo sucedido en el año 2016, existió disponibilidad para los tres meses (noviembre, diciembre y enero) con 17, 31 y 27 días de disponibilidad respectivamente. Mientras que para el año 2017, se aprecia que el mes con más caudal disponible correspondió al de enero (30 días) (Anexo I).

Por otro lado, es importante tener conocimiento que este cálculo se basa en los caudales otorgados por la DGA, los cuales no necesariamente son los que se utilizan en las épocas de invierno, debido a que, en la agricultura en épocas de invierno, el uso y extracción de agua es menor en comparación a las épocas de riego, las cuales suelen ser de agosto a marzo.

Para terminar, es importante destacar que la DGA-MOP ha debido intervenir para regular el recurso hídrico, firmando el protocolo de acuerdo de redistribución de aguas, el cual consiste en repartir el agua para los regantes de todas las secciones considerando a situación de sequía que vive el sector y la cuenca del río Aconcagua cerrando compuertas todos los meses en turnos de 24 y 36 horas entre los sábados y domingos de acuerdo con el caudal presente en la estación Chacabuquito (DGA, 2018).

3.2 Caracterización hidrogeológica.

En esta sección se mencionan y analizan las características hidrogeológicas del sector, permitiendo conocer las unidades hidrogeológicas presentes en el lugar, la geometría del acuífero, el movimiento del flujo subterráneo, las propiedades hidráulicas y las características fisicoquímicas.

3.2.1 Caracterización piezométrica.

Al momento de realizar una recarga artificial es fundamental conocer en detalle la profundidad del nivel del agua en el acuífero producto de que es clave para conocer y estimar la capacidad de almacenamiento, conocer la dirección del flujo, el gradiente hidráulico y evaluar los cambios estacionales esperables en una determinada zona (DGA, 2014). Bajo este contexto, los datos piezométricos son indispensables en un proyecto de estas condiciones, por lo cual es importante conocer la información histórica y la actual de la profundidad de niveles de agua que se encuentran en el área de estudio.

3.2.1.1 Profundidad del nivel de agua.

Según la información recopilada de los expedientes de los derechos de agua otorgados por la DGA, se logró identificar 20 pozos que tenían información de profundidad de nivel del agua (Figura 20).

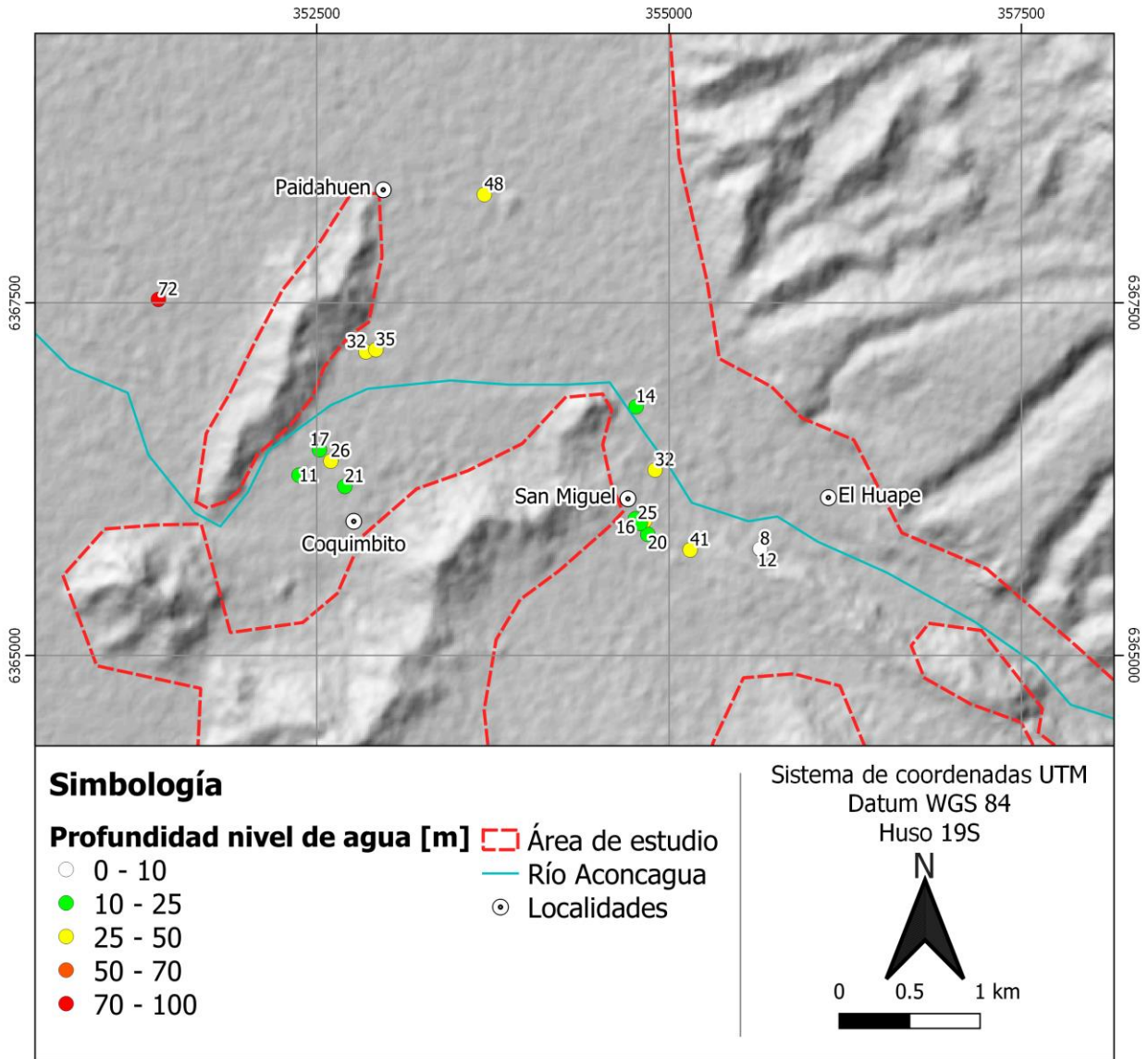


Figura 20: Ubicación y valor de la profundidad del nivel del agua presente en el área de estudio, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.

Al sur del río Aconcagua, en la localidad de Coquimbito, se encuentran pozos con profundidades de 50 – 60 m, los cuales tienen una profundidad de nivel de agua que varían desde los 10 a 26 m, mientras que al norte del río Aconcagua (sur de Paidahuen) los niveles del agua se encuentran alrededor de los 30 – 35 m de profundidad, estos últimos están medidos en pozos que tienen 100 m de profundidad.

Con respecto a la época de las mediciones de las profundidades del nivel del agua descritas anteriormente, los valores que se encuentran en la localidad de Coquimbito pertenecen a años

situados entre 1995 a 1998, mientras que las situadas al sur de Paidahuen pertenecen a los años 1968 y 1970. Es por esto que existe la posibilidad de que estos valores no correspondan a la situación actual de la profundidad del nivel del agua de los sectores descritos, dado al aumento de las extracciones y a la disminución de la recarga natural del acuífero.

En relación a la zona de San Miguel, los niveles de los pozos de agua se encuentran entre los 13 y 40 m de profundidad según la información recopilada de los expedientes, este último pozo es el que tiene mayor profundidad (100 m), mientras que los demás pozos, que tienen menor a 30 m de profundidad del nivel de agua presentes en la zona tienen una profundidad menor a 80 m. Al igual que los pozos anteriores, las mediciones que se encuentran al sur este de San Miguel fueron tomadas desde los años 1989 al 1999, siendo los valores que se encuentran bajo los 20 m los tomados con mayor antigüedad.

El pozo que se encuentra con una profundidad del nivel de 32 m, situado al norte de San Miguel corresponde a la medición más actual del sector, medida en el año 2013. Sin embargo, este derecho se encuentra en estado denegado, por lo que no se le permite la extracción del recurso hídrico.

Es por lo mencionado anteriormente que hay que tener en consideración que estos datos son históricos, es decir, corresponden a información recopilada de los expedientes comprendidos desde el año 1968 al 2013 (Tabla 9). Si bien los datos son de una época puntual en el tiempo, estos parámetros representan los datos históricos que se encuentran en la zona de estudio y nos da indicios de cómo han evolucionado a través del tiempo los niveles en el sector.

Tabla 9: Registro histórico de la profundidad de nivel de agua (m) en el área de estudio, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.

Codigo	Número	Estado	Caudal Concedido [lt/s]	Y	X	Huso	Datum	Profundidad pozo [m]	Profundidad nivel del agua [m]	Fecha
ND-0502-494	1	Aprobada	25	6367475	353050	19	1956	101	31,5	01-07-1968
ND-0502-494	2	Aprobada	45	6367490	353120	19	1956	100	34,7	01-09-1970
ND-0502-1125	1	Aprobada	50	6366290	354960	19	1956	80	16,28	09-03-1989
ND-0502-1125	2	Aprobada	45	6366180	355050	19	1956	80	19,53	09-03-1989
ND-0502-1408	1	Aprobada	16	6366600	352575	19	1956	53	10,7	18-01-1995
ND-0502-2591	1	Aprobada	7,2	6366700	352800	19	1956	66	26,42	08-06-1995
ND-0502-1695	1	Aprobada	13	6366520	352900	19	1956	60	20,5	09-03-1996
ND-0502-2445	1	Aprobada	94	6366278	355028	19	1956	73	32,41	22-07-1997
ND-0502-2592	1	Aprobada	25	6366780	352720	19	1956		17,25	20-08-1998
ND-0502-2978	1	Aprobada	80	6366070	355350	19	1956	101	40,6	11-09-1998
ND-0502-3178	1	Aprobada	9	6367846	351577	19	1956	100	72,2	21-12-1998
ND-0502-3271	1	Aprobada	55	6368590	353890	19	1956	120	47,9	26-01-1999
ND-0502-3244	1	Aprobada	31,5	6366259	354996	19	1956	71	24,5	25-11-1999
ND-0502-3820	1	Aprobada	50	6365174	357352	19	1956	125	14,31	10-02-2000
ND-0502-3820	2	Aprobada	56	6367048	357590	19	1956	290	93,87	15-02-2000
ND-0502-4492	1	Aprobada	12,5	6366764	354765	19	1984	50	13,5	14-03-2002
ND-0502-4503	1	Denegada		6366078	355847	19	1956	37,5	8,25	02-08-2006
VF-0502-1	1	Denegada		6366315	354900	19	1984	80	31,78	26-01-2013
NR-0502-1429	1	Informada con Sentencia		6366078	355847	19	1956	32	8	27-02-2013

Dado que esta información tiene antecedentes hasta el año 2013, se realizó una campaña de terreno el 16 de septiembre del 2020 al área de estudio para medir la profundidad del nivel del agua y el nivel estático (NE) del acuífero en el sector. Los registros se realizaron procurando que el pozo no estuviera bombeando para poder medir el nivel estático y no el dinámico.

En esta visita a terreno se visitaron alrededor de veinte pozos distribuidos en toda el área de estudio, y se logró medir la profundidad del nivel de agua solo en seis de estos, los cuales corresponden a dos pozos de Agua potable rural (APR) El Sauce, dos pozos del APR El Huape-San Miguel uno pozo de la Fábrica Bianchini y uno pozo a las Termas El Corazón situadas al noroeste de San Esteban (Figura 21).

El pozo uno del APR El Sauce tiene un nivel de agua de 59 m de profundidad, mientras que el pozo dos del mismo APR situado a 140 m al este tiene una profundidad de 30 m. Es importante mencionar que el pozo uno se encontraba en constante bombeo y presentaba un sistema de telemetría, el cual proporciona los niveles estáticos y dinámicos diariamente. Sin embargo, para la visita se detuvo la bomba por 25 minutos para medir el nivel estático, indicando el valor antes mencionado (59 m), es importante dejar en claro que, si bien este lapsus de tiempo en el que se detuvo la bomba no proporciona medir el nivel estático, se considera este valor puesto que, en el periodo estipulado, la mayor recuperación del pozo ya se había obtenido. Con respecto al segundo pozo, este se encontraba fuera de funcionamiento al momento de la visita, por lo que la

medición de la profundidad del nivel del agua es más fiable. dado que el pozo uno tiene un régimen de bombeo desconocido, lo que podría estar relacionado a un nivel dinámico.

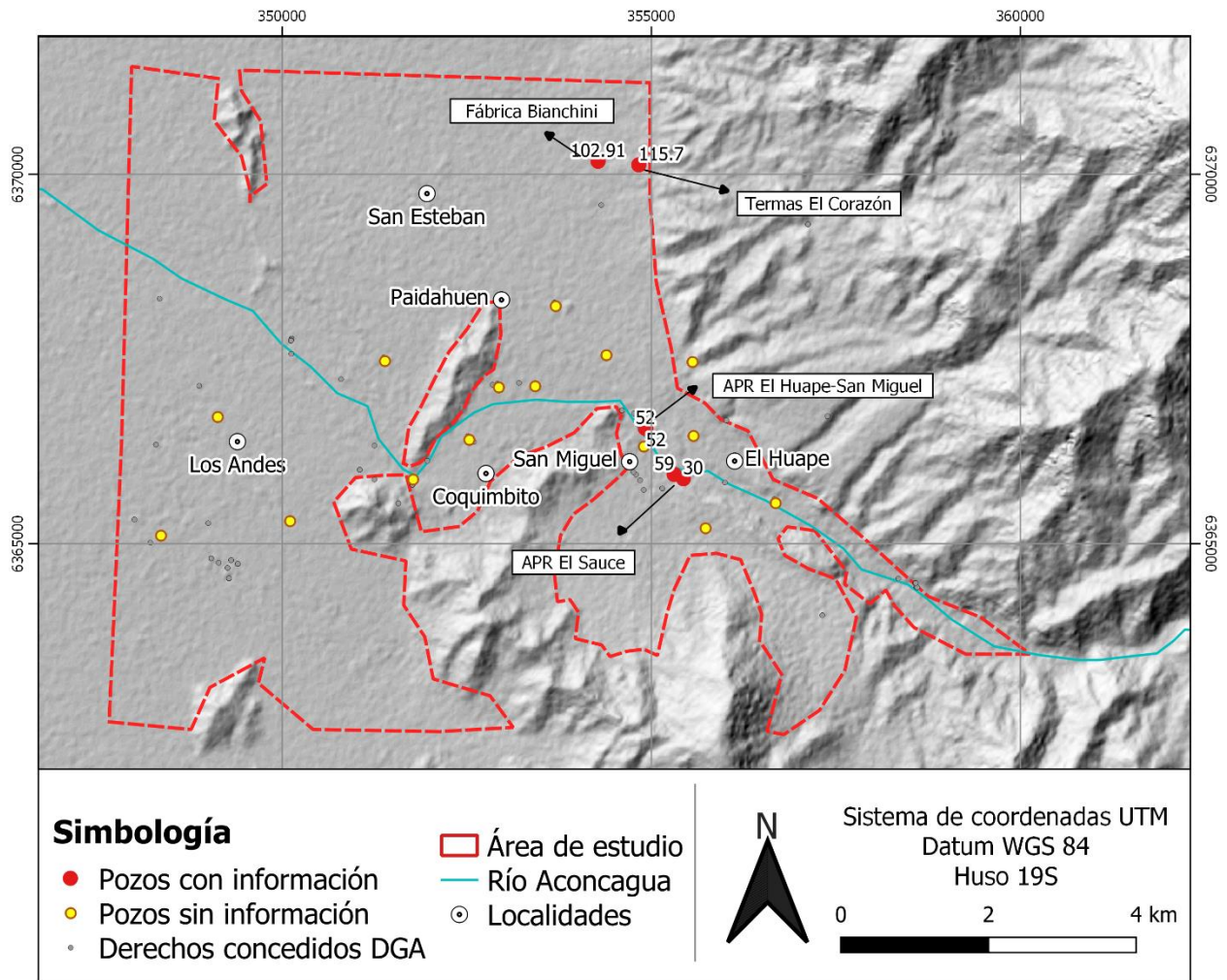


Figura 21: Ubicación y profundidad de los niveles de agua de los pozos visitados en terreno del área de estudio y derechos concedidos por la DGA.

El nivel del agua de los pozos en el APR San Miguel- El Huape se encuentra a 52 m, encontrándose ambos pozos sin bombear al momento de realizar la medición. Al este de San Esteban se encuentran dos pozos, los cuales tienen niveles de agua con profundidad mayor a 100 m (102.91 y 115.7 m), los cuales se detectan sin funcionamiento en el momento de la medición.

Cabe mencionar que otros pozos cercanos a los pozos medidos en terreno de los APR podrían estar afectando los niveles medidos en terreno, dado que, al momento de medir, estos pozos

cercanos pudieran estar bombeando, generando un descenso de los niveles producto al cono de depresión que se produce al momento de bombear.

3.2.1.2 Caracterización espacial.

Considerando que los datos recopilados en terreno se concentran al este del área de estudio y que al oeste existe un déficit de información actual se comparan estos con los niveles encontrados en los expedientes. De esta comparación se llega a la conclusión que los niveles actuales se encuentran disminuidos en 20 m aproximadamente, por lo que para realizar las isopiezas lo más semejante a la situación actual se combina la información de los niveles medidos en terreno y los niveles encontrados en expedientes restándoles los descensos producidos en la zona para de esta forma extrapolar esta información en las áreas con información faltante de los niveles actuales.

De este modo se construyen las isopiezas tomando en cuenta la información previa a terreno y la disminución de los niveles en la actualidad, permitiendo determinar la dirección de flujo y la relación río-acuífero.

En el área de estudio el agua subterránea fluye de manera paralela al río Aconcagua desde su proveniencia desde la cordillera en dirección al noroeste. Debido al gradiente hidráulico presente, la interacción entre el río-acuífero a lo largo del río Aconcagua es de manera influente, es decir, hay aportes del río al acuífero (Figura 22).

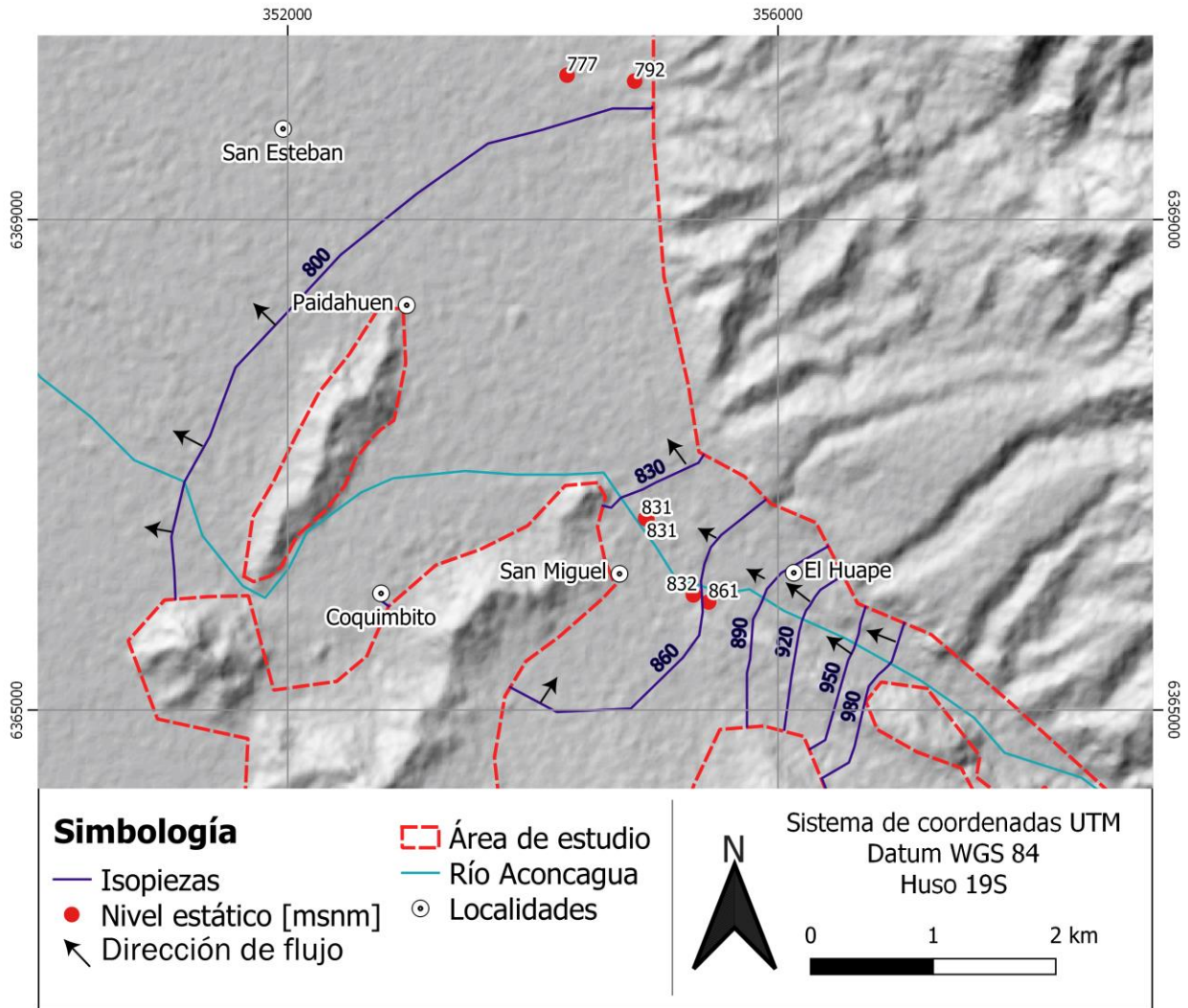


Figura 22: Piezometría correspondiente al área de estudio con isopiezas cada 30 m.

3.2.1.3 Evolución temporal de los niveles.

Para realizar la evolución temporal de los niveles en el sector, se han analizado los antecedentes de los últimos años, 2017 al 2020, los APR El Huape-San Miguel y El Sauce, los cuales se encuentran al lado norte y sur del río Aconcagua, respectivamente (Figura 23).

Cada APR tiene dos pozos en su administración, el primero uno de 80 m y otro de 100 m de profundidad, mientras que el segundo tiene uno de 90 m y otro de 60 m. Este último no se encuentra operativo desde el año 2015.

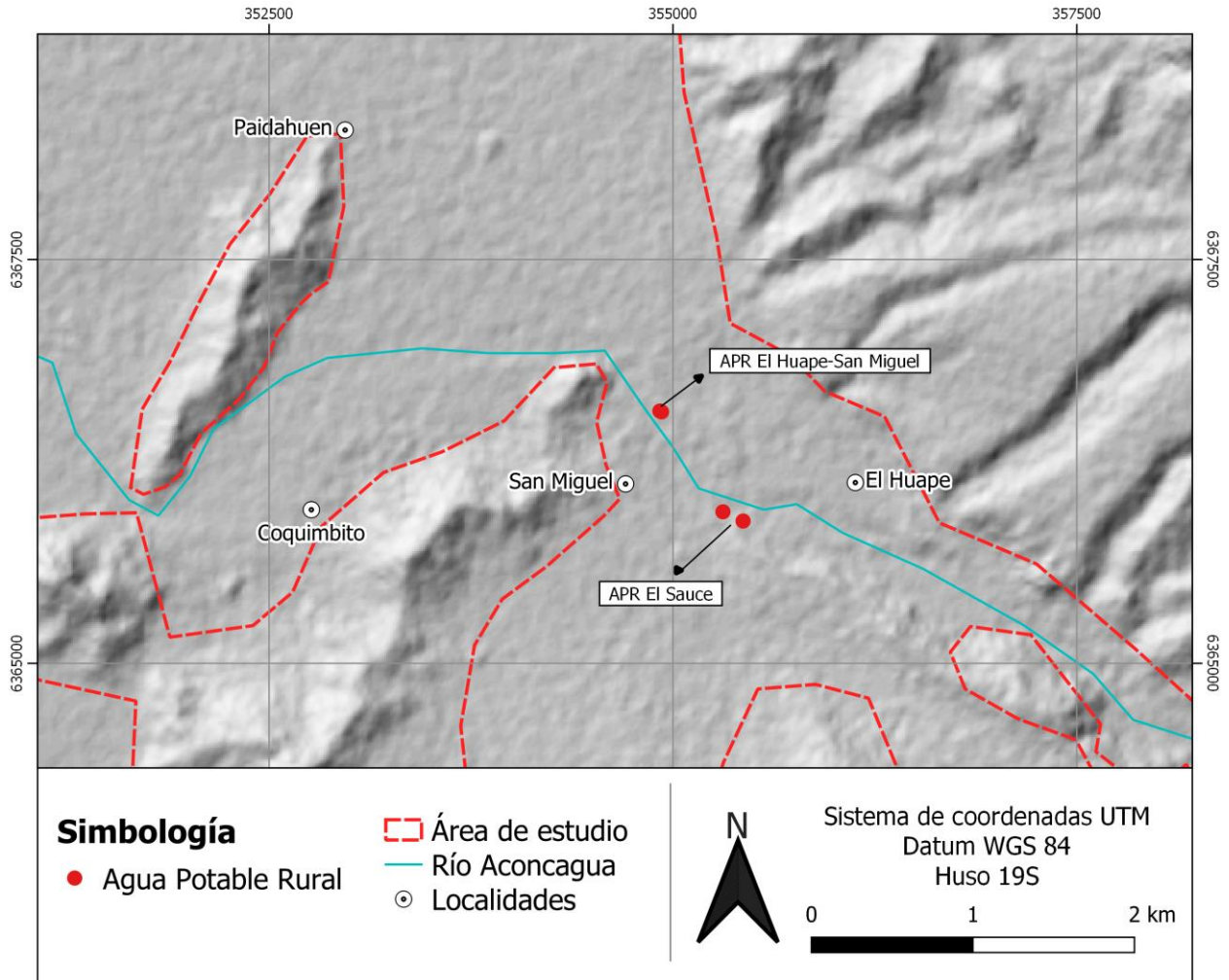


Figura 23: Ubicación de los pozos de Agua Potable Rural.

Con relación a la evolución temporal de los niveles de los dos pozos del APR El Huape-San Miguel, se ve una disminución de la profundidad de los niveles en ambos pozos. En el pozo uno se observa que en marzo de 2017 tiene una profundidad de agua de 49.85 m, mientras que en noviembre de ese mismo año el agua se encuentra a una profundidad de 36 m. Esto se puede explicar por el hecho de que es en los meses de verano cuando produce la recarga del acuífero producto del deshielo de la cordillera. En la actualidad este pozo tiene una profundidad del nivel de agua de 52 m, lo cual es levemente menor a lo observado en el año 2017. Lo anteriormente mencionado podría estar asociado a la disminución de la recarga natural o al aumento de la demanda en el sector (Figura 24).

Con respecto al pozo 2, en noviembre del año 2017 el nivel se encontraba a 39 m de profundidad y a fines del año 2019 los niveles se encontraron en casi 43 m de profundidad, esto

probablemente podría estar asociado al déficit de la recarga natural del acuífero producto de la disminución de las precipitaciones y nevazones en la alta cordillera o al aumento de la demanda producto del crecimiento de la población en el sector (Figura 24).

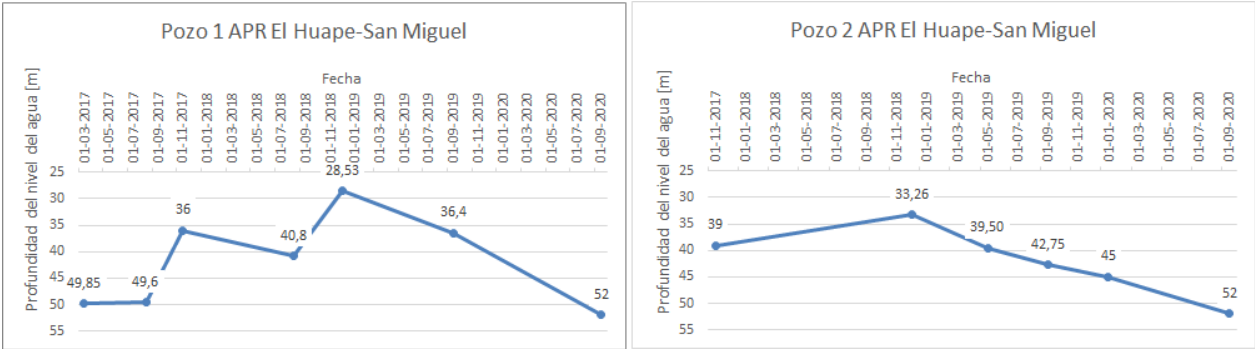


Figura 24: Gráfico de la evolución temporal de la profundidad del nivel de agua en los pozos del APR El Huape-San Miguel.

Del APR El Sauce se logró conseguir 4 mediciones correspondientes a los años 2019 y 2020. En mayo del 2019 los niveles se encontraban a 50,22 m, mientras que en septiembre del 2020 estos se encontraban a 59 m de profundidad. Con esta información se logra apreciar una disminución de los niveles de 8.78 m (Figura 25).

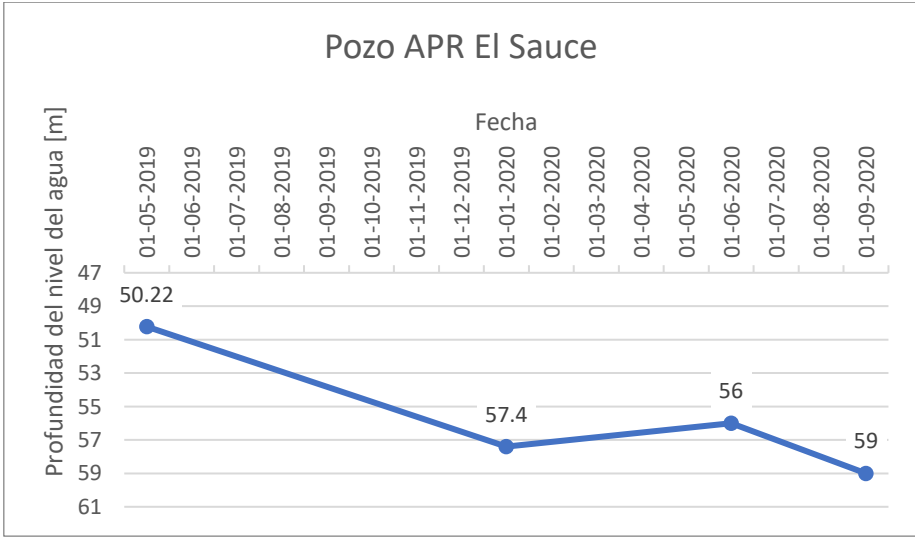


Figura 25: Gráfico de la evolución temporal de la profundidad del nivel de agua del pozo en el APR El Sauce.

Al momento de analizar la información recopilada de los APR se observa que El Sauce presenta menores descensos (9 m) en comparación a APR San Miguel-El Huape (13 - 20 m), a pesar de que estos se encuentran a 750 m entre sí. Esto podría estar ocasionado a una mayor demanda

en el sector de San Miguel donde se estén extrayendo más caudal de lo otorgado, lo cual podría producir una depresión de los niveles en la ladera sur del río Aconcagua. Otra razón, podría ser que al momento de tomar las mediciones en los pozos que estaban bombeando no se haya esperado lo suficiente para recuperar los niveles.

Considerando la información presentada sobre la evolución de los niveles en los últimos 3 años en el sector, se ha visto una importante disminución de los niveles de hasta 20 m en relación al año 2017 y el 2019 lo cual podría estar estrechamente ligado al déficit de recarga natural o al aumento de la demanda que presenta el acuífero en el área, provocando que los usuarios del agua sean los principales afectados.

3.2.2 Unidades hidrogeológicas.

Al momento de definir las unidades hidrogeológicas del área de estudio se analiza la información geología subsuperficial de las unidades sedimentarias que rellenan el valle aluvial, basándose en la información contenida en 12 columnas estratigráficas recopiladas de los derechos de aprovechamiento de agua (Anexo II).

La mayor cantidad de información estratigráfica se encuentra en el sector de San Miguel y Coquimbito. Las columnas tienen espesores de 32 m a 120 m (Figura 26) y describen principalmente depósitos sedimentarios no consolidados, que están compuestos por granulometría gruesa con pequeñas cantidades de arcillas, que poseen pequeñas variaciones laterales. Además, en 3 de las columnas analizadas se identifica la profundidad del basamento, estas varían entre los 53 y 43 m.

Al momento de conocer en detalle la estratigrafía del sector, se definen unidades hidrogeológicas, las cuales han sido representadas de manera gráfica en perfiles de manera transversal y longitudinal al río Aconcagua (Figura 26).

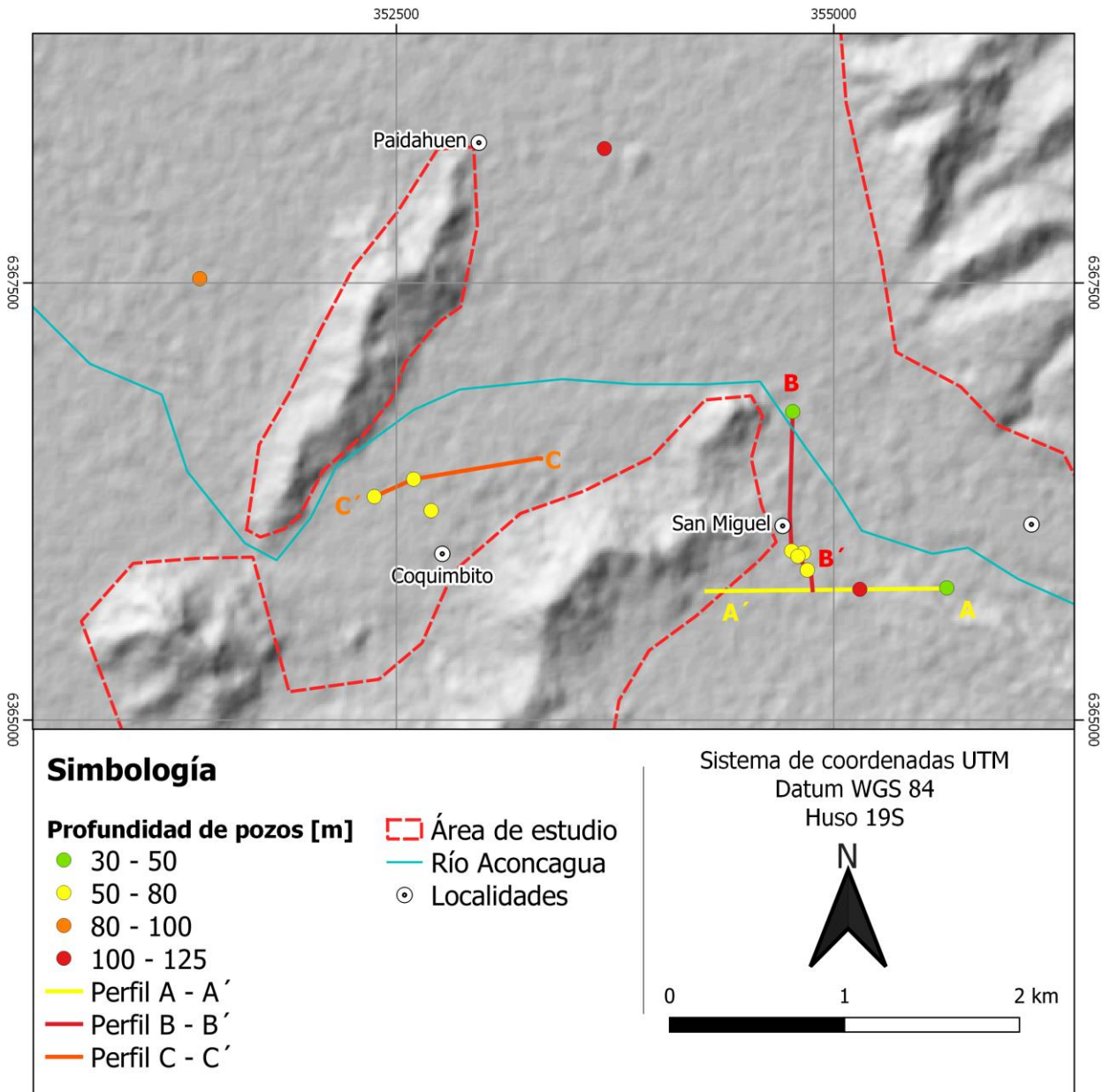


Figura 26: Ubicación de los perfiles hidrogeológicos y profundidad de columnas estratigráficas, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.

En el área de estudio el acuífero entre Los Andes- El Huape está delimitado por las formaciones volcánico-clásticas pertenecientes a la formación las Chilias (K1c), las cuales presentan una baja o nula permeabilidad, definida como basamento. Esta unidad se encuentra subyaciendo al relleno cuaternario permeable que constituye el sistema acuífero del sector.

Específicamente, en el área de estudio el acuífero está conformado por tres unidades permeables y una de muy baja permeabilidad o nula permeabilidad primaria (basamento) las cuales son definidas según el tamaño granulométrico y la posible permeabilidad que estas poseen.

El basamento se encuentra somero en cercanía de los cerros islas, como se puede analizar al norte del río Aconcagua en el perfil B-B', donde se encuentra roca a la profundidad de 43 m. Según estudios gravimétricos realizados por Geohidrología (2015) la zona que presenta la mayor profundidad detectada se ubica al norte de Paidahuen, con profundidades muy cercanas a los 500 m.

Sobre esta unidad se encuentran los depósitos sedimentarios no consolidados, que están compuestos por granulometría gruesa y fina, los cuales han sido generados por procesos fluviales, coluviales y el retrabajo de los sedimentos ocasionados a través del tiempo, los cuales han configurado el relleno sedimentario del valle del Aconcagua.

En la base se encuentra la Unidad Inferior, está presenta una permeabilidad baja y una morfología lenticular en la zona sur de San Miguel, está asociada a sedimentos de granulometría heterogénea con mayor presencia de material arcilloso y menor abundancia de granulometrías gruesas (<20%) con respecto al resto de las unidades. Esta unidad se ubica en el sector de San Miguel al sur del río Aconcagua y presenta espesores de 30 m.

Le sobreyace a la unidad antes mencionada la Unidad Intermedia, la cual presenta una permeabilidad media. Esta unidad se encuentra restringida en la locación, ya que solo se encuentra al este del área de estudio, en donde tiene un espesor variable de 15 m en el sector de El Huape, llegando cerca de los 40 m al norte de San Miguel. Esta unidad está constituida por sedimentos de granulometría gruesa correspondiente a bolones, gravas, arena con presencia en la matriz de arcilla (>25%).

Para continuar, la Unidad Superior, presenta una permeabilidad alta y está ubicada en la parte superior del acuífero. Esta presenta un espesor variable a lo largo del área de estudio, con unos 100 m en el sector de San Miguel, disminuyendo hacia el sector oeste de Coquimbito, donde los antecedentes estratigráficos indican que tiene profundidades de hasta 40 m. Esta unidad se encuentra compuesta por sedimentos de granulometría principalmente gruesa, correspondiente a bolones, ripios, gravas y arena gruesa y media, con presencia en la matriz de poca cantidad de arcilla.

En este estudio se considera la Unidad Superior e Intermedia como el acuífero, debido a que posee las características apropiadas para almacenar y transmitir el agua.

En las inmediaciones del río Aconcagua en el sector sur de la localidad de El Huape, el acuífero se desarrolla en los primeros 120 m de profundidad y está compuesto por bolones, grava, ripios y arena gruesa y poca cantidad de arcilla. La profundidad de nivel se encuentra alrededor de los 40 m de profundidad (Figura 27). Lo descrito anteriormente se puede visualizar en el perfil A-A' situado en la ribera sur del río Aconcagua.

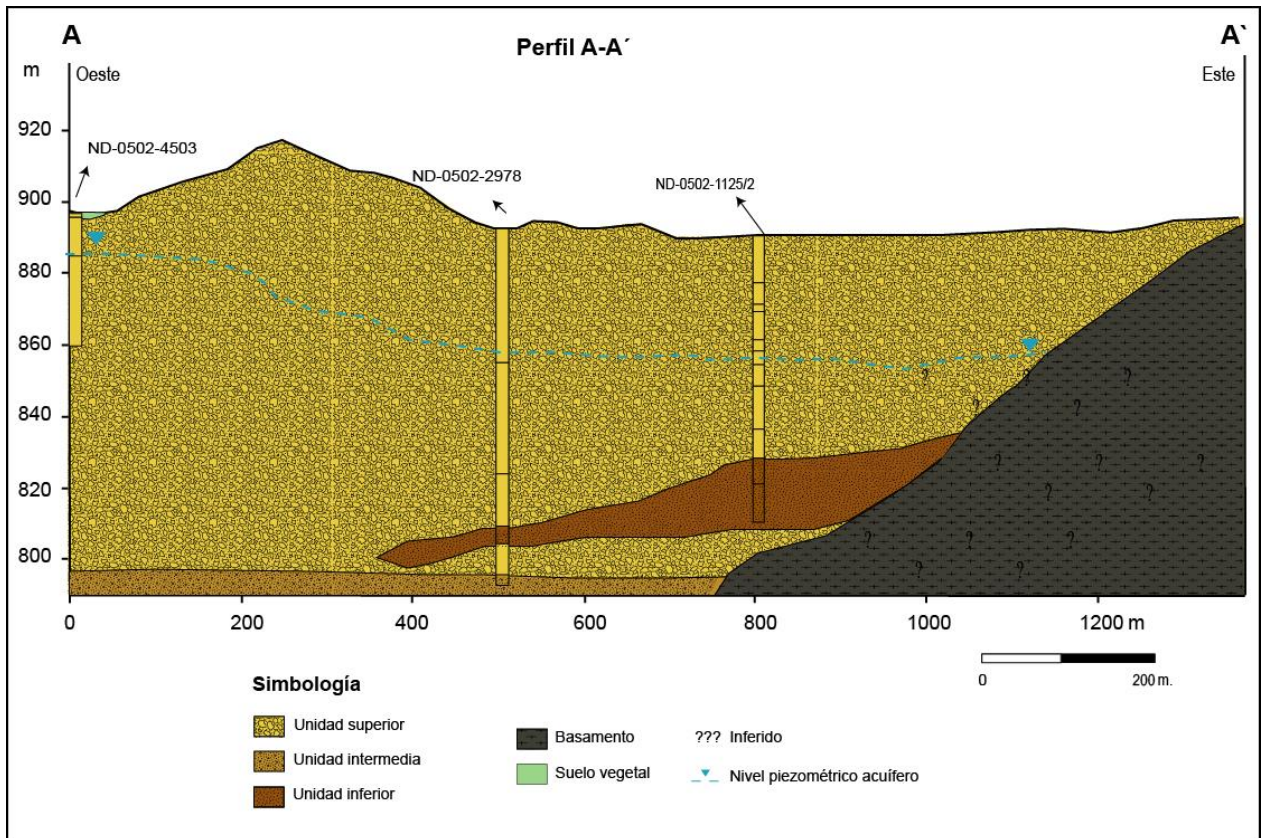


Figura 27: Perfil hidrogeológico A-A', construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.

Hacia aguas abajo, acercándose a la localidad de San Miguel, el acuífero es interrumpido por el basamento, producto de la presencia de un cerro, lo que hace que en el sector se muestre el acuífero con una menor potencia, mientras que el sur del río Aconcagua el acuífero presenta aproximadamente un espesor de 70 m. La profundidad de niveles de agua en el sector se encuentra en la actualidad dentro de los 30 m (Figura 28).

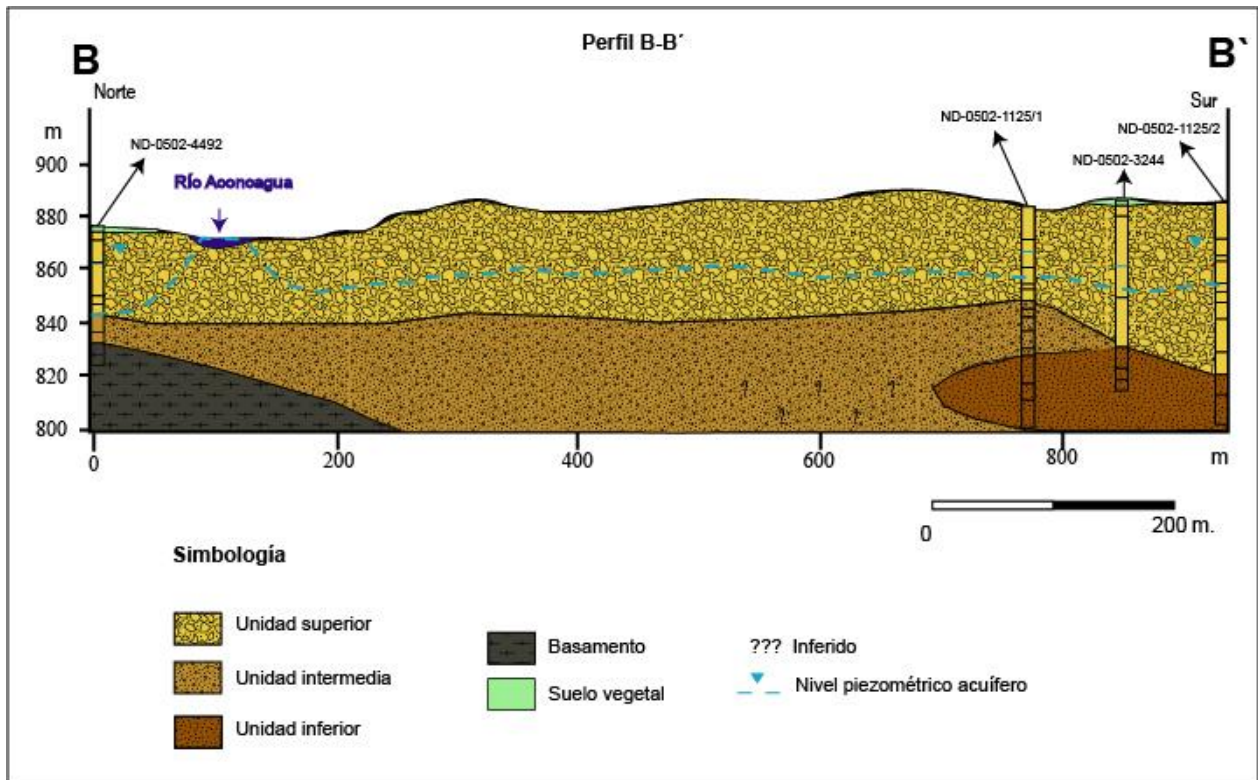


Figura 28: Perfil hidrogeológico B-B', construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.

Continuando río abajo, en el sector de Coquimbito, como se puede ver en el perfil C-C' (Figura 29), el acuífero se dispone a unos 50 m de profundidad, ya que al lado este de Coquimbito se encuentra el basamento a los 53 m de profundidad. Al este de esta localidad le subyace la Unidad Inferior compuesta por arcillas plásticas.

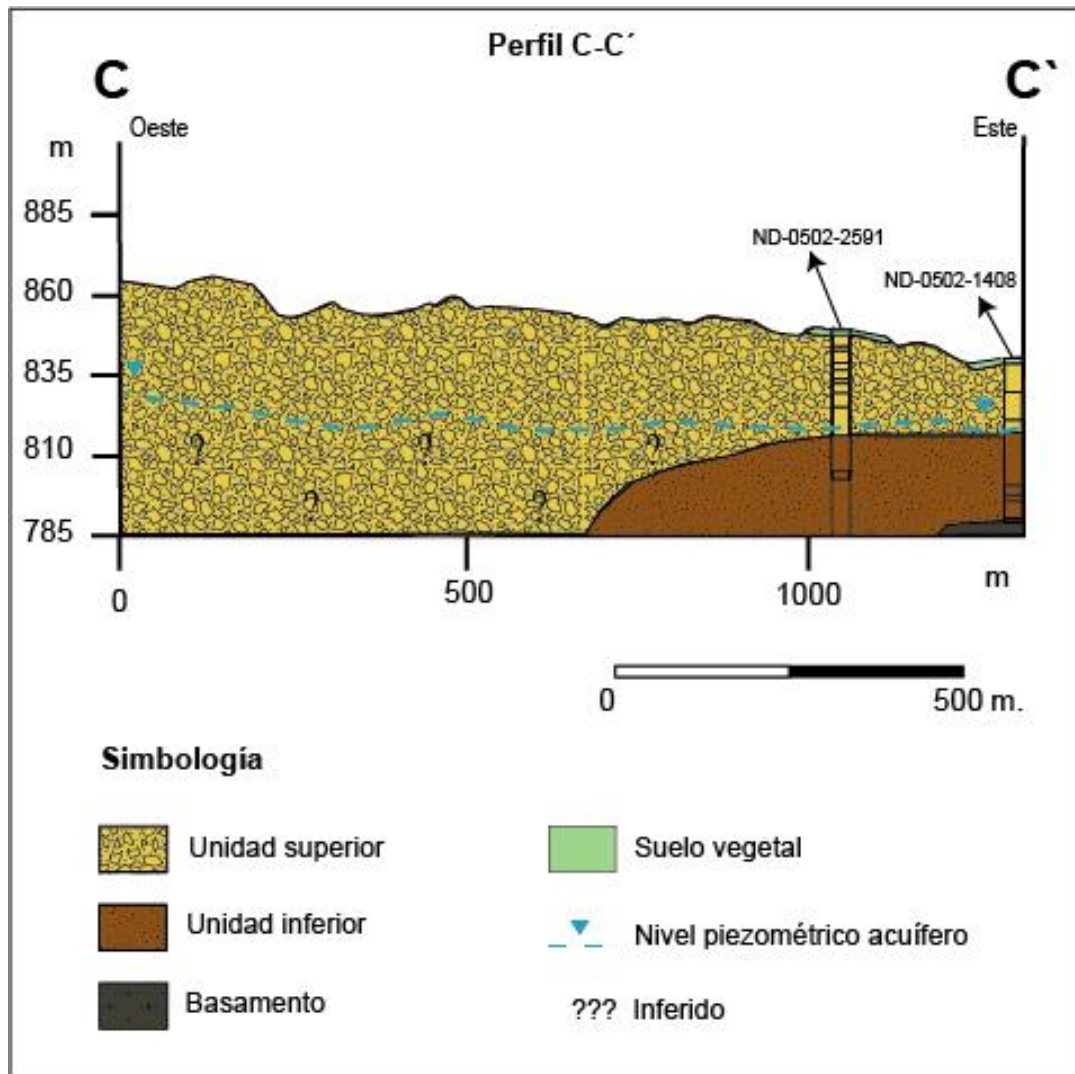


Figura 29: Perfil hidrogeológico C-C', construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.

Concluyendo, entre las localidades de El Huape y Coquimbito, el acuífero presenta una potencia variable entre 120-70, su carácter es freático y la profundidad del agua se encuentra entre 30 y 40 m de profundidad.

3.2.3 Parámetros hidráulicos del acuífero.

3.2.3.1 Permeabilidad.

Como concepto la permeabilidad tiene relación a la facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, en este caso el agua, hidrogeológicamente la permeabilidad

(conductividad hidráulica) es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico (Sánchez. F, s.f).

La caracterización de la distribución espacial de la permeabilidad de los estratos permeables del sector se realizó en función de las pruebas de bombeo de los expedientes de los derechos de agua de la DGA y de las permeabilidades recopiladas de GCF (2007).

Las permeabilidades que presenta el acuífero en el área de estudio se hallan entre los valores de 5 y 280 m/día, sin embargo, la mayoría de los datos se encuentran en valores entre los 20 y 50 m/día (Figura 30), los cuales se ubican en el sector de San Miguel.

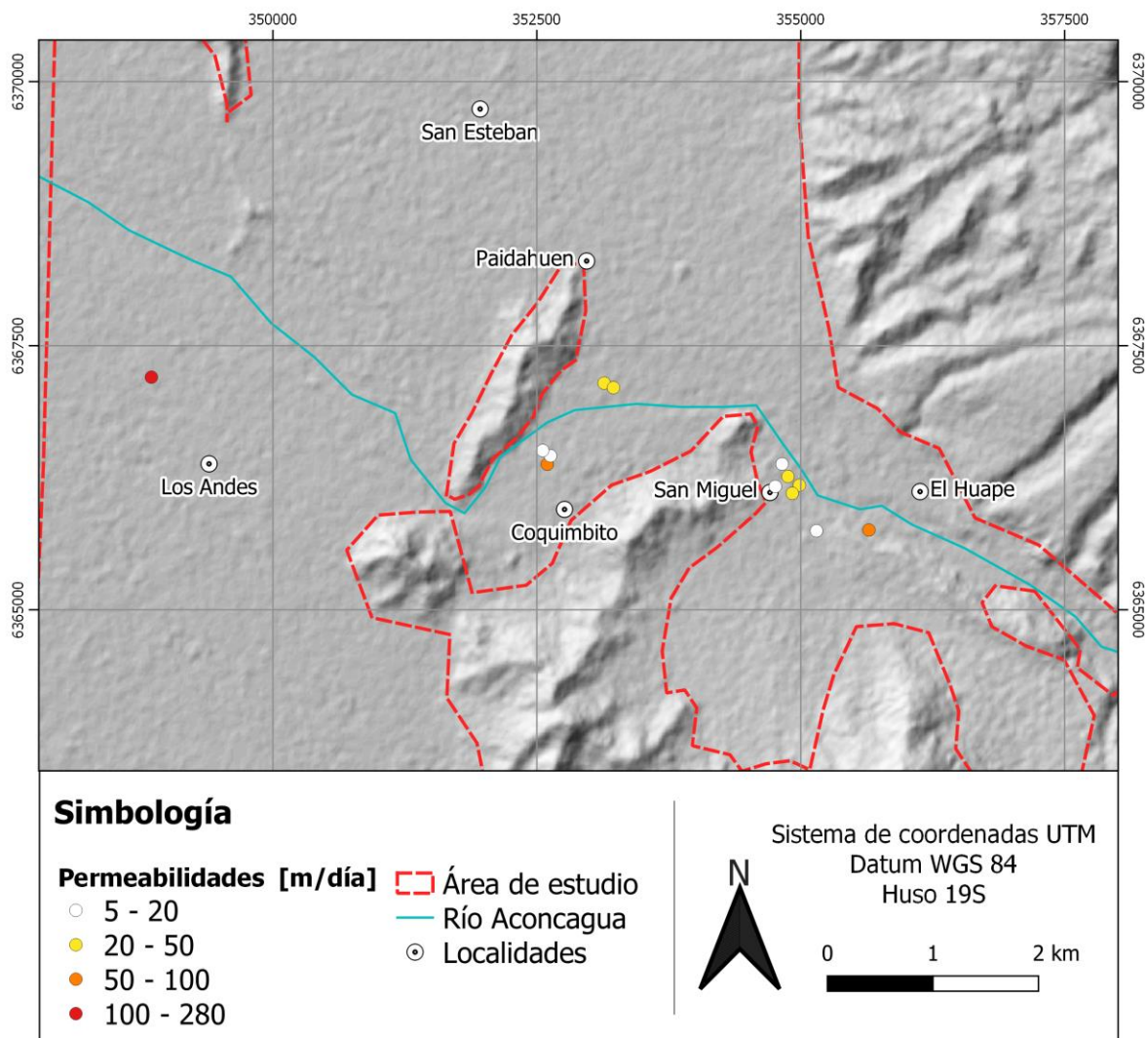


Figura 30: Permeabilidades [m/día] en el área de estudio, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.

En el sector de los Andes y al Norte de Coquimbito se observan las mayores permeabilidades, las cuales tienen valores de 280 y 103 m/día respectivamente. Estos valores están asociados a las unidades de alta y media permeabilidad descritas con anterioridad. Por otro lado, el sector de San Miguel se observa sectores con permeabilidades mínimas de 8 y 33 m/día, dado que el tamaño granulométrico de los sedimentos presentes en el área está compuesto por una cantidad de sedimentos finos importantes (>50%).

3.2.3.2 Transmisividad.

La transmisividad, es el caudal de agua subterránea que circula por una sección del acuífero, este parámetro indica la posibilidad que ofrece un acuífero de cara a su explotación (Sánchez. F, s.f).

Las transmisividades del acuífero se han caracterizado en función de 16 datos, los cuales han sido recopilados e interpretados de las pruebas de bombeo que se encuentran en los expedientes de los derechos de agua de la DGA y datos recopilados de GCF (2007). Con respecto a los valores de transmisividad se puede ver que el mínimo valor, 199 m²/día, se encuentra al norte de Coquimbito, mientras que el valor más alto de transmisividad en la zona, 3939 m²/día, se encuentra al noroeste de Los Andes (Figura 31). La mayoría de los datos en el área de estudio se encuentran entre 2000 a 3000 m²/día.

Las zonas de mayor transmisividad del relleno sedimentario se encuentran al noroeste de Los Andes y al este Coquimbito, zonas donde se encuentran valores puntuales sobre los 3000 m²/día.

Por otro lado, en el sector de San Miguel y El Huape al igual que las áreas ubicadas en el borde exterior del río tienen una mayor permeabilidad y transmisividad debido al tamaño de los sedimentos presentes en el lugar, ya que es en esta zona donde el río tiene una mayor velocidad que en el borde interior, por lo cual el río trae sedimentos de mayor granulometría permitiendo que la transmisividad y permeabilidad sean altas.

Los cálculos de transmisividad de los ensayos de bombeo fueron calculados utilizando la fórmula de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{m} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde “Q” corresponde al caudal y “m” a el descenso/ 1 ciclo log, sin embargo, se debe realizar una corrección de variación de espesor saturado, debido al carácter libre del acuífero:

$$m = d - \frac{d^2}{2H_0} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde “d” es el descenso y “H₀” el espesor saturado inicial.

Cabe señalar que para el cálculo de la transmisividad se utilizaron espesores saturados del acuífero estimados en relación al espesor saturado del pozo, debido a que las columnas no llegaban al basamento, lo que permite conocer una limitada parte del espesor saturado del acuífero y no el espesor total del acuífero saturado.

Por otro lado, los cálculos de permeabilidad (K) de los ensayos de bombeo fueron calculados de la siguiente forma:

$$K = \frac{T}{b} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde “T” corresponde a la transmisividad y “b” al espesor saturado.

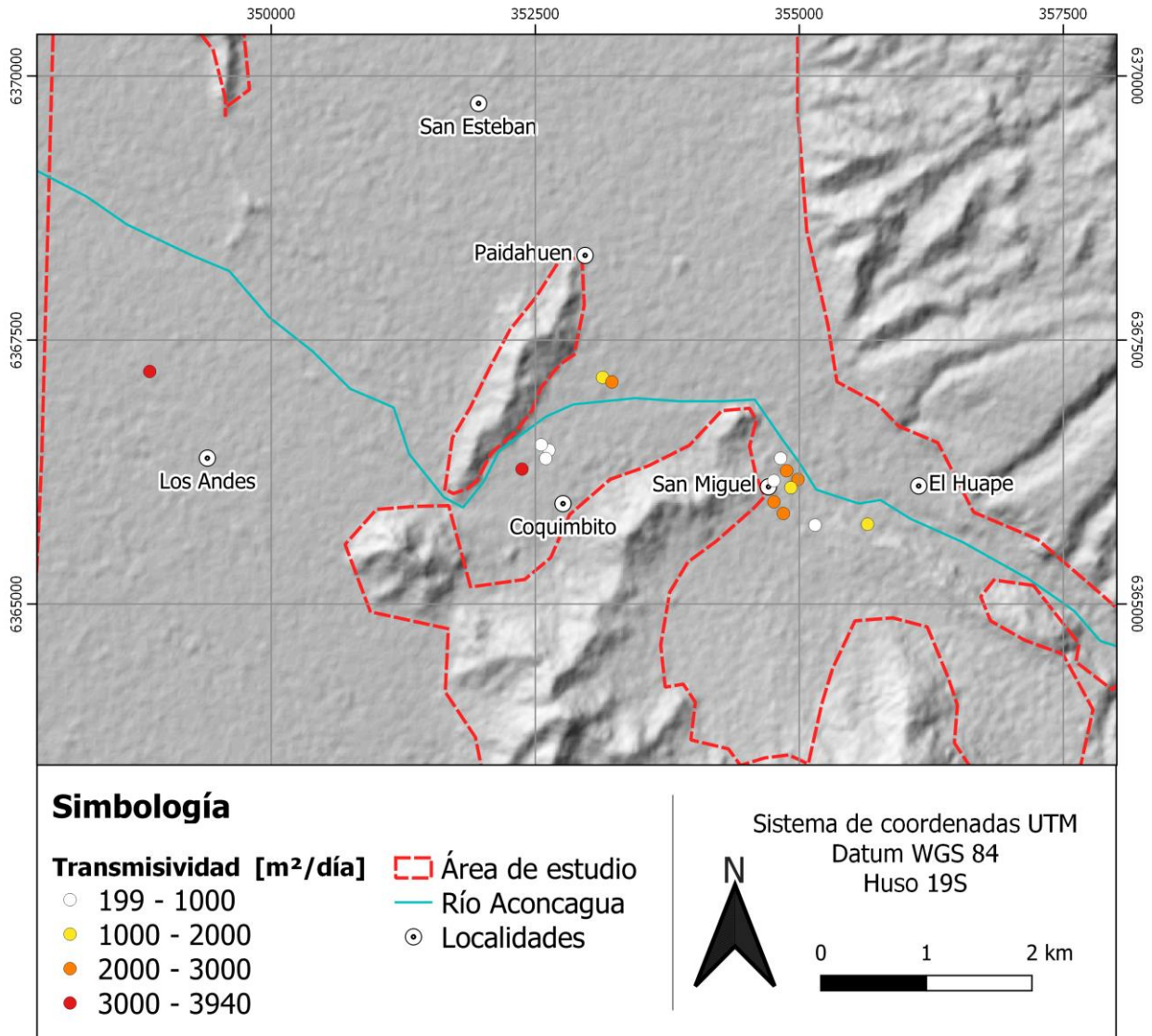


Figura 31: Transmisividades [$m^2/día$] en el área de estudio, construido a partir de datos publicados en los expedientes de la DGA.

3.2.3.3 Coeficiente de almacenamiento.

El coeficiente de almacenamiento se define como la cantidad de agua entregada, por unidad de volumen, de un material saturado por unidad de cambio del nivel del agua (nivel estático) (Sánchez. F, s.f). Y como se ha mencionado anteriormente, en el área de estudio se encuentra la presencia de un acuífero libre, por lo que la capacidad del acuífero está correlacionada con la porosidad eficaz. Está se define como el cociente entre el volumen de poros o huecos conectados

que presenta el acuífero por donde puede circular efectivamente el agua subterránea referidos al volumen total del mismo (Sánchez. F, s.f).

Dada la ausencia de información contrastable de la porosidad eficaz en el sector, se propone un valor estimado de 0.13 en función de la granulometría del subsuelo y considerando que este es un valor característico para este tipo de acuíferos (Espinoza, 2009).

3.3 Caracterización hidroquímica.

Al momento de realizar la recarga artificial se debe tomar en consideración la calidad del agua que se debe infiltrar en la zona de recarga, con el objetivo de no alterar la composición que el acuífero posee. No obstante, en este estudio se pretende infiltrar la misma agua perteneciente al río Aconcagua, por lo que no habría diferencias de calidad dado que es la principal fuente de infiltración.

Para corroborar lo estipulado se realiza la caracterización hidroquímica con el objetivo de dar a conocer las propiedades fisicoquímicas del agua superficial y subterránea del área de estudio y compararlas entre ellas.

En dicho contexto se realiza una recopilación de los parámetros fisicoquímicos superficiales de la estación río Aconcagua en Chacabuquito y de los análisis de calidad de aguas de dos pozos, cuyos expedientes son ND-0501-4492 y ND-0501-1408 (Figura 32). Con respecto a los datos de aguas superficiales se utilizó solo la información del mes de octubre de los años 2002 y 2006, mientras que para el agua subterránea se utilizaron ambos pozos donde se tenía información.

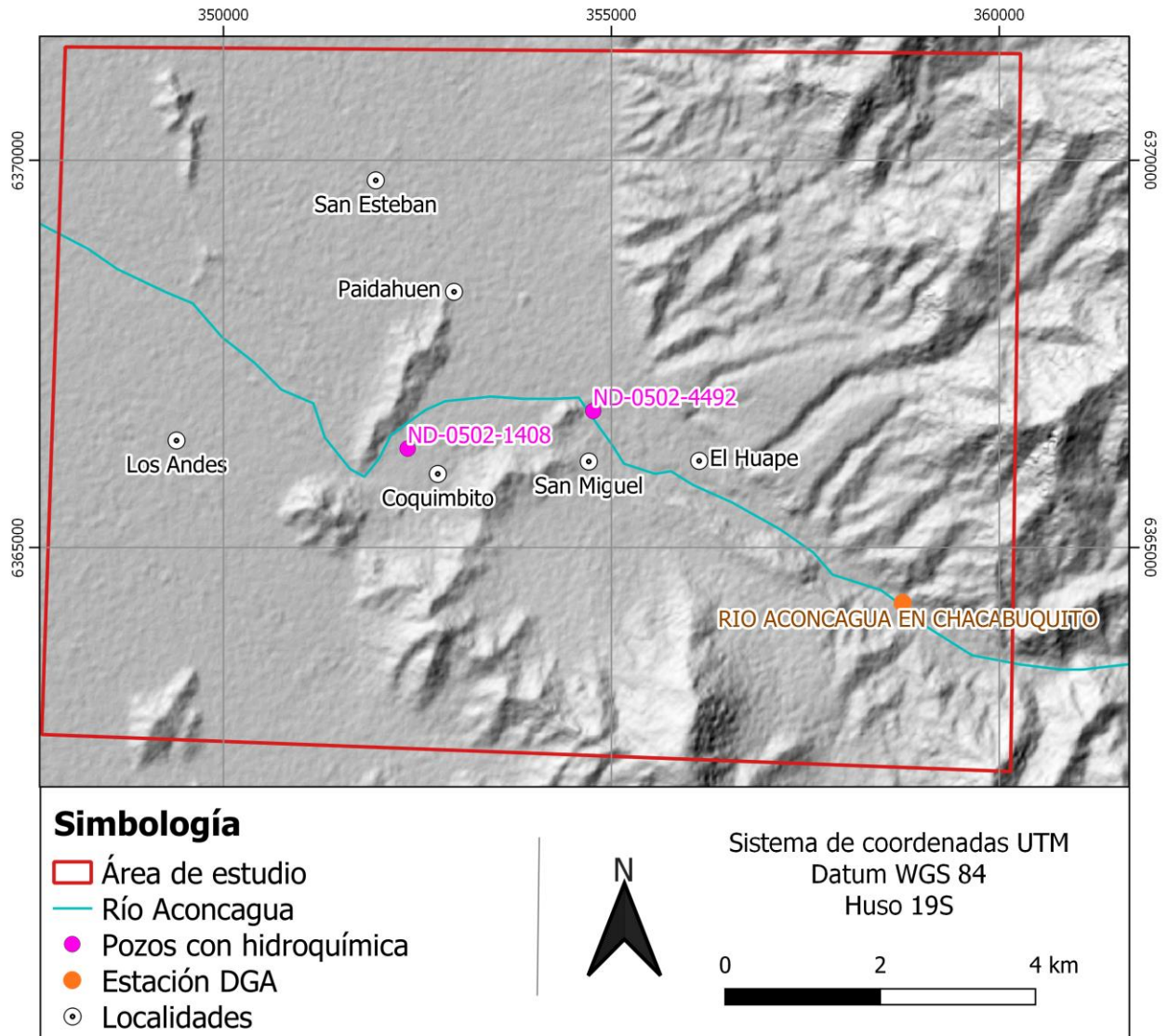


Figura 32: Ubicación pozos con hidroquímica y estación de calidad de aguas DGA, construido a partir de datos publicados por DGA (2020b).

Del análisis del diagrama Piper se observa que las aguas subterráneas y las de aguas superficiales corresponden a aguas sulfatadas cálcicas. Debido a que ambas aguas tienen la misma composición, podría indicar que el río Aconcagua representa la mayor fuente de recarga del acuífero (Figura 33).

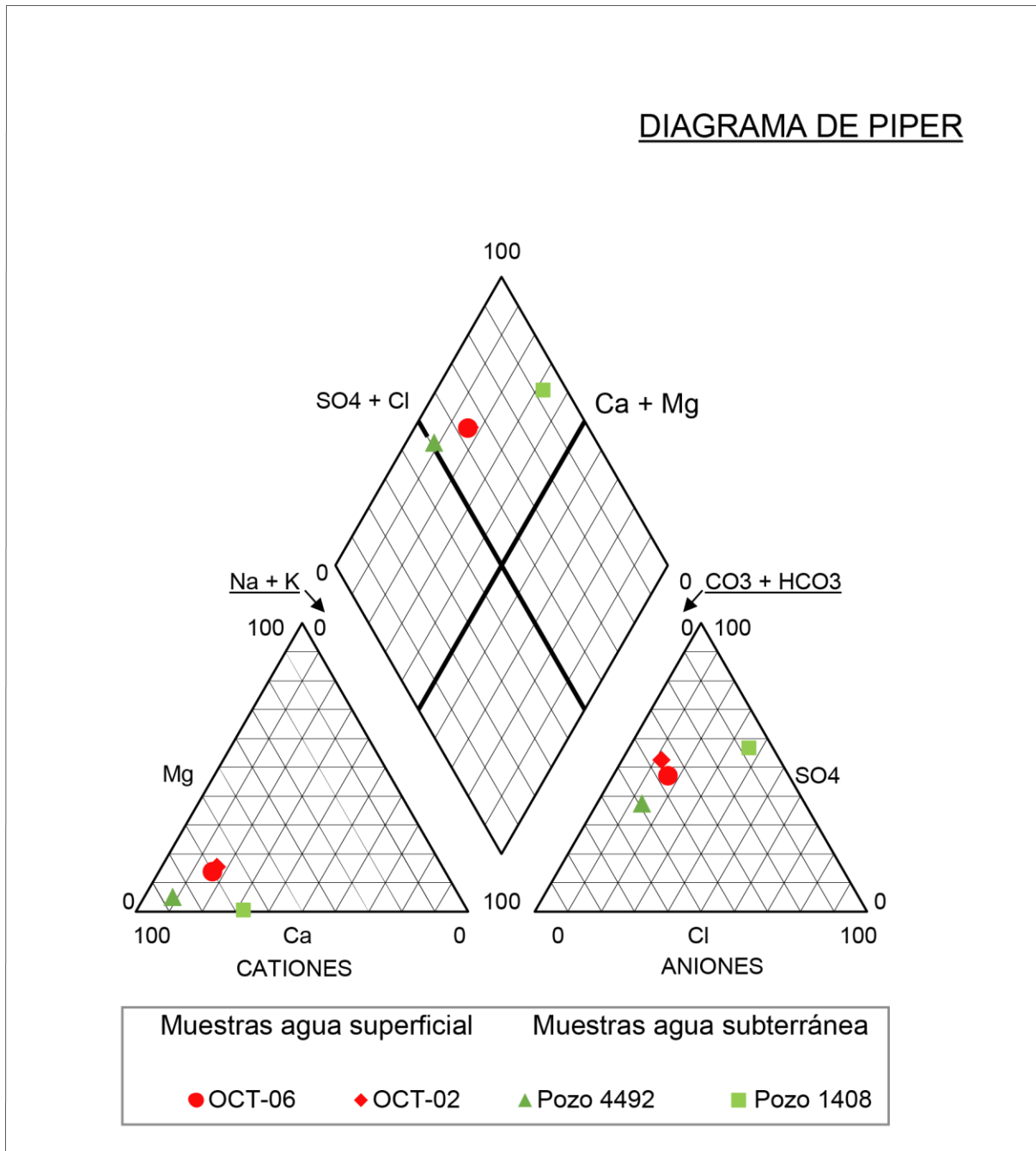


Figura 33: Diagrama Piper con información fisicoquímica de aguas subterráneas y superficiales, en tonos verdes aguas subterráneas y en rojo aguas superficiales, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

Con respecto al diagrama Schoeller-Berkaloff (Figura 34), se puede ver que las muestras de aguas superficiales tienen un contenido similar de los cationes y aniones entre ellas. Por otro

lado, se aprecia que ambas muestras de aguas subterráneas tienen una mayor concentración de los elementos en cuestión a excepción del magnesio en comparación con las aguas superficiales.

DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF

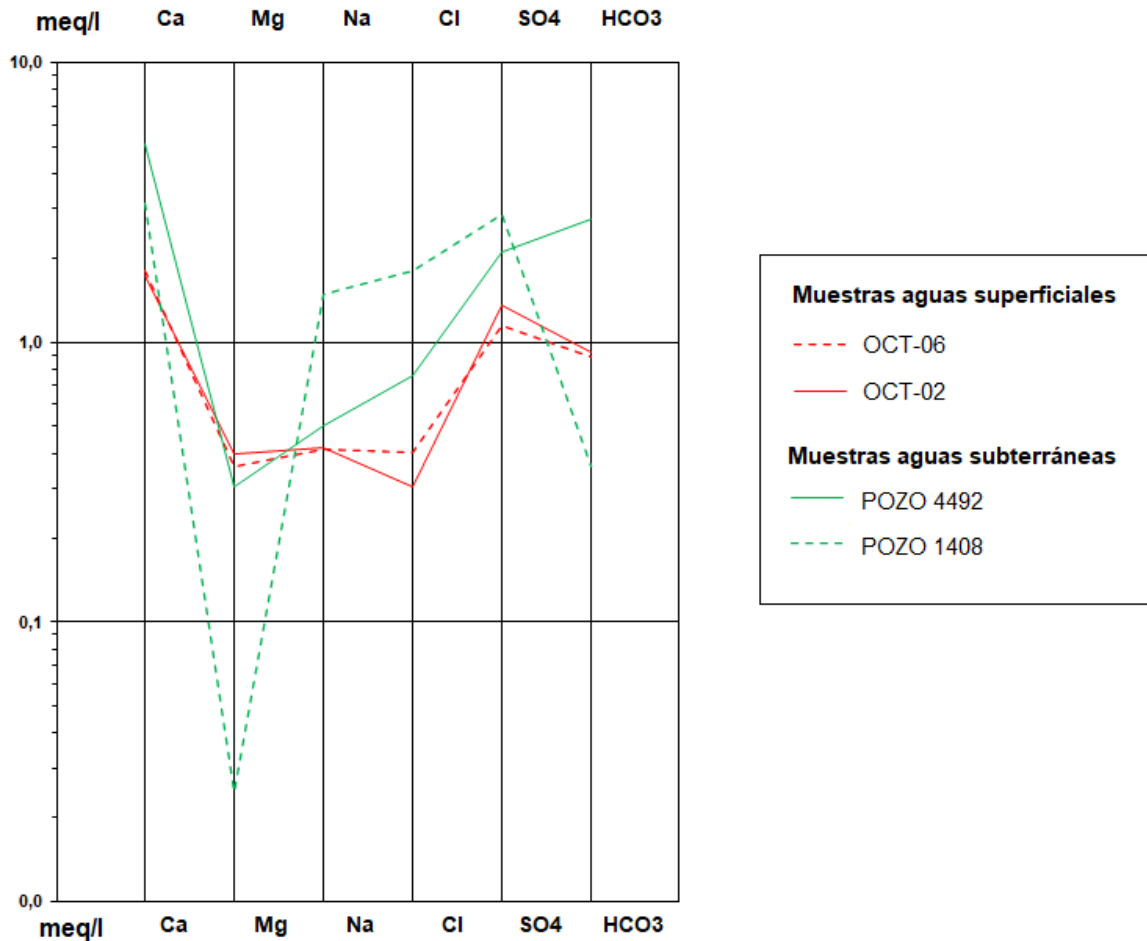


Figura 34: Diagrama Schoeller – Berkaloff con información fisicoquímica de aguas subterráneas y superficiales, en tonos verdes aguas subterráneas y en rojo aguas superficiales, construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

3.3.1.1 pH.

Los registros de valores de PH del río Aconcagua desde el año 1990 al año 2019 en la estación Chacabuquito varían entre 6.6 (medido en enero del 2002) y 9.4 (medido en agosto del 2013),

este último interpretado como una anomalía en la medición (Figura 35). Estos registros muestran un pH promedio de 7.8 con una desviación de 0.5, por lo que los valores no están tan dispersos con respecto a la media, otorgando un carácter alcalino a las aguas que escurrían por el cauce.

El comportamiento del pH de aguas superficiales en el periodo de registro, en el sector de Chacabuquito, es similar tanto para época de riego y no riego, con una mayor dispersión de los valores en la época de riego. En los últimos 10 años se observa una leve tendencia al aumento del pH, especialmente en la época de riego (Figura 35).

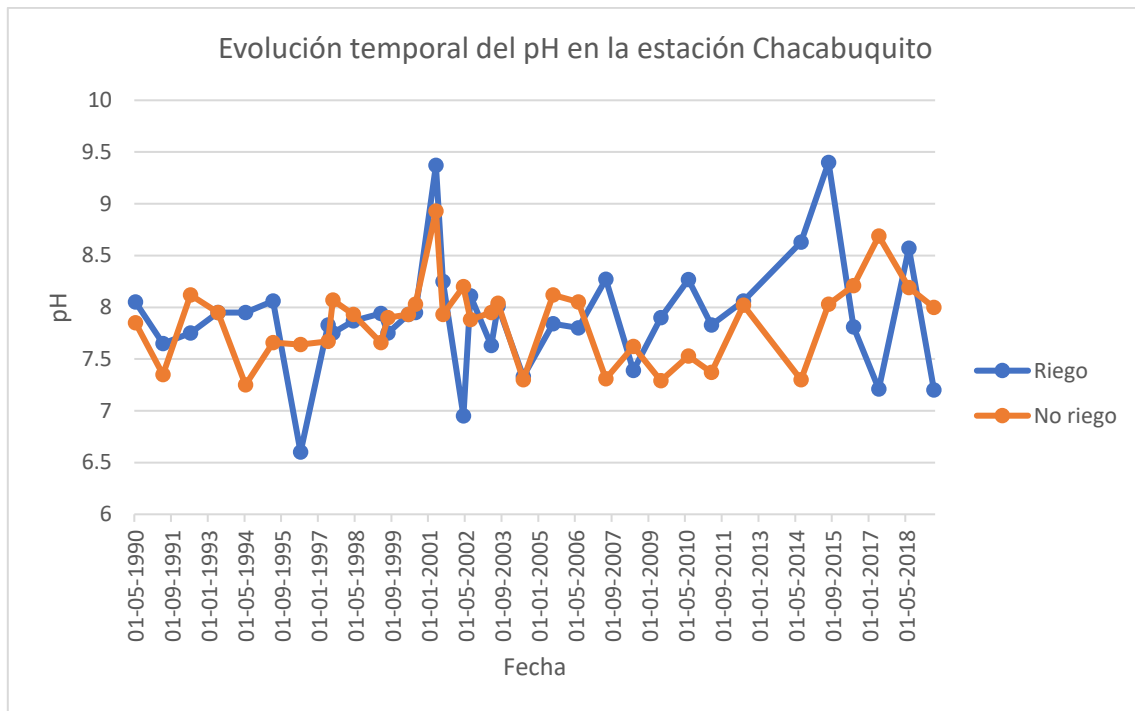


Figura 35: Evolución temporal desde 1990 a 2019 del pH en estación Chacabuquito en el río Aconcagua según época de riego (azul) y no riego (anaranjado), construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

En la visita a terreno realizada el 16 septiembre del 2020, se efectuaron mediciones de pH en el agua extraída del acuífero desde los pozos de los sistemas de APR El Sauce y del APR El Huape-San Miguel obteniéndose valores de 6,78 y 7,13, respectivamente. Estos valores son un poco más bajos (PH más bien neutro) respecto de los valores más alcalinos que fueron registrados los últimos años en época de riego para las aguas superficiales del río Aconcagua en la estación Chacabuquito.

Esta ligera diferencia entre el pH de agua subterránea y superficial se debe a que el pH disminuye con la profundidad y la temperatura, ya que cuando aumenta la temperatura, las moléculas

tienden a separarse en sus elementos: hidrógeno y oxígeno y al aumentar la proporción de moléculas descompuestas se produce más hidrógeno, lo cual por supuesto aumenta a su vez el potencial de hidrógeno pH (Ayora, 2006; Hannah instrument, 2021).

3.3.1.2 Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica (CE) está influenciada por la concentración y composición de las sales disueltas (salinidad del agua). Las correlaciones indican que una mayor conductividad eléctrica se corresponde con una mayor presencia de salinidad (Rebolledo, 2017).

Para ver identificar variaciones en la conductividad eléctrica a través del tiempo, se realiza un análisis de la evolución temporal de los últimos 30 años del agua superficial del río Aconcagua en la estación Chacabuquito, y se clasifican tanto para épocas de riego (agosto a marzo) como las de no riego (abril a julio).

En general se puede observar que en la estación la conductividad en época de regadío tiene un comportamiento oscilatorio, variando desde los 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor medido en noviembre de 1991) hasta los 690 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor registrado en noviembre de 1990). En relación a lo ocurrido en la época de no riego, esta presenta un comportamiento similar al anterior, dado que presenta una tendencia de altos y bajos, donde ha variado desde los 285 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valor registrado en mayo de 1990) hasta los 706 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (registrado en abril del 2011).

En general la CE para el periodo de no riego es mayor que en la época de riego, aunque en ambas situaciones se observa una leve tendencia al aumento de la conductividad (Figura 36).

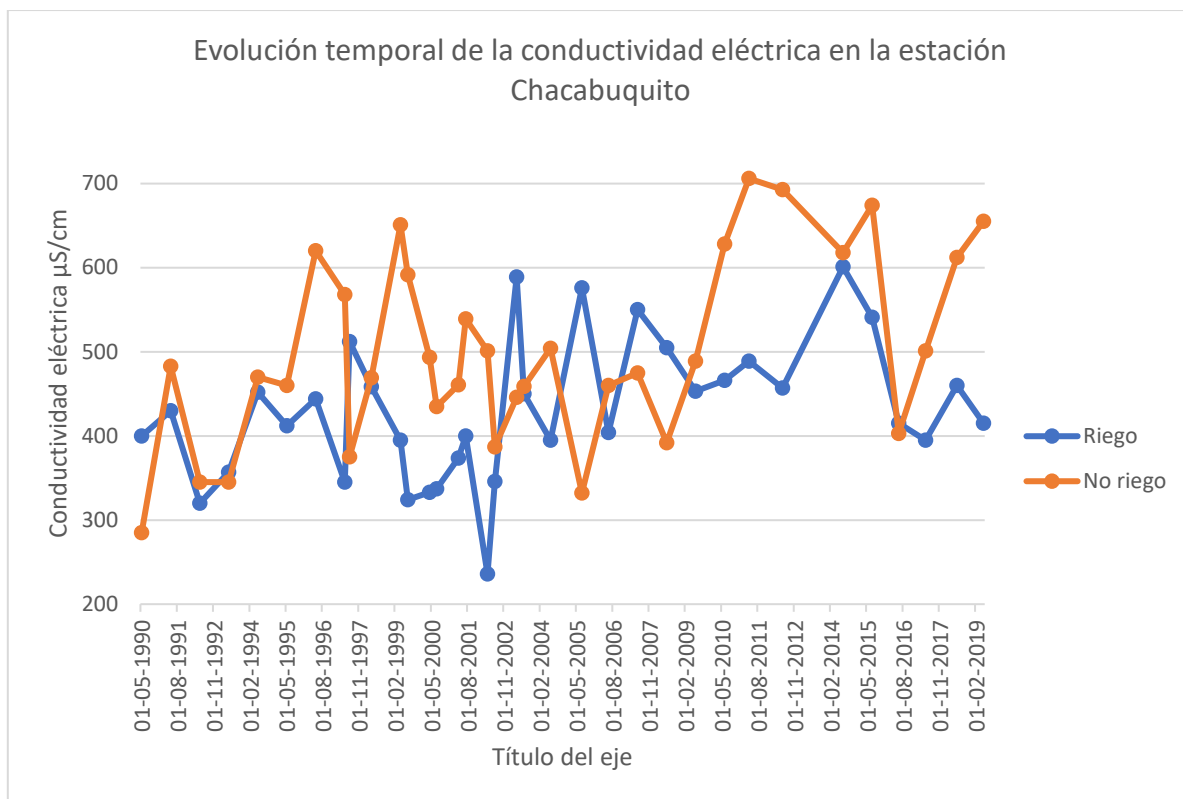


Figura 36: Evolución temporal desde 1990 a 2019 de la conductividad eléctrica en la estación Chacabuquito en el río Aconcagua según época de riego (azul) y no riego (anaranjado), construido a partir de datos publicados por DGA (2020a).

Referente a las mediciones de conductividad eléctrica de agua subterránea que se tomaron en terreno en los APR visitados, la CE presenta valores mayores que la presentada en las aguas superficiales de la estación Chacabuquito, ya que en el APR El Sauce tiene 936 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 897 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en APR El Huape-San Miguel, observándose una diferencia importante.

La conductividad eléctrica es directamente proporcional al contenido de sólidos totales disueltos en el agua subterránea, los cuales se incrementan con la evolución del agua subterránea, o por efecto de la contaminación natural o antropogénica. En este caso se podría interpretar, que el aumento de la CE en el agua subterránea se debe a que es agua que lleva un tiempo mayor de almacenamiento que el agua superficial medida en el río. Además, la temperatura también podría influir en el incremento de la CE de las aguas subterráneas (Silva et al, 2013).

3.4 Caracterización zona no saturada.

Para determinar la infiltración en la zona de recarga es fundamental conocer las características de la zona no saturada (ZNS) del acuífero, tanto su estratigrafía como los parámetros hidráulicos representativos (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento). Es a través de esta zona por donde se produciría la transmisión del agua desde la superficie hasta el acuífero, actuando como almacén y transmisora del agua infiltrada.

3.4.1 Estratigrafía.

En el sector de Coquimbito y San Miguel presentaría un espesor de 35 m, mientras que los espesores al noroeste de la localidad de El Huape serían de aproximadamente 50 m, y de 45 m al sureste de esta misma localidad.

Del análisis de los 12 sondajes que tienen estratigrafía presentados anteriormente en la Figura 26, y de acuerdo con la caracterización de las unidades hidrológicas, la zona no saturada estaría conformada por gravas y bolones soportados por una matriz de arenas finas y menor contenido de sedimentos finos tamaño limo y arcilla.

A partir del análisis granulométrico del pozo de expediente ND-0501-4492, se realizó la caracterización de la ZNS representativa del sector, estimándose una composición de un 65,2% de grava y bolones; un 26,4% de arena y 8,4% de arcilla y limo. Estos valores se consideran representativos de los depósitos que se encuentran en el área donde se realizará la infiltración, los cuales conforman la ZNS sin presentar mayores variaciones en la componente vertical (Figura 37).

Como se está en presencia de una columna sedimentaria, se debe considerar que existe heterogeneidad asociada a distintos eventos de depositación, que generan estratificación y producen características anisótropas del medio. En términos hidrogeológicos se traduce en que existiría una variabilidad en la conductividad hidráulica, presentándose permeabilidades horizontales equivalentes que por lo general suelen ser mayores que las verticales equivalentes, al ubicarse capas de alta permeabilidad intercaladas con capas de menor permeabilidad.

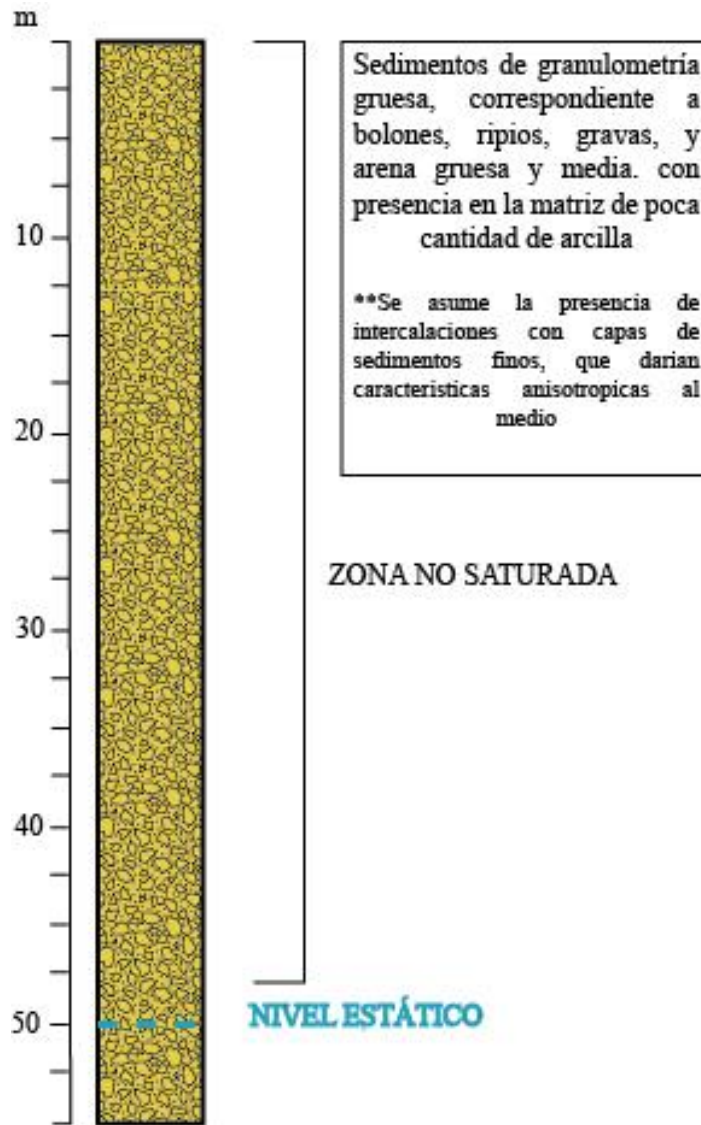


Figura 37: Columna estratigráfica tipo de la zona no saturada del área de estudio.

3.4.2 Parámetros hidráulicos.

A partir de las características granulométricas que se consideraron representativas del subsuelo en el área de estudio (65,2% grava; 26.4% arena; 8.4% limos y arcillas) se han estimado las propiedades hidráulicas de la ZNS mediante el programa HYDRUS 1D, el cual permite estimar los parámetros hidráulicos para el modelo van Genuchten, el cual relaciona la permeabilidad del suelo con el contenido de humedad que presenta, permitiendo resolver el flujo a saturación variable.

Debido a que solo los materiales medios a finos (arenas a arcillas) del suelo presenta capacidad de retención del agua por capilaridad, es importante considerar solo la matriz del suelo para estimar las propiedades de retención representativas de la ZNS.

De esta forma, el porcentaje de la matriz del suelo corresponde a un 34, 8%, por lo que se tiene una composición del 75.86% de arena y 24.14% de limo y arcilla para la matriz, estimándose los siguientes parámetros:

alpha [1/cm]: 0.034

beta [-]: 1.48

Ks [cm/día]: 0.52

Porosidad residual: 0.049

Porosidad saturada: 0.379

Donde alpha está relacionado con la entrada de aire en el suelo, beta con distribución de poros y Ks corresponde a la conductividad hidráulica saturada del suelo.

Considerando el porcentaje de gravas y bolones en el suelo, las porosidades son corregidas para representar el volumen de almacenamiento total del suelo en el área de estudio, obteniéndose las siguientes porosidades:

Porosidad residual: 0.017

Porosidad saturada: 0.13

Dado que el valor expuesto anteriormente de la conductividad hidráulica saturada corresponde solo a la de la matriz, se debe considerar una disminución en la tortuosidad del flujo y, por ende, un aumento de la conductividad hidráulica debido a la alta presencia de bolones y gravas. Es por esto que se considera un valor de conductividad hidráulica saturada vertical de 1 m/día, valor representativo de las zonas fluviales y rellenos aluviales encontrados en la zona, y conforme a pruebas de campo realizadas aguas abajo del área de estudio en la localidad de Llay Llay (Aluvial, 2020).

3.5 Tipo de recarga a realizar.

Por las características que el área de estudio posee, como la cercanía para acceder al recurso de agua superficial, la presencia de terreno disponible, las características no confinadas del acuífero, su permeabilidad (25 m/día) y almacenamiento idóneo (Figura 38 y Tabla 10) y la profundidad del nivel freático (40 m), se considera que el método adecuado para realizar la recarga artificial es mediante piscinas de infiltración.

		Capacidad de almacenamiento		
		Baja	Moderada	Alta
Conductividad hidráulica	Alta			
	Moderada			
	Baja			

Figura 38: Viabilidad de realizar recarga artificial en un determinado acuífero. Extraído de Murray y Tredoux, 1998.

Tabla 10: Rangos de conductividad hidráulicas para la recarga artificial.

Conductividad hidráulica idónea	Entre 100 y 0.1
Conductividad hidráulica buena	Entre 1000 y 100
Conductividad hidráulica moderada	Entre 0.1 y 0.001 y > 1000
Conductividad hidráulica poco recomendable	< 0.001

Estas generalmente se construyen fuera del cauce desde el cual se desvía el agua superficial hacia la piscina, ya sea por gravedad o por bombeo. El agua es almacenada en una piscina de baja profundidad excavada en el terreno. El agua se infiltra desde la superficie hasta el acuífero a través de la zona no saturada (Figura 39).

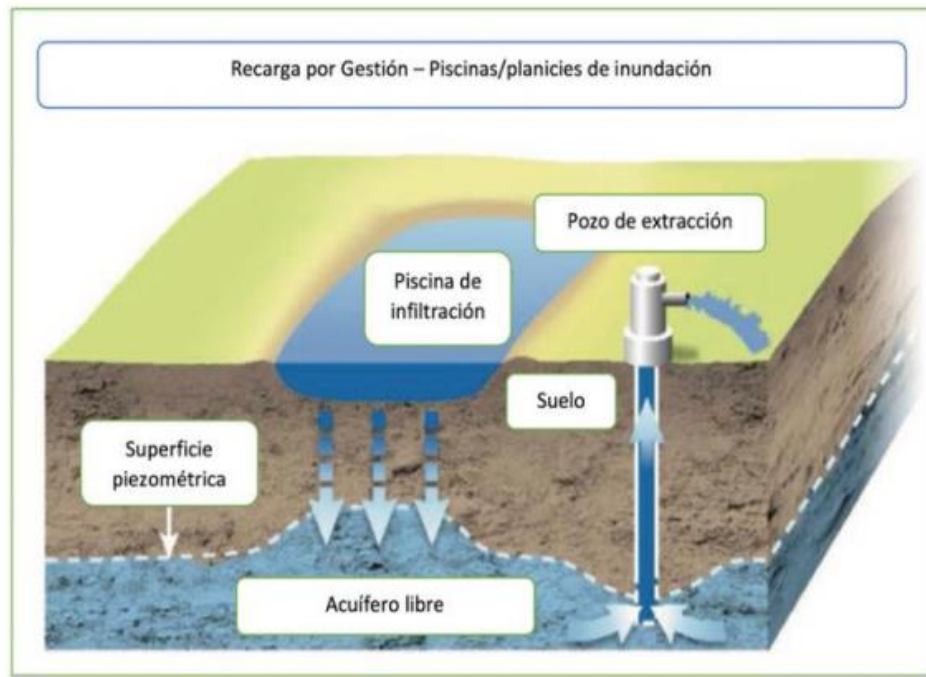


Figura 39: Ejemplo de la recarga de acuíferos gestionada con piscinas de infiltración. Extraído desde CNR.

Este método tiene la posibilidad de infiltrar grandes cantidades de agua a un costo relativamente bajo, debiendo tener en consideración la limpieza de las piscinas para evitar colmataciones excesivas que disminuyan el rendimiento en el tiempo.

Se consideró una piscina de 100 x 100 m (1 ha) de extensión, y un tiempo de funcionamiento de 90 días de acuerdo a la estadística hidrológica de los últimos años, con caudal para infiltrar disponible en los meses de noviembre (0.22 m³/s), diciembre (16.93 m³/s) y enero (8.47 m³/s) el cual estará limitado por la extensión y permeabilidad de las piscinas.

3.6 Modelación numérica.

La modelación numérica de la recarga artificial permite cuantificar los tiempos de tránsito del agua a través de la ZNS, estimar las tasas de infiltración y el volumen que pueden recargar las piscinas.

En este subcapítulo se realiza una breve descripción del modelo utilizado en la modelación, posteriormente se describe la parametrización del modelo, las condiciones iniciales y de borde, y la metodología utilizada para la elaboración de este. Se realizaron simulaciones a diferentes tiempos, con el fin de evaluar la recarga, determinar los efectos de los niveles que produce la infiltración, el tiempo que demora en llegar el frente de saturación al acuífero y cuantificar cuanto es el caudal capaz de infiltrar. Además, se realizó un análisis de sensibilidad respecto a la conductividad horizontal del acuífero receptor.

3.6.1 Descripción de HydroGeoSphere.

Para este estudio se utilizó el modelo HydroGeoSphere (HGS), el cual permite la representación 3D del frente de saturación durante la infiltración. Para la visualización de los resultados del modelo se utiliza el software Paraview, aplicación multiplataforma de código abierto que permite la visualización y análisis de datos vectoriales.

HydroGeoSphere es un simulador de elementos y diferencias finitas diseñado en Waterloo, Canadá, que permite modelar gran parte del ciclo hidrológico en tres dimensiones. Utiliza un enfoque implícito para resolver simultáneamente la ecuación de onda difusiva 2D de Saint Venant para el flujo de agua superficial, y la forma 3D de la ecuación de Richards para el flujo de saturación variable en el subsuelo. Además, permite la utilización del modelo constitutivo de Van Genuchten para relacionar las propiedades hidráulicas del suelo en función de la saturación.

HGS permite integrar dinámicamente componentes del ciclo hidrológico tales como la evaporación desde suelo y cuerpos de agua, transpiración, deshielo y flujos en medios de doble porosidad, tales como macro poros, fracturas, pozos y obras de drenaje (Aquanty, s.f).

3.6.2 Descripción de la estructura del modelo.

Lo primero que se definió es la geometría del modelo, los límites físicos de este y la resolución de la malla de diferencias finitas, las condiciones de borde y las condiciones iniciales, en función del modelo conceptual.

De esta forma, se establece la extensión del modelo 3D, con un largo del dominio tanto en “X” como en “Y” de 2000 m, discretizados en 50 bloques en ambas direcciones. Con respecto a la extensión en “Z”, se considera un solo estrato de 120 m de espesor de acuerdo a lo recopilado en el modelo conceptual, donde la conductividad hidráulica horizontal equivalente está determinada en función de las permeabilidades obtenidas de ensayos de bombeo.

Se realizó una discretización vertical del espesor del relleno en 15 subcapas de espesor variable tal de obtener información detallada en la zona no saturada, y de esta forma poder definir de mejor forma el frente descendente de saturación (Figura 40).

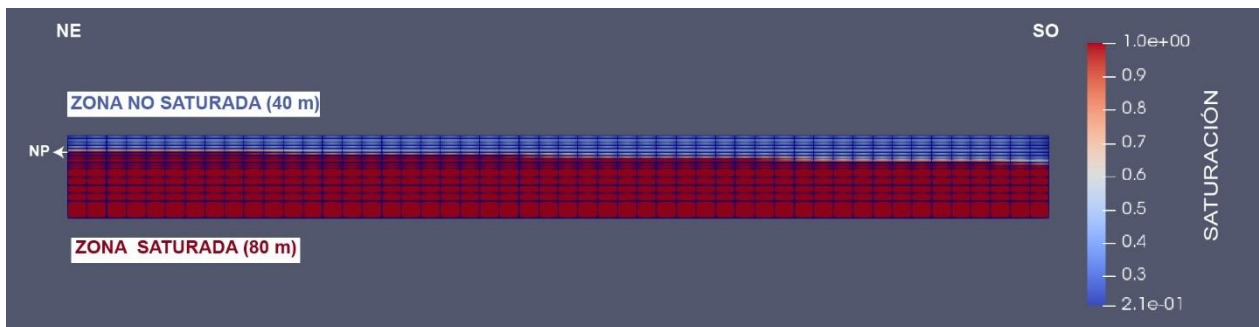


Figura 40: Vista desde el eje x de la discretización vertical del dominio. Extraída desde Paraview.

Con respecto a la condición inicial del modelo, esta corresponde a la carga impuesta por la profundidad del nivel freático que da el espesor de la ZNS del sector, la cual es estimada en 40 m. Esta condición inicial queda determinada por las condiciones de borde de niveles fijos impuestas en los extremos aguas arriba y aguas abajo del dominio, estableciendo un nivel piezométrico aguas arriba de 872 msnm y aguas debajo de 853 msnm, generando así, un gradiente hidráulico del orden de 0.95% bajo la piscina.

En cuanto al tamaño de la piscina de infiltración, esta presenta dimensiones de 100 x 100 m (1 ha) y ha sido considerada imponiendo una condición de nivel fijo en la superficie desde el tiempo de inicio de la infiltración hasta 90 días después, cuando se considera que no hay agua disponible para recargar. De esta forma se considera que la piscina se encuentra siempre llena durante los 90 días de recarga. La piscina fue posicionada más cercana al borde noreste del modelo a 50 m del sur del río Aconcagua (Figura 41).

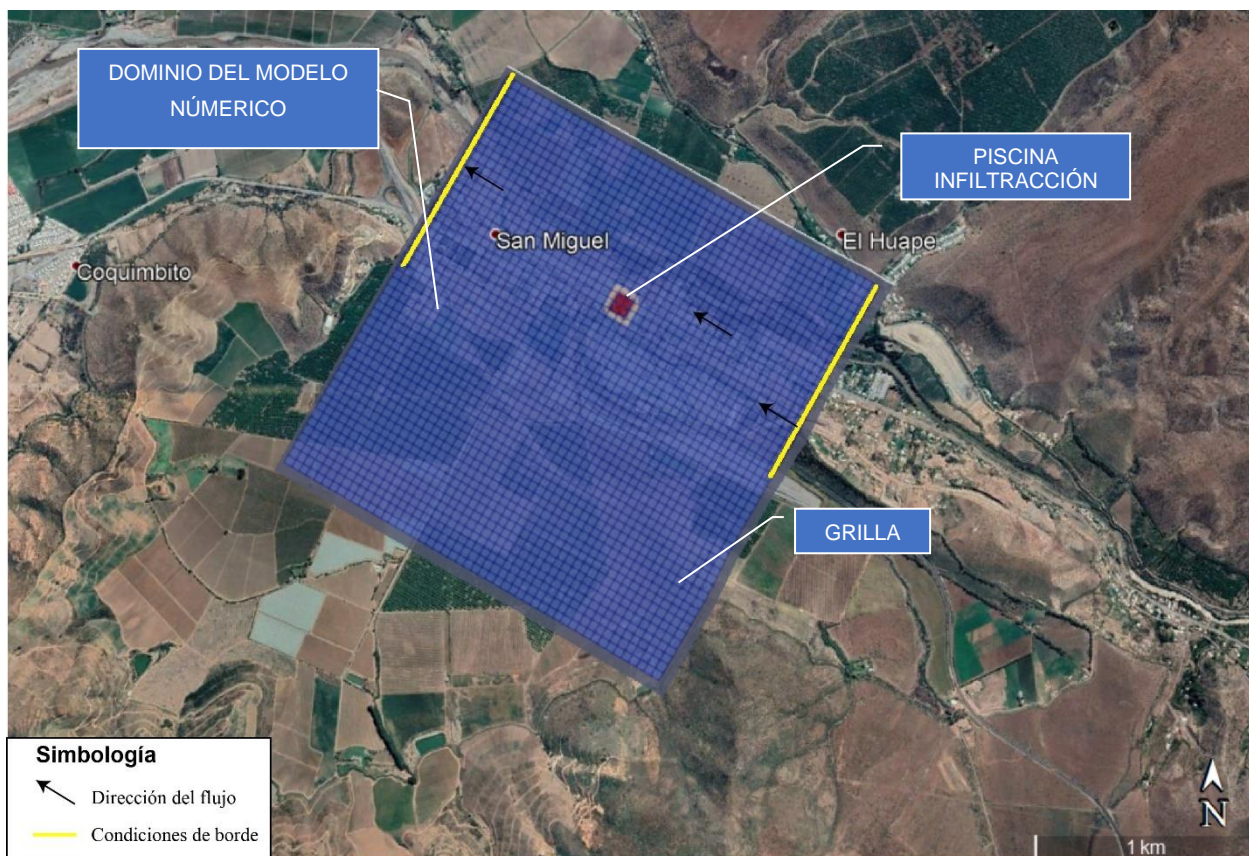


Figura 41: Vista desde el eje z de la definición de la grilla del dominio con la piscina de infiltración. Extraída desde Google Earth.

Para la parametrización del modelo se han considerado las propiedades del medio poroso y los parámetros hidráulicos de la zona no saturada que fueron estimados anteriormente en el modelo conceptual. Dadas las características del suelo se ha considerado anisotropía, con una conductividad hidráulica horizontal saturada equivalente (en x e y) de 25 m/día de acuerdo al promedio de las permeabilidades estimadas en el sector de estudio en los ensayos de bombeo revisados, y una conductividad hidráulica vertical saturada equivalente de 1 m/día.

En tanto el coeficiente de almacenamiento se considera en 0.13, estimado a partir de granulometría representativa mediante el software HYDRUS 1D, siendo un valor característico para este tipo de acuíferos (Espinoza, 2009). Los parámetros considerados en el modelo se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Parámetros ingresados al modelo.

Parámetros ingresados al modelo	Valor	Unidades
Tipo de conductividad hidráulica	Anisotrópica	-
Conductividad hidráulica en X	25	m/día
Conductividad hidráulica en Y	25	m/día
Conductividad hidráulica en Z	1	m/día
Almacenamiento específico	0.0001	1/m
Porosidad	0.13	-
Porosidad residual	0.017	-
Parámetros Van Genuchten		
Saturación residual	0.13	-
Alpha	3.4	1/m
Beta	1.48	-

3.6.3 Ubicación de la piscina de infiltración.

La selección de la ubicación de la piscina en el área de estudio se realiza considerando que la superficie donde esta se encuentre sea amplia y con poca pendiente. Lo más importante es que el lugar presente las condiciones hidrogeológicas necesarias para realizar la infiltración, es decir, que el acuífero sea libre, permeable, y presente un nivel estático lo suficientemente profundo para aumentar el almacenamiento en la ZNS. La transmisividad del acuífero determinará junto al gradiente hidráulico, la capacidad de redistribución del agua infiltrada luego de alcanzar la zona saturada. Es por esto que se ha escogido el sector al sureste de San Miguel para ubicar la piscina, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Parámetros hidráulicos y condiciones hidrogeológicas del área de estudio para seleccionar la piscina de infiltración.

Parámetros	Valor	Unidad
Nivel estático	40	m
Conductividad hidráulica horizontal	25	m/día
Conductividad hidráulica vertical	1	m/día
Transmisividad	1732	m ² /día
Pendiente	3°	-

3.6.4 Efectos de la recarga en el acuífero.

Se ha realizado un modelo simulando el proceso de recarga a través de la piscina de infiltración asumiendo el caudal disponible en el río en los meses de noviembre, diciembre y enero.

La simulación muestra que en el estado inicial el subsuelo se encuentra totalmente saturado a partir de aproximadamente 40 m de profundidad a un tiempo 0.01 días luego de comenzar la infiltración (Figura 42).

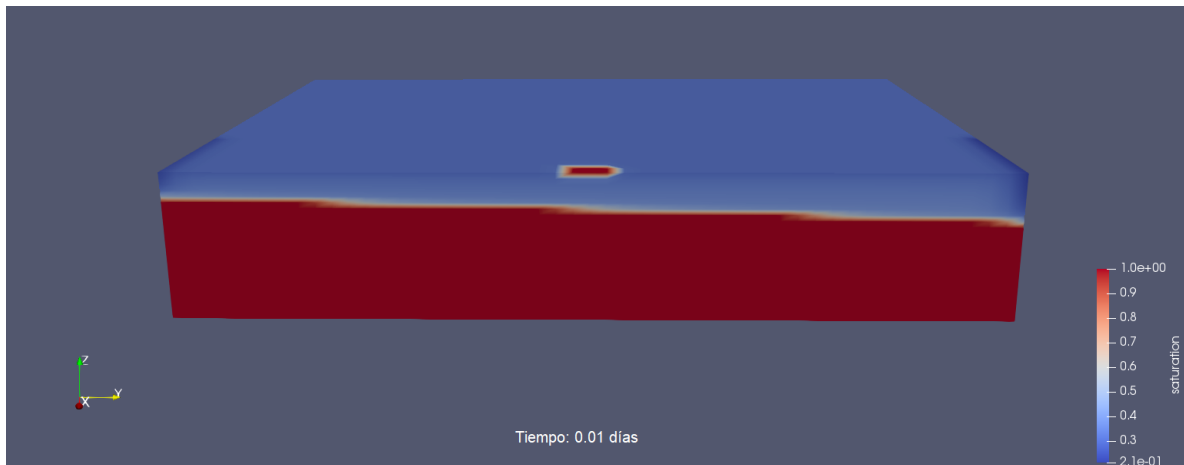


Figura 42: Simulación con exageración vertical del modelo en el estado inicial de saturación del subsuelo (tiempo 0.01 días). Extraída desde Paraview.

Comenzada la infiltración, la simulación indica que el frente de saturación demora aproximadamente 3.6 días en alcanzar el nivel freático. Este tiempo se encuentra en concordancia con el tiempo de 3.9 días estimado teóricamente, relacionando la conductividad hidráulica vertical saturada (K), el espesor de la ZNS (H) y el almacenamiento (S):

$$t = H * \frac{S}{K} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Para visualizar los resultados se muestran 6 tiempos claves en la infiltración, donde se puede ver el avance del frente de infiltración a través de la ZNS y el ascenso del domo de recarga a medida que la infiltración va recargando el acuífero durante un lapso de 90 días (Figura 43).

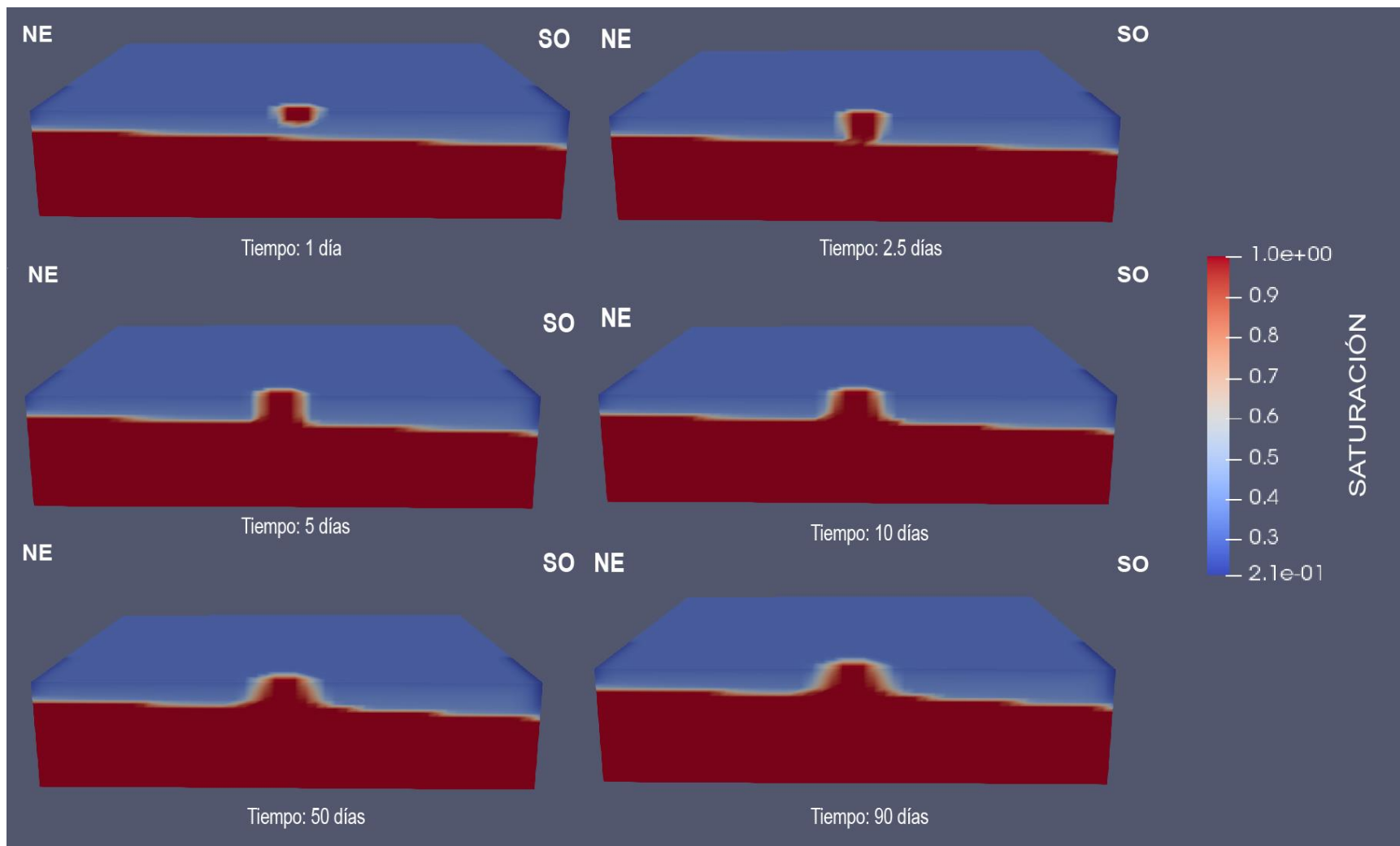


Figura 43: Simulaciones con exageración vertical del modelo en el área de estudio para diferentes tiempos posteriores al inicio de la recarga. Extraída desde Paraview.

En cuanto a la tasa de infiltración durante el periodo de recarga, existe una primera etapa transiente durante las primeras horas de infiltración, donde se observa una alta tasa de infiltración debido a que el suelo se encuentra seco y los gradientes hidráulicos son elevados. Luego se observa una etapa cuasi estacionaria, en que se alcanza una tasa menor de infiltración ($0.17 \text{ m}^3/\text{s}$) que se prolonga por 90 días. Posterior a esto se observa la disminución brusca de la tasa al terminar la infiltración en la superficie, asociada al proceso de desaturación de la ZNS (Figura 44; Figura 45).

Luego de que el frente alcanza la zona saturada del acuífero (3.6 días), se observa una estabilización de la tasa de infiltración, esto debido a que la transmisividad del acuífero es tal que permite una rápida redistribución del agua recargada, con la consecuente liberación continua del espacio en la ZNS, el cual es remplazado rápidamente por el agua infiltrada desde la superficie, sin modificarse significativamente el gradiente hidráulico local con la zona de infiltración.

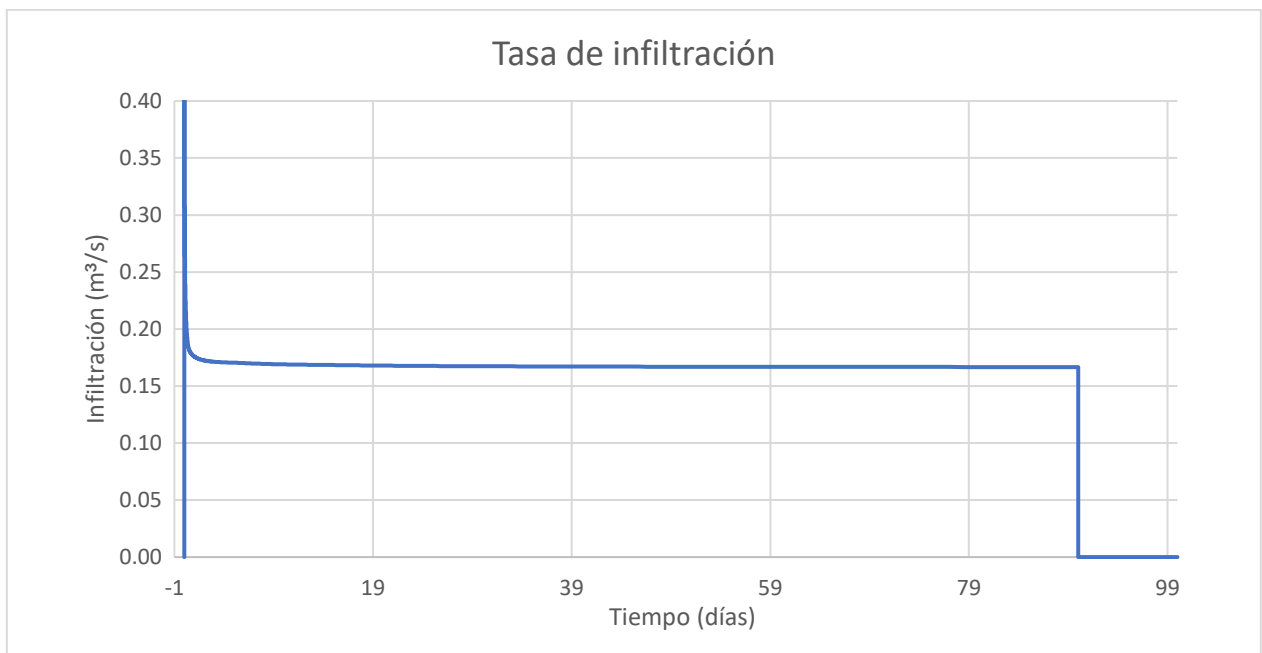


Figura 44: Gráfico de la tasa de infiltración en el área de estudio.

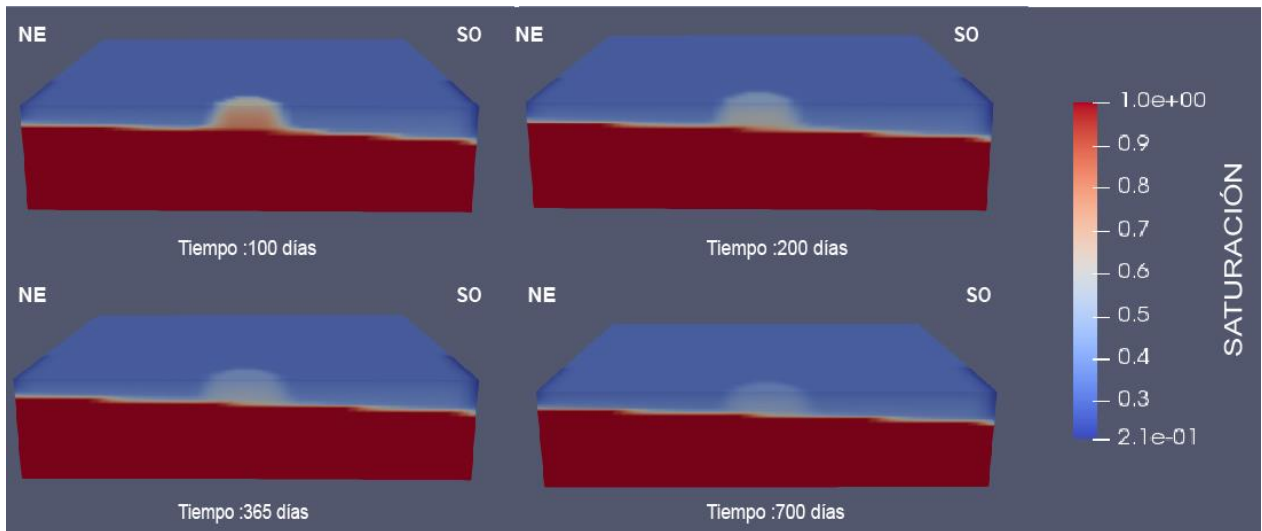


Figura 45: Simulación con exageración vertical del modelo del área de estudio luego de 100, 200, 365 y 700 días después de iniciada la recarga. Extraída desde Paraview.

Como es de esperar, especialmente los niveles piezométricos aumentan en mayor medida si se está cerca de la piscina, donde se observa el domo de recarga. De esta forma existe un movimiento de las isopiezas (Figura 46), alcanzándose un ascenso máximo del nivel bajo la piscina a los 90 días, para luego moverse asintóticamente al estado original antes de la recarga al dejar de infiltrar agua en superficie.

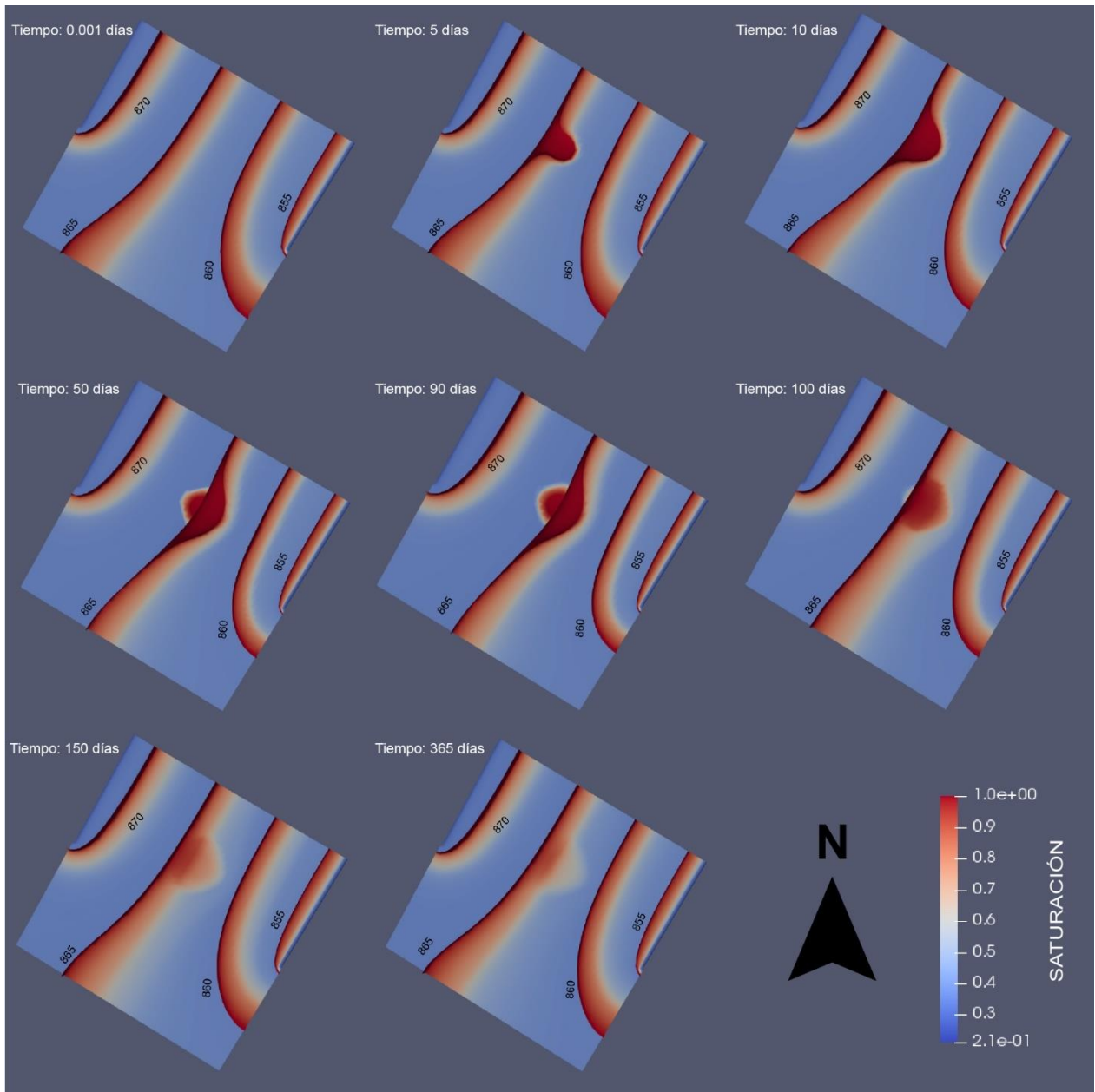


Figura 46: Movimiento de isopiezas durante y posterior a la infiltración. Extraída desde Paraview.

Cuantitativamente el aumento máximo de los niveles piezométricos a 50 m del borde de la piscina, se observan entre 6 y 11 m (Tabla 13). Luego, a los 400 días de iniciada la infiltración (310 días luego de que deja de infiltrar) el ascenso del nivel se encuentra entre los 50 a 20 cm sobre el nivel inicial.

Tabla 13: Niveles piezométricos a diferentes tiempos iniciada la infiltración y ascenso máximo de estos.

N°	Distancia del centro de la piscina (m)	Orientación	Nivel antes de la recarga	Nivel a los 90 días (msnm)	Nivel a los 200 días (msnm)	Nivel a los 400 días (msnm)	Máximo ascenso de niveles (m)
1	100.0	SO	863.4	869.0	863.8	863.6	5.6
2	100.0	NE	863.4	873.8	863.8	863.6	10.3
3	100.0	SE	864.2	871.4	864.6	864.2	7.2
4	100.0	NO	862.7	873.7	863.6	863.2	11.1
5	150.0	NE	863.5	869.0	863.7	863.6	5.5
6	150.0	SO	863.4	868.5	863.7	863.5	5.1
7	150.0	SE	864.6	868.9	865.3	864.9	4.3
8	150.0	NO	862.0	867.9	863.0	862.7	5.9
9	500.0	SE	867.7	868.8	868.5	867.8	1.1
10	500.0	NO	859.2	860.6	859.3	859.2	1.4
11	600.0	NE	863.5	864.9	863.6	863.5	1.4
12	650.0	SO	863.1	864.5	863.5	863.3	1.4

La magnitud del aumento del nivel piezométrico en el tiempo depende de la dirección en que se mida, respecto a la ubicación de la piscina, por ejemplo, a 150 m de esta se registra el mayor aumento 150 m al noroeste, aumentando hasta 6 m. Luego de transcurrir 400 días del comienzo de la infiltración (310 días luego de que deja de infiltrar), estos niveles se encuentran entre los 30 cm y 1 m sobre la condición inicial, en dirección noreste y noroeste respectivamente (Figura 47).

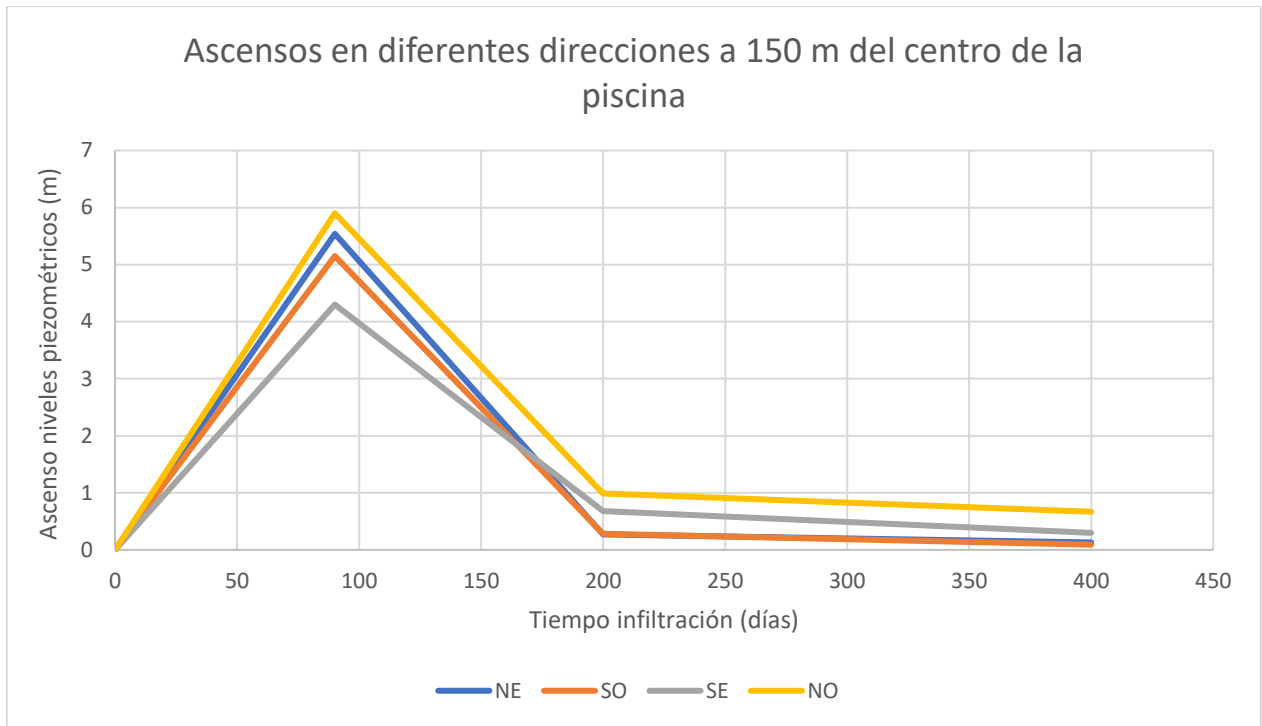


Figura 47: Gráfica del ascenso de los niveles piezométricos versus el tiempo de infiltración en pozos de observación ubicado a 150 m del centro de la piscina de infiltración en cuatro direcciones noreste (azul), suroeste (anaranjado), sureste (gris) y noroeste (amarillo.).

Los niveles piezométricos aumentan en el área de estudio durante los 90 días de infiltración en piscinas alcanzando el ascenso máximo, posterior a esto los niveles experimentan una bajada rápida, y a los 200 días, es decir, 110 días luego de que terminara la infiltración, los niveles se encuentran en 30 cm sobre el nivel original.

El ascenso máximo que se percibe a los 90 días al extremo suroeste del modelo (1350 m desde el centro de la piscina) es de 1 m, mientras que al extremo noreste del modelo (650 m del centro de la piscina) el ascenso es de 1.2 m, siendo estos los máximos más bajos que se obtienen en el transcurso de la operación de la piscina (Figura 48).

Cabe mencionar que, en la gráfica del borde noreste, el ascenso se muestra con una curva mucho más puntiaguda y un descenso en ella más brusco a lo ocurrido en el borde suroeste, debido a que en el noreste se encuentran las condiciones de borde, los cuales permiten que se generen mayores gradientes y movimiento de agua. Adicionalmente, los niveles se mantienen por más tiempo en el borde suroeste del modelo, debido a que este se encuentra más lejano a la piscina (Figura 48).

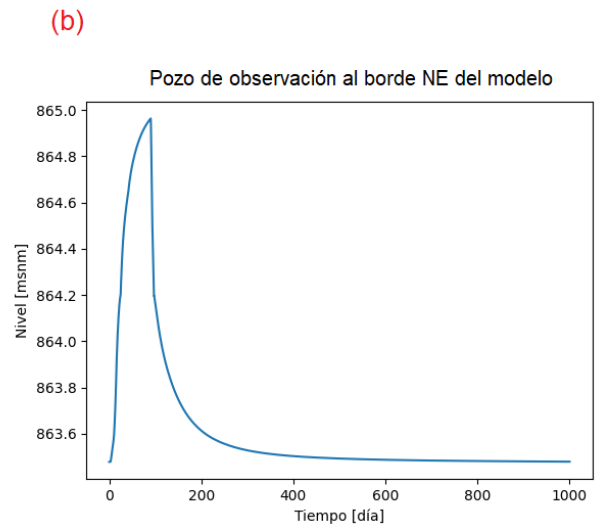
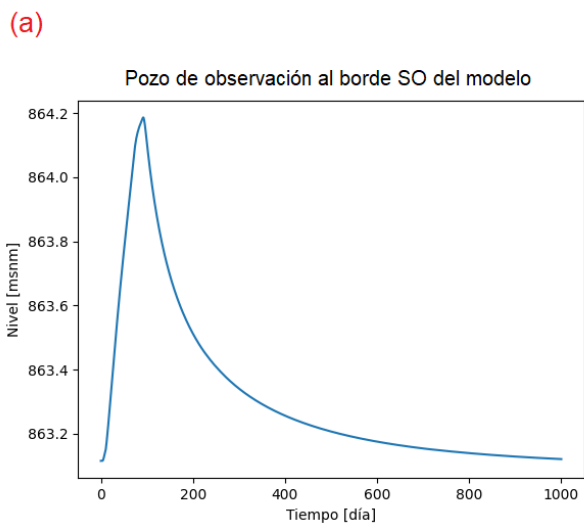
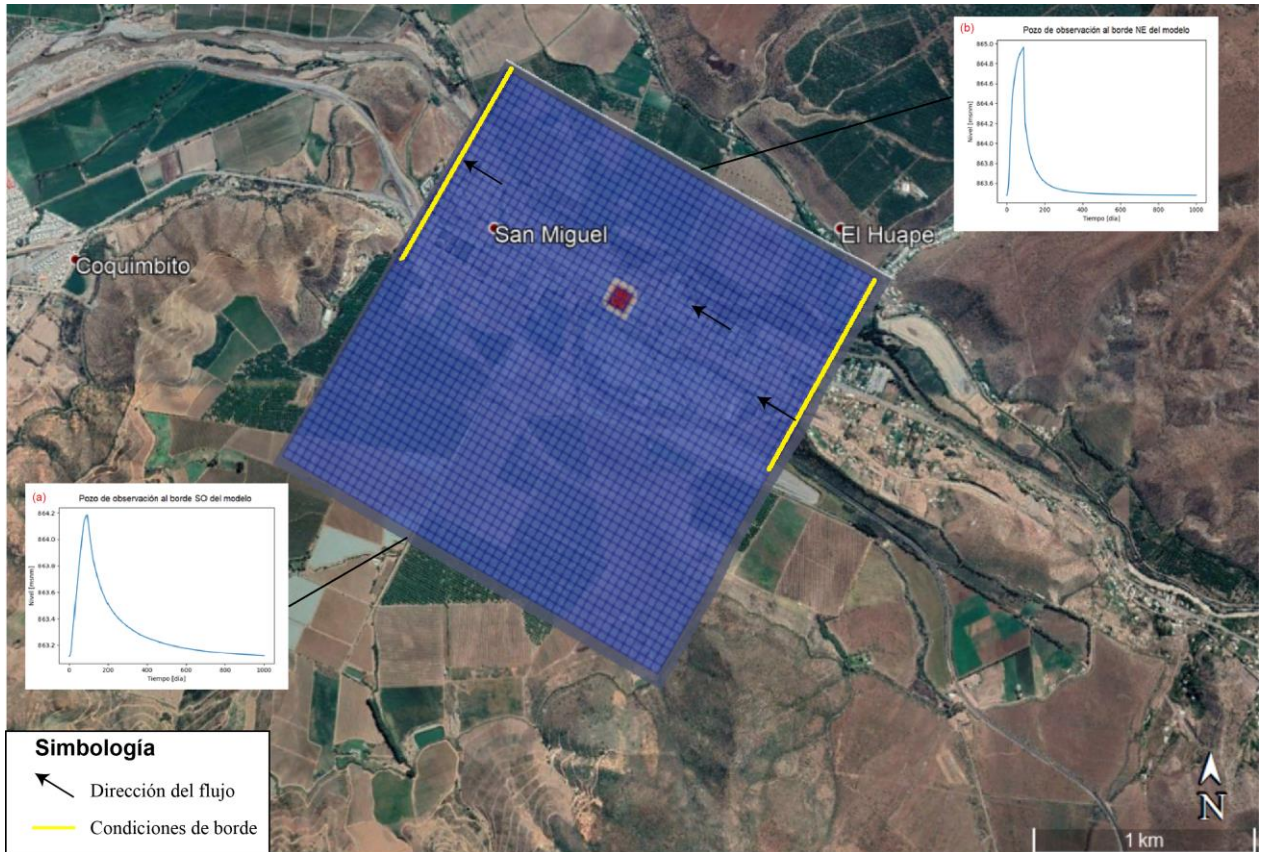


Figura 48: Imagen satelital con los gráficos de los pozos de observación en el borde noreste y suroeste del modelo numérico. Extraído de Google Earth.

El volumen de recarga estimado durante el primer día de infiltración es de 19.503 m³, mientras que el volumen recargado durante todo el periodo de infiltración (90 días) se estima en 1.370.410 m³ (Figura 49).

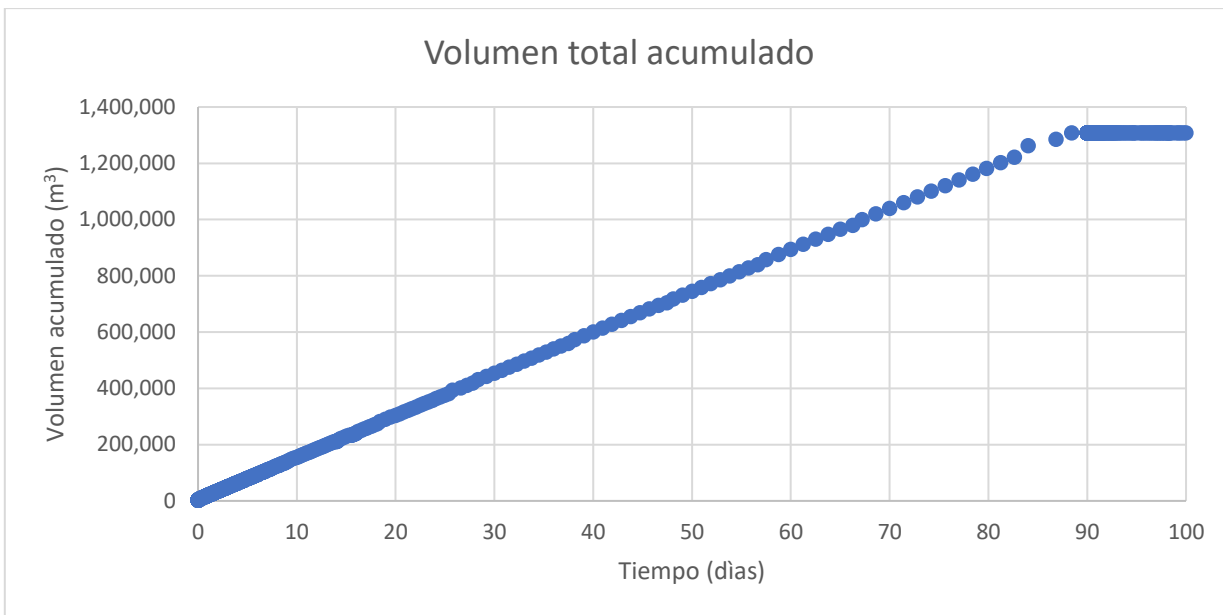


Figura 49: Gráfico del volumen total acumulado en el tiempo de la recarga artificial.

3.7 Análisis de sensibilidad.

Se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo y de la recarga respecto a la conductividad hidráulica horizontal considerada para el acuífero receptor.

Al momento de variar la conductividad hidráulica saturada horizontal la tasa de infiltración se ve afectada como se muestra en la Figura 50. Los tres casos tienen un alto incremento durante las primeras horas, posterior a esto se estabilizan mientras el frente avanza a través de la ZNS a un gradiente hidráulico unitario. Al momento de la conexión hidráulica con la zona saturada del acuífero, disminuye gradualmente el gradiente hidráulico al comenzar a formarse el domo de recarga, hasta alcanzar una nueva tasa de infiltración menor para las conductividades horizontales más bajas consideradas.

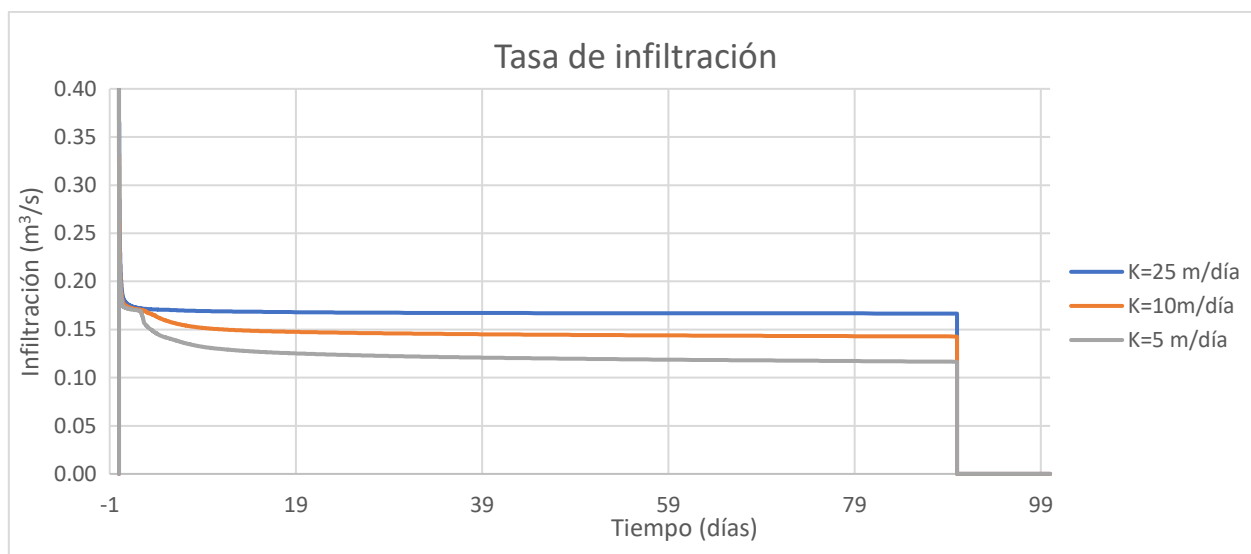


Figura 50: Análisis de sensibilidad del modelo respecto a la conductividad hidráulica horizontal, en azul 25 m/día, en anaranjado 10 m/día y en gris 5 m/día.

Esto se puede observar en la Figura 51, donde se logra ver que a 1350 m del centro de la piscina en dirección suroeste del modelo y para una conductividad de 5 m/día, se tiene el máximo de ascenso del nivel piezométrico a los 140 días aproximadamente, mientras que en el modelo de 25 m/día el ascenso máximo se produce a los 90 días. Por otro lado, podemos apreciar que los niveles piezométricos a los 400 días de simulación son mayores en el modelo que considera una conductividad hidráulica de 5 m/día.

A 650 m del centro de la piscina en dirección noreste, se da un comportamiento similar de los ascensos, observándose un ascenso mayor en el modelo de conductividad hidráulica de 5 m/día que en el de 25 m/día.

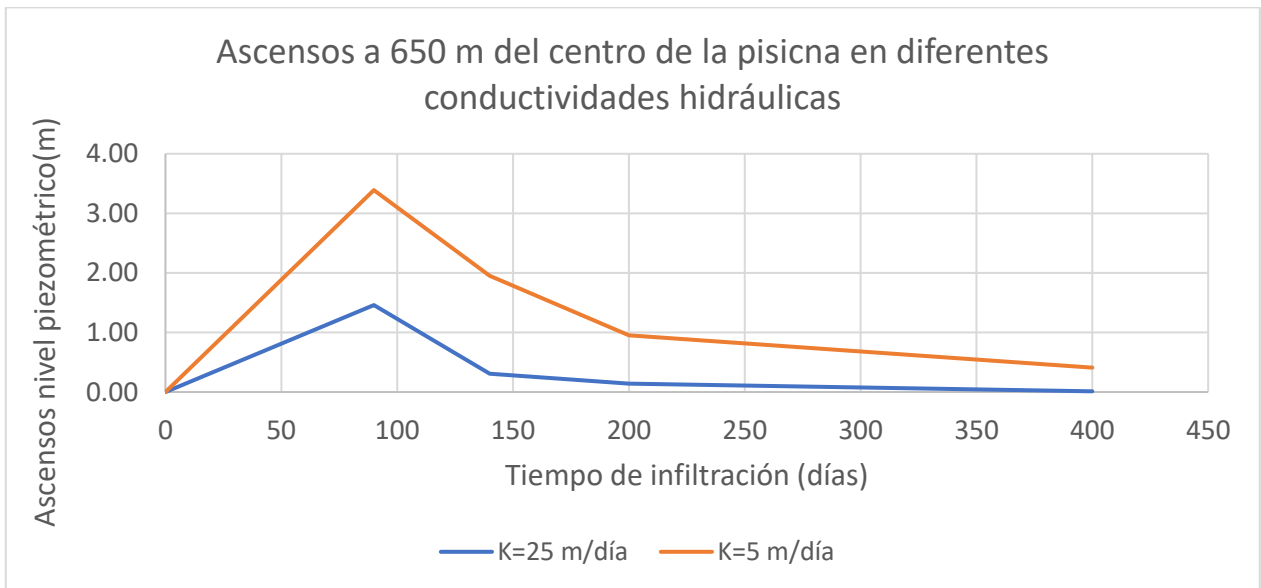
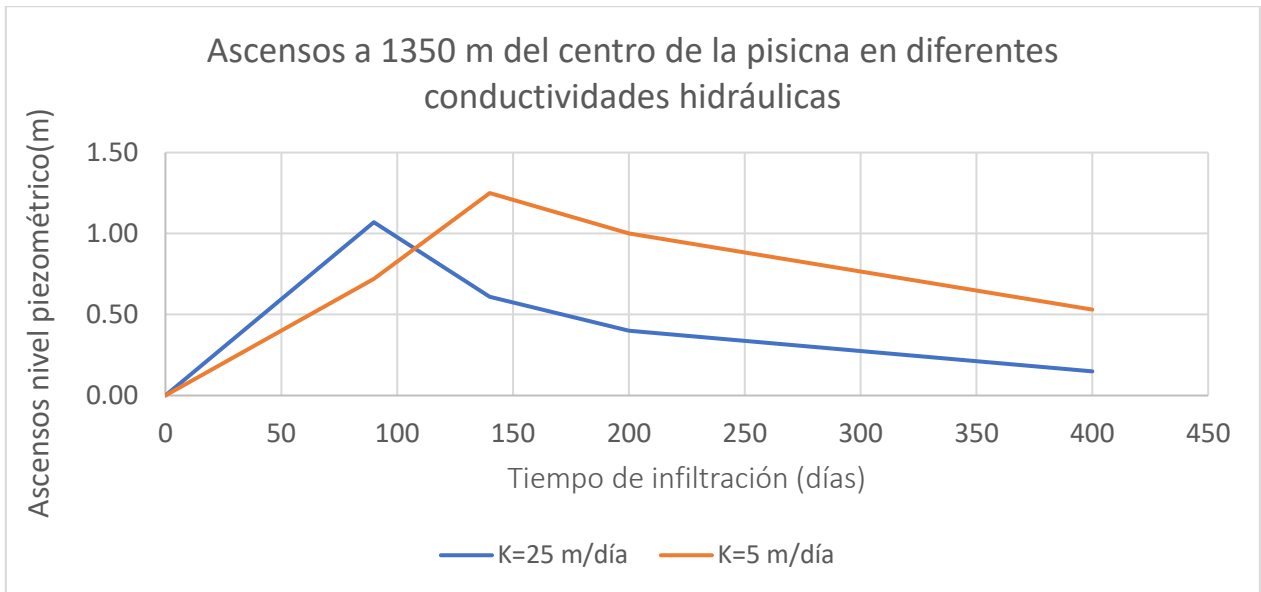


Figura 51: Gráficos de los pozos de observación al borde SO (1350 m del centro de la piscina) y NE (650 m del centro de la piscina) del modelo para las conductividades de 25 (azul) y 5 m/día (anaranjado).

No obstante, a pesar de que el agua sea retenida por más tiempo en el acuífero y los ascensos mayores, la tasa de infiltración es menor al momento de alcanzar la zona saturada, lo que genera

que haya un menor volumen total recargando el acuífero (936.562 m^3) (Figura 52), teniendo una diferencia de más de 430.000 m^3 con respecto al modelo de 25 m/día .

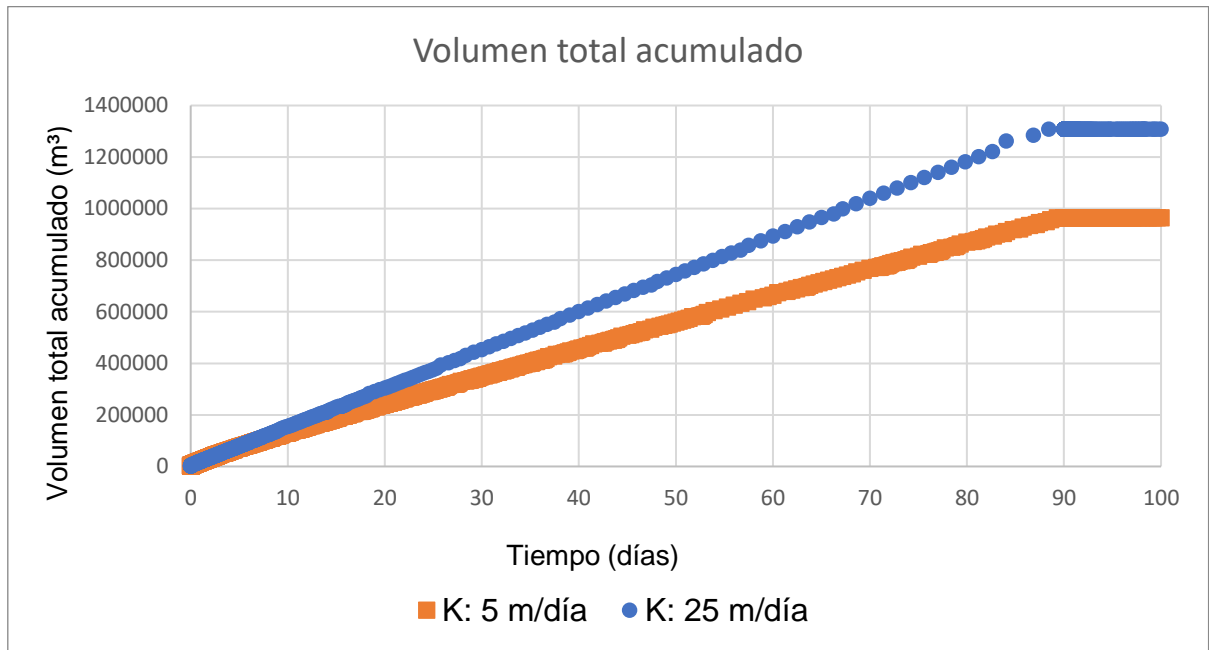


Figura 52: Volumen acumulado de la recarga en el modelo de conductividad hidráulica horizontal saturada de 25 y 5 m/día de color azul y anaranjado respectivamente.

4. Discusión.

Para enfrentar el problema de escasez hídrica en que se encuentra inmersa la zona central de Chile, específicamente la región de Valparaíso, se considera que la recarga artificial puede ser una solución efectiva, segura y fiable que permite aumentar la disponibilidad de agua en zonas de alta demanda. Los principales proyectos de recarga artificial que se han desarrollado en Chile son del tipo pozos de inyección y lagunas/piscinas de infiltración siendo este último mecanismo el evaluado en la presente investigación.

Respecto a los criterios para la selección del sector potencial para realizar la recarga artificial, los parámetros más relevantes de considerar son la estratigrafía de la zona no saturada, la profundidad del nivel freático, la permeabilidad del acuífero, la disponibilidad de agua para infiltrar y a quien va a favorecer.

En el presente trabajo se ha evaluado el área situada en el sector de San Miguel- El Huape, comuna de San Esteban en la provincia de los Andes. El análisis de antecedentes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de esta zona ha permitido evaluar las características del sistema acuífero y la viabilidad que posee el sector para realizar un proyecto de recarga mediante piscinas de infiltración. El acuífero presenta un espesor de la ZNS del orden de 40 m, una conductividad horizontal del acuífero estimada en 25 m/día y se asume una conductividad vertical de 1 m/día.

Se ha verificado que la metodología empleada permite evaluar y cuantificar la recarga artificial. Por un lado, ha sido posible determinar la existencia de disponibilidad de agua para ser utilizada para la recarga, mientras que utilizando herramientas de modelación numérica se ha determinado que los efectos de la recarga artificial en el sector son favorables.

4.1 Disponibilidad de agua para ser utilizada en la recarga artificial.

El resultado óptimo de la recarga artificial está determinado por la disponibilidad de agua para ser utilizada, la cual se definió en este estudio según el excedente de la demanda de agua superficial y el caudal ecológico del río Aconcagua aguas arriba del sector en donde se realizaría la recarga (San Miguel- El Huape).

Las variables por considerar para evaluar la validez y confiabilidad de este resultado corresponderán a que los usuarios de derechos consuntivos superficiales desde el punto de la recarga hasta la desembocadura puedan garantizar su extracción y que el caudal del río en la

estación Chacabuquito se encuentre dentro de lo indicado por las estadísticas proporcionadas por la DGA.

Con el fin de aumentar la disponibilidad de los recursos hídricos para la infiltración artificial de los acuíferos, se propone generar un acuerdo o convenio, con los tenedores de derechos de aprovechamiento superficiales, para emplear en los periodos de no uso, las aguas de que disponen con el fin de infiltrarlas en el suelo. Este convenio que podría suscribirse entre la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP y las Juntas de Vigilancia de las secciones del río Aconcagua.

El mencionado acuerdo permitiría planificar adecuadamente el uso de recursos hídricos concedidos para uso agrícola en los periodos de otoño invierno, aumentando los volúmenes de infiltración.

4.2 Descenso de los niveles piezométricos.

Se realizó una campaña de monitoreo para conocer los niveles de agua actuales del área de estudio, dado que la información de profundidad de los niveles encontrada en los derechos de aprovechamiento pertenece a los años entre 1968 a 1998, los cuales carecen de información actual, sin embargo, permiten conocer la evolución de los niveles en el sector como datos históricos.

En esta visita a terreno se midieron profundidades del nivel de agua de 52-59 m, lo cual, al compararlo con los antecedentes históricos presentes en los derechos de aprovechamiento, nos indica que los niveles piezométricos del sector han disminuido. Por ejemplo, en uno de los sectores medidos (zona APR El Sauce) en el año 1998 el nivel freático se encontraba a los 41 m y en septiembre del año 2020 este nivel se encontraba a 59 m de profundidad, evidenciando una disminución de 18 m. Además de observarse la diferencia en el APR El Sauce, también se observa en el APR San Miguel- El Huape, evidenciando descensos en los niveles de hasta 13 m en los últimos tres años.

Esto concuerda con los resultados expuestos en la evolución temporal de niveles de los APR, donde en los últimos tres años también se ha visto una disminución de los niveles entre 13 y 9 m. Además, otros estudios realizados por WSP Consulting (2019) también mencionan que el acuífero de San Felipe, acuífero perteneciente al área de estudio, ha sufrido disminuciones en los niveles que bordean los 20 m.

Las causas probables de esta disminución en los niveles podrían asociarse al decrecimiento del caudal del río Aconcagua en el sector, siendo el río la principal fuente de recarga del acuífero. Esto podría ser debido al déficit de precipitaciones, como se muestra en la Figura 17, existe una correlación directa entre estas variables.

4.3 Modelación.

En relación a los parámetros utilizados para la modelación, estos fueron establecidos según los resultados del modelo conceptual previamente realizado. En consideración de las condiciones de bordes impuestas, se realizó un modelo simplificado en cuanto a la estratigrafía, asumiendo condiciones de permeabilidad equivalente en la vertical, con una anisotropía vertical para representar la estratificación del acuífero.

Para simplificar las simulaciones del modelo no fue considerado el río Aconcagua como condición de borde para evaluar, especialmente, las condiciones de infiltración de la piscina en el acuífero. Los resultados obtenidos demuestran que la condición de recarga no se vería afectada de manera importante dada la alta transmisividad de este. De haberse considerado el río, los niveles en cercanía de la piscina se verían levemente aumentados generando un nivel ligeramente superior al impuesto en el modelo y concentrándose la infiltración al lado opuesto del río.

Los resultados del modelo en el sector de San Miguel- El Huape indican que la recarga artificial permite un ascenso significativo en los niveles piezométricos locales durante los meses en que se realiza la infiltración (tres meses), ya que estos se ven aumentados entre 11 y 6 m a 100 m del centro de la piscina. Sin embargo, las características del acuífero, en particular su elevada transmisividad, condicionarían una distribución rápida del agua al momento de terminar la infiltración, por lo que existe un escaso tiempo de permanencia en el aumento de los niveles piezométricos, prolongándose por tres meses. De esta forma, la recarga y los niveles piezométricos están controlados por la difusividad del acuífero.

Esto ha sido considerado en el análisis de sensibilidad, donde se pone a prueba la sensibilidad de la conductividad hidráulica horizontal, ya que muestran que para cualquier valor de conductividad horizontal (K_h) la infiltración tiene un límite superior de una tasa de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ controlada por la conductividad vertical (K_v). Esto nos indica que la simulación no es sensible al aumento de la K_h , ya que la infiltración en la zona de estudio no aumentaría, sino que es sensible a valores bajos de la K_h , sin embargo, en el área de estudio los valores de permeabilidad se

encuentran en promedio entre 25 y 50 m/día lo que provoca que el modelo tenga muy poca incertidumbre.

Si la conductividad hidráulica horizontal del acuífero fuese menor disminuiría la recarga total, pero aumentarían los ascensos del nivel producto de esta, prolongándose el ascenso por más tiempo, con un mayor beneficio local. Por el contrario, de presentarse conductividades hidráulicas horizontales mayores en el acuífero receptor (>25 m/día), no variaría la tasa de infiltración ni la recarga estimada en el tiempo, estando limitada por la conductividad vertical y un gradiente hidráulico unitario, a la vez que se tendría un descenso más rápido de los niveles luego de la infiltración.

La conductividad vertical (K_v) del acuífero está relacionada con la capacidad de transportar el agua por la ZNS durante el proceso de infiltración, y el tiempo de tránsito que se demore el agua infiltrada a la zona saturada será menor si es que la K_v es mayor. De lo contrario, si la K_v es menor, el tiempo de tránsito que se demore en llegar el frente de infiltración al acuífero es mayor. Por otro lado, la conductividad horizontal (K_h) está relacionada al momento en que el agua infiltrada alcanza el nivel freático, en este momento, si el acuífero no es capaz de redistribuir el agua infiltrada, se producirá un domo de recarga, con esto una baja del gradiente hidráulico en la zona de infiltración y así, una disminución de esta.

4.4 Alcances del proyecto.

A pesar de que la recopilación de antecedentes estratigráficos y geológicos para la identificación de las unidades hidrogeológicas fue fundamental para estimar las características que posee el sector en profundidad, se considera necesario realizar estudios de geofísica por ejemplo del tipo TEM o ERT y sondajes que permitan su calibración, además de realizar pruebas hidráulicas en dichos sondajes para conocer los parámetros hidráulicos bajo la piscina de infiltración.

Complementar con esta metodología permitiría disminuir la incertidumbre y evitar, por ejemplo, la omisión de una capa de arcilla (baja permeabilidad) en el modelo, sobreestimando el resultado de la recarga artificial, ya que la presencia de una de estas capas podría dificultar el proceso de recarga, producto de que la conductividad vertical (K_v) disminuiría, aumentando el tiempo de tránsito del agua desde la superficie hasta el acuífero.

Considerando que el estudio realizado contempla los aspectos hidrogeológicos clásicos y el desarrollo de un modelo conceptual y numérico, este podría ser utilizado de base para analizar un plan de operación y/o fase piloto de la recarga. Además, con la información recopilada en

dicho modelo conceptual se podría realizar una evaluación de carácter ambiental. al momento de la toma de decisiones ante un posible proyecto de recarga en el sector.

Este proyecto tiene un beneficio principalmente local, aportando información principalmente a los usuarios del APR El Sauce y a los derechos otorgados aledaños al sector, ya que es en la zona cercana a la piscina (1000 m) donde se observan los mayores efectos de la recarga artificial. En dicha zona del APR se podría aumentar el caudal de extracción o realizar unos pozos que proporcionen ayuda a los más afectados con la sequía del sector.

Si se considera la disponibilidad de agua presente en el sector y la tasa de infiltración de la ZNS, se podría aumentar la superficie de recarga con piscinas de mayor tamaño para que sean operadas durante los meses de diciembre y enero, dado que el caudal disponible para noviembre no daría abasto. Por lo que con la información recopilada se podría crear un nuevo modelo para ver la simulación de estos nuevos proyectos.

Por otro lado, sería importante considerar el proceso de operación de la piscina, ya que, si se tuviera una batería de pozos de extracción en el mismo lugar se podría maximizar la infiltración en función de las depresiones generadas. Esto generaría espacio disponible para infiltrar agua en el acuífero permitiendo la recarga de más agua a éste y distribuirla hacia más lugares donde sea necesaria.

4.5 Gestión y planificación.

Una adecuada gestión de los recursos hídricos necesariamente debe contemplar una correcta cuantificación de estos, considerando la infraestructura para su monitoreo y medición. Por otro lado, es necesario conocer con certeza las demandas y sus usos, sus asignaciones de extracción y realizar un monitoreo permanente y continuo de las extracciones. Además, conocer las características hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca permitirá junto a los otros aspectos mencionado construir un modelo hidrogeológico de dicha cuenca, lo que sería fundamental para gestionar los recursos hídricos de la cuenca y promover un adecuado balance de la misma.

Una herramienta interesante para la gestión de recurso hídrico es la recarga artificial de acuíferos que permiten almacenar en el suelo recurso disponibles para ser usados en periodos posteriores.

Desde la adopción del código de aguas en 1981, la asignación y el uso de los recursos hídricos se basan en un sistema de asignación de derechos, en algunas cuencas se han concedido

derechos excesivos lo que significó sobreexplotación de cuencas. Esto, sumado a la falta de conocimiento de los recursos hidrogeológicos, exigen una gestión eficaz del agua.

En la reforma del Código de aguas del año 2005, se impusieron normativas más estrictas sobre la gestión de aguas subterráneas para la concesión de nuevos derechos de agua. Sin embargo, existe falta de información y falencias en la fiscalización de estas medidas.

Lo que se debería implementar y discutir es que los nuevos derechos de agua sean solo temporales y no vitalicios como lo son ahora, para no reducir la capacidad de recuperación de los sistemas acuíferos o tal vez fortalecer alguna medida de control de la cantidad de agua extraída. Además, se propone la restricción de los derechos de agua para resguardar el interés público o simplemente reducir la cuota de extracción de estos derechos cuando se presenten periodo de sequía. Por otro lado, se debería facilitar el acceso al registro público de aguas y modificar la reglamentación para la asignación de nuevos derechos en las zonas en las que exista disponibilidad, y fundamentalmente revisar la metodología que permite establecer la disponibilidad de recursos.

Sin duda se debe mejorar la asignación de los derechos de agua y aumentar la fiscalización de extracción del recurso conforme a los derechos para no exceder la capacidad sostenible del sistema acuífero, reforzando las herramientas de fiscalización de la entidad encargada de esta área.

5. Conclusión.

A partir de una revisión y análisis de antecedentes tanto geológicos como hidrológicos, se logró desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual del sector de Coquimbito - San Miguel ubicado en la primera sección del río Aconcagua.

El acuífero que se encuentra en el sector de Coquimbito - San Miguel se desarrolla en materiales cuaternarios no consolidados de origen aluvial, compuestos por granulometría gruesa con pequeñas cantidades de arcillas. El acuífero está conformado por tres subunidades permeables y una de muy baja o nula permeabilidad primaria definida como basamento.

La primera unidad que se designó con el nombre de Unidad Superior se encuentra en la parte superior del acuífero y está compuesta por sedimentos de granulometría principalmente gruesa con presencia en la matriz de poca cantidad de arcilla. Esta unidad se reconoce desde la localidad de San Miguel hasta Coquimbito, presentando una potencia variable, siendo su máxima en el sector de San Miguel con 100 m, y presentando un espesor estimado en 40 m en el sector de Coquimbito.

La Unidad Intermedia se encuentra restringida en la locación, dado que solo se encuentra al este del área de estudio. Presenta una potencia de 15 m en el sector del Huape hasta los 40 m al norte de San Miguel, y a diferencia de la Unidad Superior ésta presenta una matriz de arcillosa (>25%).

La Unidad Inferior presenta una morfología lenticular en la zona sur de San Miguel y está asociada a sedimentos heterogéneos con mayor presencia de material arcilloso y menor cantidad de material grueso (<20%), presentando una potencia del orden de 30 m.

En los últimos 3 años en el sector, se ha visto una importante disminución de los niveles, llegando hasta 20 m con relación al año 2017. En la actualidad la profundidad de nivel de agua subterránea en el sector de San Miguel se encontraría entre los 40 y 45 m.

En cuanto a los parámetros hidráulicos, se logró obtener información a partir de los ensayos de bombeo de expedientes de pozos, los cuales indican que las permeabilidades en las localidades de Coquimbito y San Miguel se encontrarían generalmente entre los 20 y 50 m/día con transmisividades entre los 2000 y 3000 m²/día.

Considerando la estadística hidrológica de los últimos 30 años, se estimó que existen 3 meses con disponibilidad (90 días), correspondientes al mes de noviembre, diciembre y enero, con

caudal disponible de 0.22, 16.93 y 8.47 m³/s respectivamente, valores que fueron utilizados para evaluar la recarga.

En esta investigación se realizó una simulación de la infiltración continua durante 90 días. Comenzando con la piscina llena, se simuló el proceso de la recarga para conocer el tiempo de tránsito del agua recargada hasta el acuífero, determinar los efectos de los niveles que produce el agua recargada en el acuífero tanto espacial como temporalmente y cuantificar el caudal capaz de infiltrar.

El modelo numérico de la zona no saturada y saturada entregó los siguientes resultados:

- La llegada del frente de agua infiltrado a la zona saturada del acuífero demoró 3.6 días medidos desde el comienzo de la infiltración.
- La tasa de infiltración alcanzada es de 0.17 m³/s, lo cual es menor que caudal disponible en los meses de noviembre (0.22 m³/s), diciembre (16.93 m³/s) y enero (8.47 m³/s).
- Espacialmente los niveles piezométricos aumentan en mayor medida si se está cerca de la piscina, donde se observa el domo de recarga. A 100 m del centro de la piscina aumentan los niveles piezométricos entre 6 y 11 m, mientras que a 150 del centro de la piscina aumentan de 4 a 6 m.
- Los niveles piezométricos aumentan durante los 90 días de infiltración, donde alcanzan el ascenso máximo, posterior a esto se genera un descenso continuo de los niveles piezométricos, quedando del orden de 30 cm sobre el nivel inicial luego de los 100 días de finalizar la infiltración.
- El aumento de los niveles piezométricos a 1350 m desde el centro de la piscina es de 1 m, mientras que al extremo noreste del modelo (650 m del centro de la piscina) el ascenso es de 1.2 m
- El volumen infiltrado durante el primer día es de 19.503 m³ y el acumulado durante los 90 días es de 1.370.410 m³.

Se puede concluir que la distribución y la efectividad de la recarga queda determinada principalmente por la conductividad hidráulica vertical y transmisividad del acuífero receptor.

La metodología elaborada ha permitido estimar el agua disponible para recargar artificialmente al acuífero, evaluar los beneficios de dicha recarga sobre el acuífero y permitió reducir las incertidumbres en la toma de decisiones para la materialización de la recarga artificial de acuíferos.

5.1 Recomendaciones.

Se recomienda efectuar ensayos de infiltración “insitu” y sondajes de exploración con pruebas de permeabilidad en el área de estudio para reducir la incertidumbre asociada a la estratigrafía local y los parámetros hidráulicos de la zona no saturada estimados para el modelo de Van Genuchten.

Por otro lado, se recomienda estudiar la posibilidad y factibilidad de utilizar los derechos remanentes de los regantes en el periodo de no regadío para ser utilizados en procesos de infiltración, lo que se podría lograr con la materialización de un convenio con la junta de vigilancia correspondiente a la primera sección del río Aconcagua.

Se recomienda utilizar el modelo para realizar una simulación continua con periodos de recarga sucesivos para ver cuáles serían los efectos en el acuífero a una escala regional, y ver así si existe un mayor alcance de beneficiarios producto de la recarga.

Por último, y no menos importante, se recomienda realizar una mayor gestión y planificación de los recursos hídricos del sector, ya que esto es fundamental para evitar el deterioro, sobreexplotación de los acuíferos, permitiendo enfrentar mejor los problemas de escasez del agua en el futuro cercano.

6. Bibliografía.

Aluvial. (2020). Estudio hidrogeológico para la evaluación de piscinas de infiltración, acuífero de San Felipe.

Aquanty. (s.f). Aquanty. HydroGeoSphere <https://www.aquanty.com/hydrogeosphere>

Ayora, M., 2006. Análisis de agua. [online] Wwww4.ujaen.es. Disponible en http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia_archivos/Quimica%20analitica%20ambiental/tema%2010.pdf

Biblioteca Congreso Nacional (BCN). (2017). Reportes comunales. Recuperado de <https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/repordf.html?anno=2017&idcom=5304>

Boettiger, C., 2013. Caudal ecológico o mínimo: regulación, críticas y desafíos. Recuperado de: https://derecho.udd.cl/centro-justicia constitucional/files/2015/11/Caudal_ecologico_o_minimo_regulacion_cri.pdf

Centro de Ciencia del Clima y la resiliencia. (2015). La mega sequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Recuperado de <http://www.cr2.cl/informe-a-la-nacion-la-megasequia-2010-2015-una-leccion-para-el-futuro/>

CEPAL, N. (2016). Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile. CEPAL.

Comisión Nacional de Riego (CNR). (s.f). Guía metodológica “Marco operativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos”. Recuperado de https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/Guia-Methodologica-y-fichas-280720_ver_final_3.pdf

Comisión Nacional de Riego (CNR). (2016). Diagnostico para desarrollar plan de riego en cuenca de Aconcagua. Recuperado de http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26599/CNR-0249_1.pdf

Dirección General de Aguas (DGA). (2004a). Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Aconcagua. Informe Técnico S.D.T. N° 165. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/SUP3099.pdf>

Dirección General de Aguas (DGA). (2004b). Diagnóstico y Clasificación de los Cursos de Agua según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Aconcagua. Recuperado de http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Aconcagua.pdf

Dirección General de Aguas (DGA). (2008). Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos. Recuperado de https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normas/Reglamentos/proced_darh.pdf

Dirección General de Aguas (DGA). (2014). Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos. Recuperado de <https://www.repositoriodirplan.cl/bitstream/handle/20.500.12140/25866/Recarga%20artificial%20de%20acu%20adferos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Dirección General de Aguas y Departamento de administración de recursos hídricos. (2016). Actualización disponibilidad río Aconcagua por caudal ecológico mínimo conforme al decreto N°1 del 2014. Recuperado de <https://snia.mop.gob.cl/sad/ADM5610.pdf>

Dirección General de Aguas (DGA), (2018). Boletín sendas del agua dirección general de aguas ministerio de obras públicas n°4 – 2018. Santiago. Recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/Documents/Sendas%20del%20Agua%20N%C2%B0%203%202018.pdf>

Dirección General de Aguas (DGA). (2019). Sustentabilidad de asentamientos humanos rurales en Chile. Análisis desde los comités de agua potable rural – cuenca del Aconcagua. Recuperado de <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5857.pdf>

DGA. (2020a). *Snia.mop.gob.cl*. Búsqueda de derechos y solicitudes. [online] Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

DGA. (2020b). *Dga.mop.gob.cl*. 2021. Mapoteca digital. [online] Disponible en <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>

DGA. (2020c). *Snia.mop.gob.cl*. Información oficial hidrometeorológico y de calidad de aguas en línea. [online] Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/CPAConsultas/site/mainSearch/mainSearch.xhtml>

Espinoza, C. (2009). “Tema 4: Propiedades físicas del Agua subterránea y acuíferos”. Apuntes del Curso CI51J Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

GCF. (2007). Análisis de información hidrogeológica del valle del río Aconcagua para la actualización del modelo de operación del sistema. Recuperado de <https://snia.mop.gob.cl/sad/SUB4847.pdf>

Geohidrología consultores. (2015). Estudio e implementación de un plan piloto de recargas artificiales a los acuíferos del valle del Aconcagua.

Hannah instrument, (2021). La temperatura afecta el pH del agua. Recuperado de <https://www.hannacolombia.com/blog/post/39/la-temperatura-afecta-el-ph-del-agua>

Infraeco. (2011). Actualización catastro de usuarios/as de aguas de la primera sección de la cuenca del río Aconcagua.

Instituto Nacional de Normalización (1987). Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. (No. de publicación NCh1333). Santiago, Chile. Recuperada de https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh1333-1978_Mod-1987.pdf

Maddocks, A., Young, R., & Reig, P. (2015). Ranking world’s most water stressed countries in 2040. Recuperado de <https://www.wri.org/blog/2015/08/ranking-world-s-most-water-stressed-countries-2040>.

Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2019). Declara como zona afectada por catástrofe a las comunas de la región de Coquimbo y Valparaíso que indica. (Decreto N°308/2019). Santiago, Chile.

Rebolledo, S., (2017). Conductividad eléctrica y salinidad - Redagrícola Chile. [online] Redagrícola Chile. Recuperado de <https://www.redagricola.com/cl/conductividad-electrica-salinidad/>

RIVANO, S y SEPULVEDA, P., (1993). Hoja, Hoja Quillota Y Portillo Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería carta geológica de Chile, Serie Geología Básica, No.73, 1993., 1 mapa escala 1:250.000.

Sánchez Quispe, H., Chipantiza, J., Bonilla, A., & Mendoza, J. (2020). Solución analítica de la ecuación de Richards en suelos no saturados basada en el modelo de Gardner. Caso de difusividad constante. Avances: Investigación En Ingeniería, 17(1). <https://core.ac.uk/download/pdf/327690704.pdf>

Sánchez, F. (s.f). Conceptos fundamentales de hidrogeología. Recuperado de: https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf

Silva et al. (2013, 5 de noviembre). Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Duero, Michoacán. Tecnología y Ciencias del Agua. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n5/v4n5a9.pdf>

Steinel, A. (2012). Guideline for assessment and implementation of Managed Aquifer Recharge (MAR) in (semi-)arid regions. Pre-feasibility study for infiltration of floodwater in the Amman-Zarqa and Azraq basins, Jordan. Fin. rep. of GeoSFF study "Mar in Jordan" prepared by MWI & BGR: 220 p.; Hannover.

Universidad Bernardo O'Higgins (UBO). (2019). Estudio de la UBO alertó que la temperatura ha subido hasta 10 grados en la zona central - Universidad Bernardo O'higgins. Disponible en: <https://www.ubo.cl/estudio-la-ubo-alerto-la-temperatura-ha-subido-10-grados-la-zona-central/>.

Véliz, E. (2018). Confección de un modelo integrado con análisis estocástico de la recarga: aplicación en la subcuenca del río Rapel, IV región (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Santiago, Chile. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/153021/Confecci%C3%B3n-de-un-modelo-integrado-con-an%C3%A1lisis-estoc%C3%A1stico-de-la-recarga.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

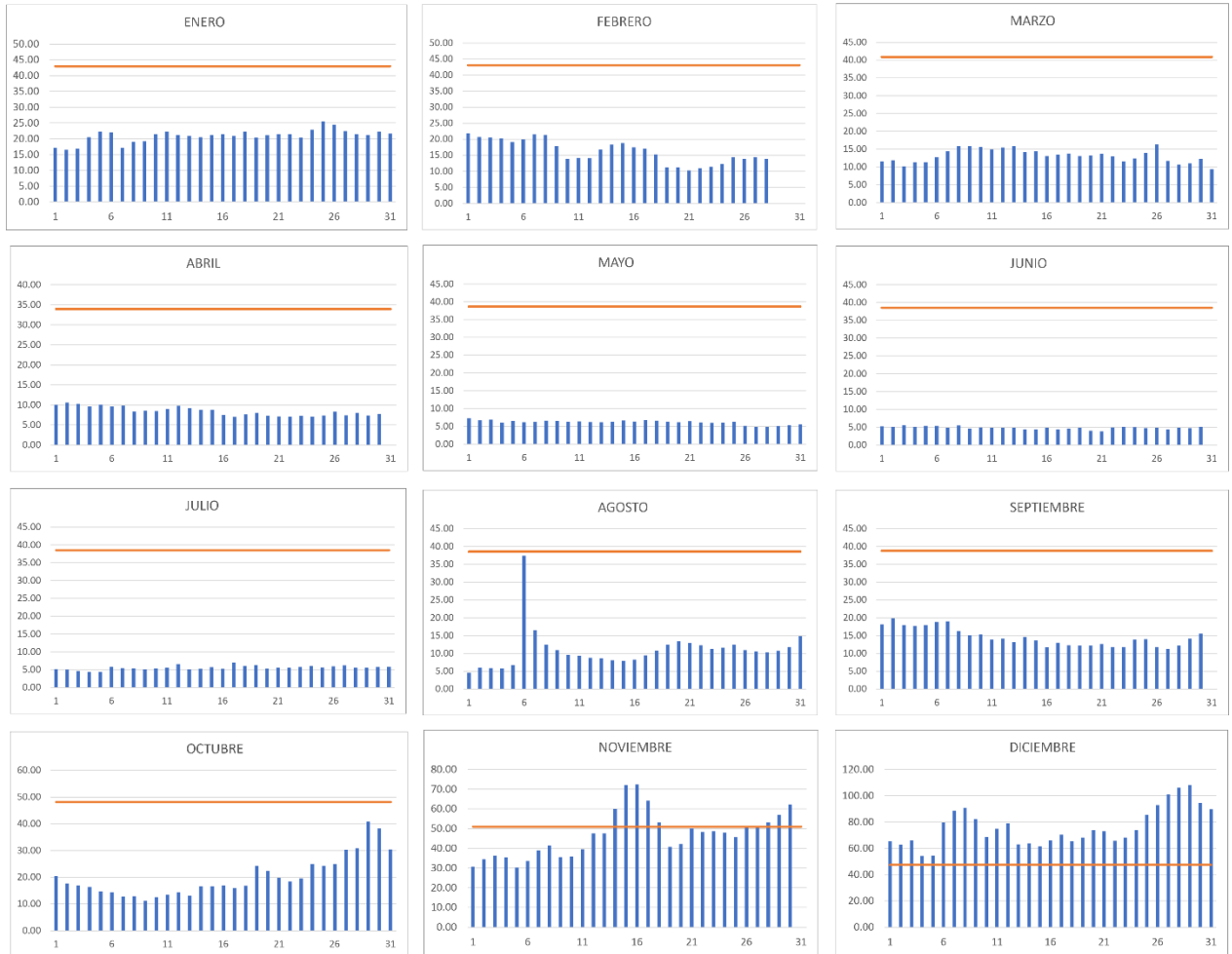
WSP Consulting Chile Ltda. (2019). Proyecto actualización de la modelación hidrogeológica integrada del Aconcagua. Recuperado de <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5865v.1.pdf>

ZHENG, CH.; BENNETT, G. (2002). Applied Contaminant Transport Modeling. Wiley-Interscience. Segunda Edición. 621 p.

7. Anexos.

7.1 Anexo I: Gráficos caudal medio diario.

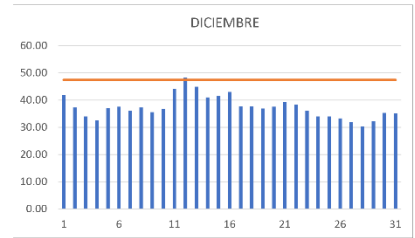
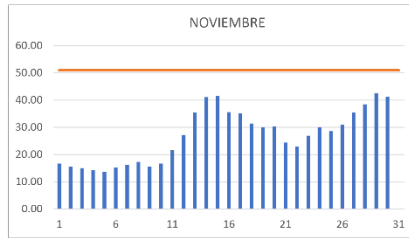
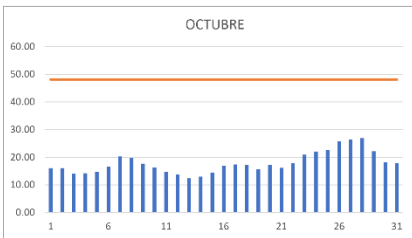
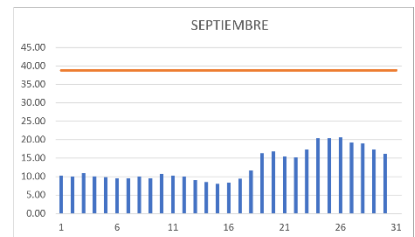
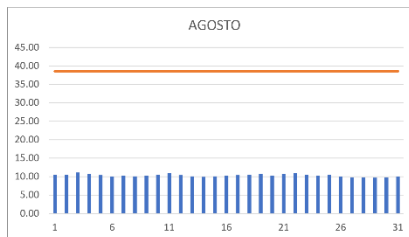
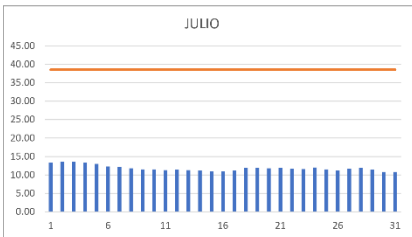
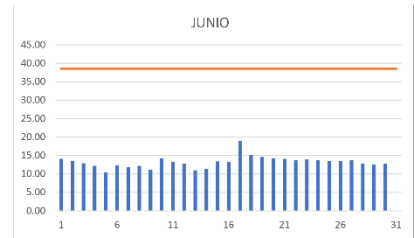
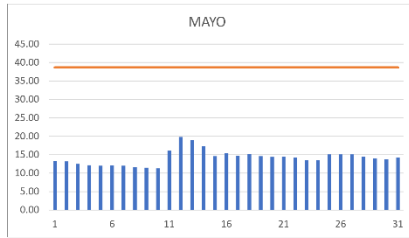
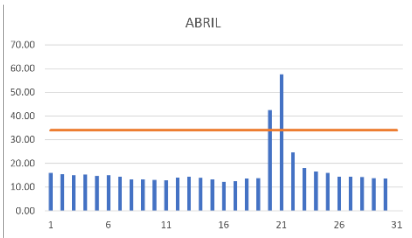
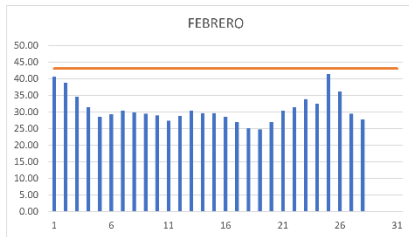
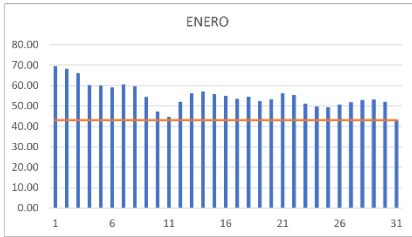
Caudal medio diario (m³/s) 2015



Caudal medio diario (m³/s) 2016



Caudal medio diario (m³/s) 2017



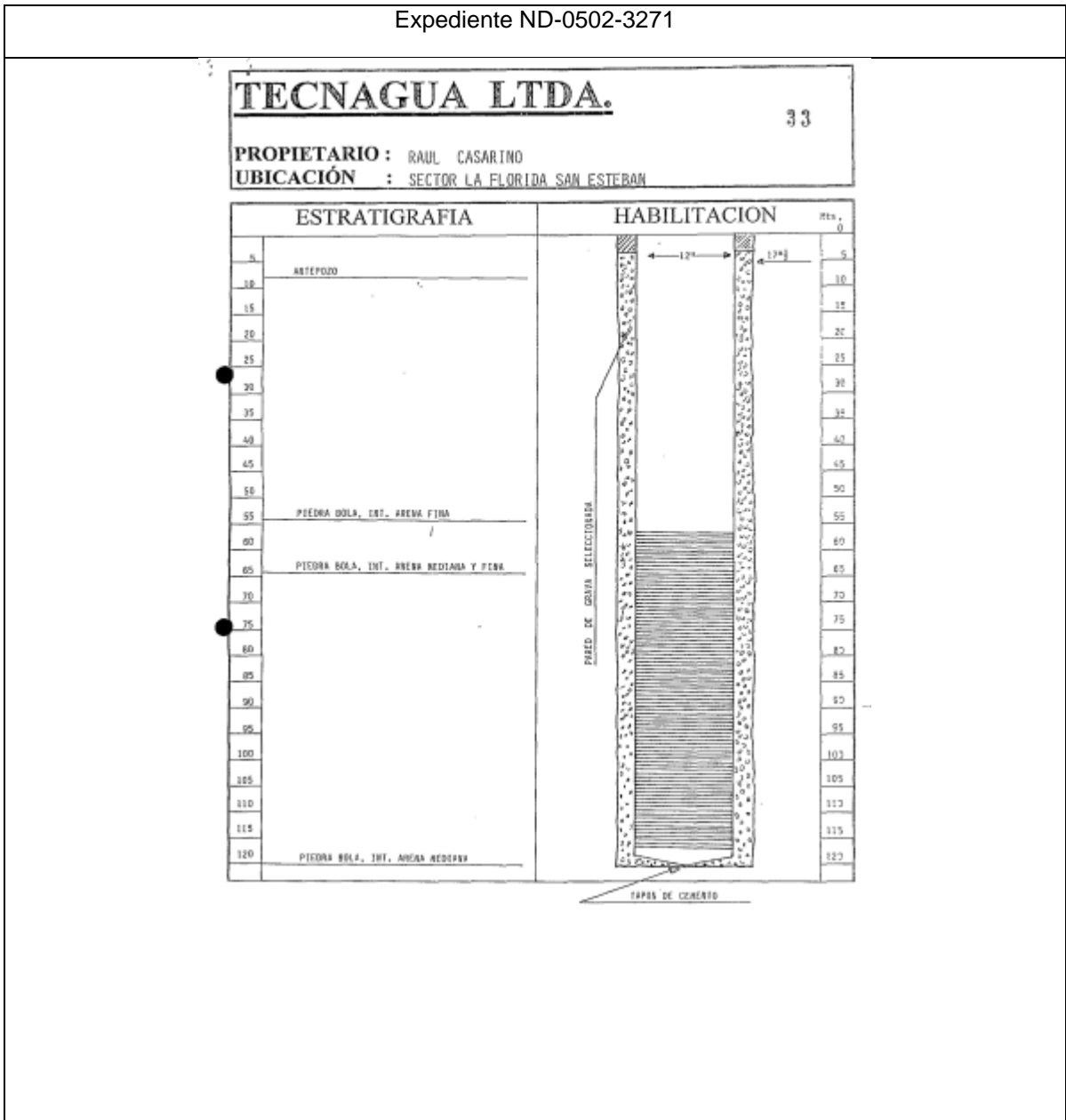
Caudal medio diario (m³/s) 2018



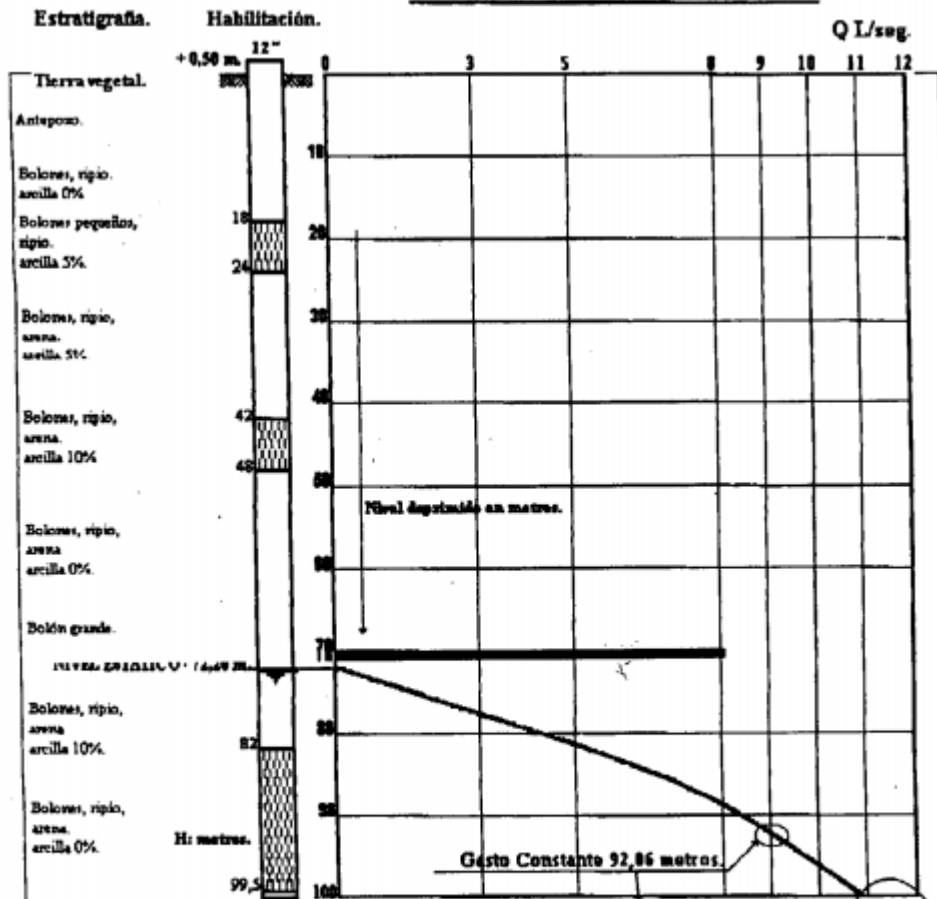
Caudal medio diario (m³/s) 2019



7.2 Anexo II: Columnas estratigráficas de los expedientes revisados.



CURVA DE AGOTAMIENTO



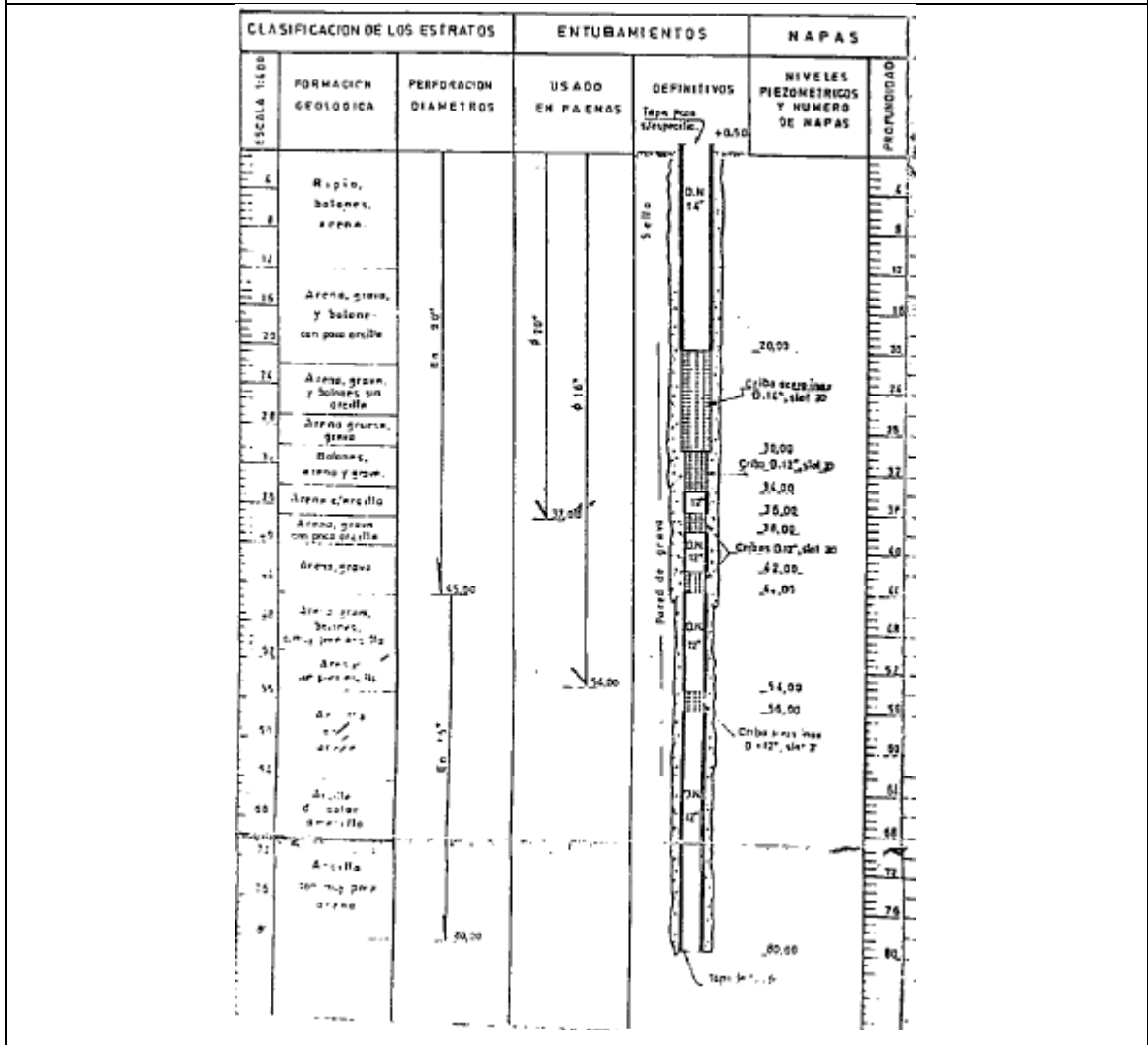
CARACTERÍSTICAS DEL BOMBEO.

Gasto variable	: 480.	mla.
Gasto	: 9.	lit/Seg.
Nivel estático	: 72.20.	m.
Nivel deprimido	: 92.06.	m.
Gasto específico	: 0.4531.	lit/seg/m.

Nota: Descantar 0,55 metros de los niveles deprimidos para referir las mediciones a nivel de terreno.

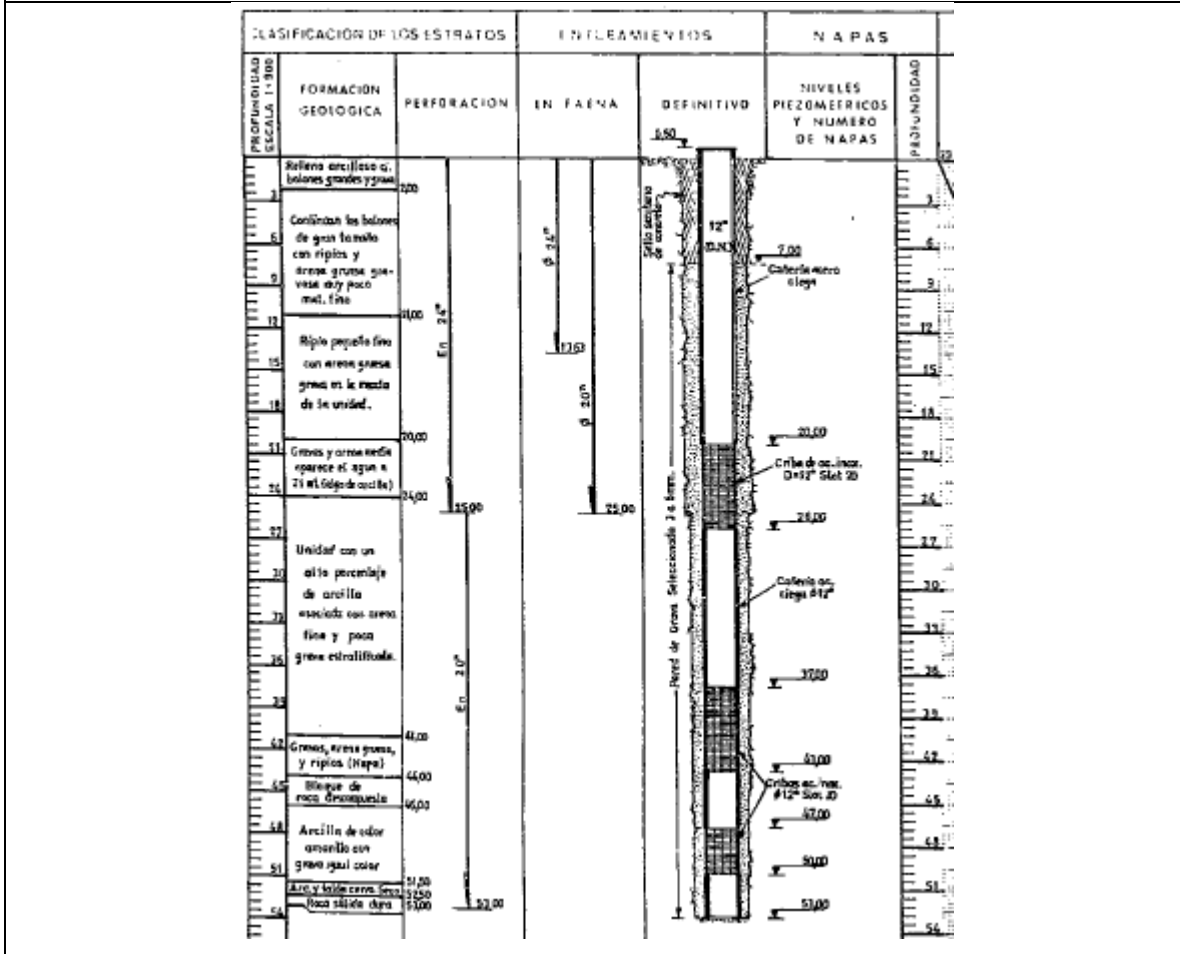
[Handwritten signature]

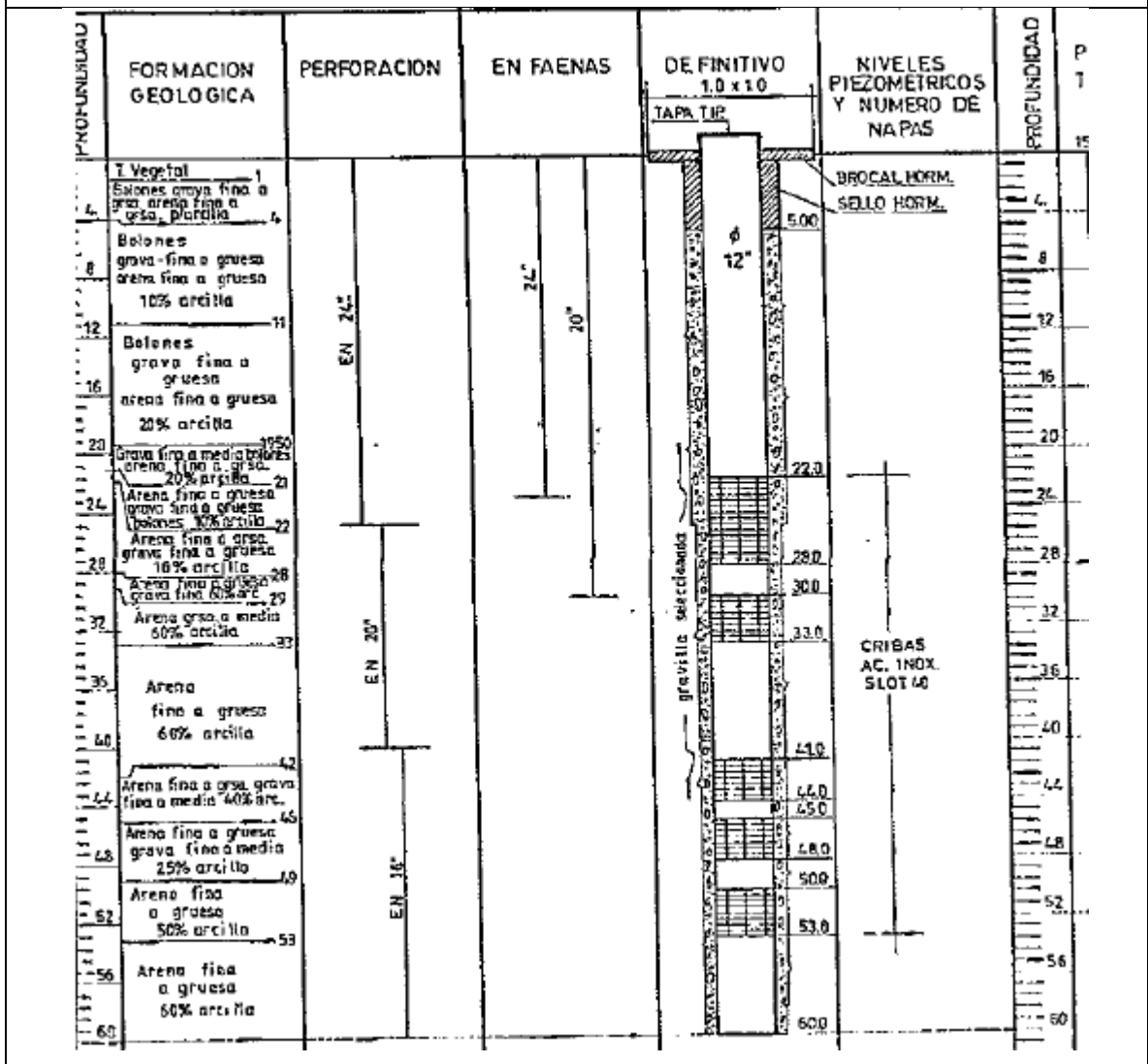
Pozo 1

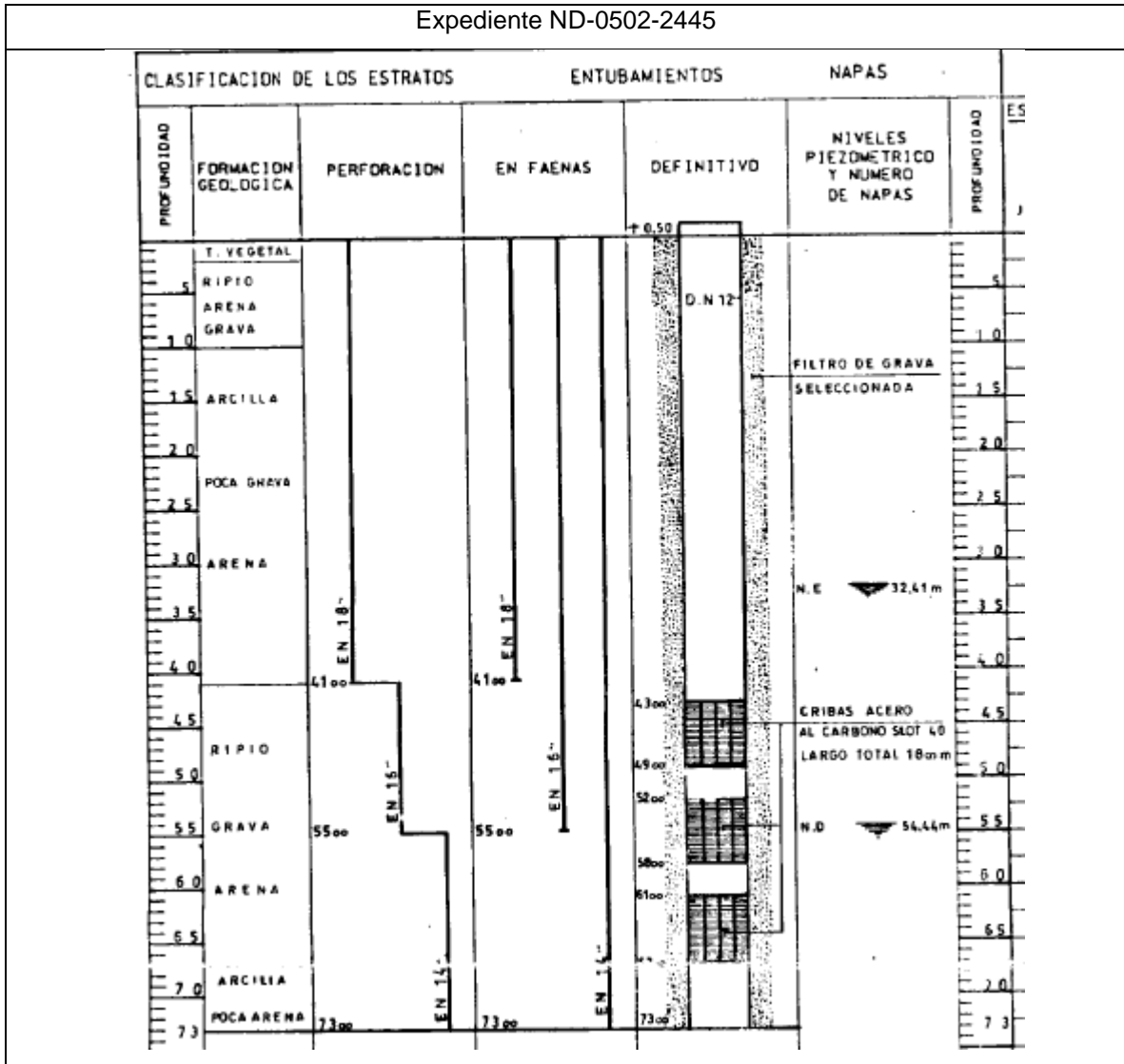


Expediente ND-0502-1408

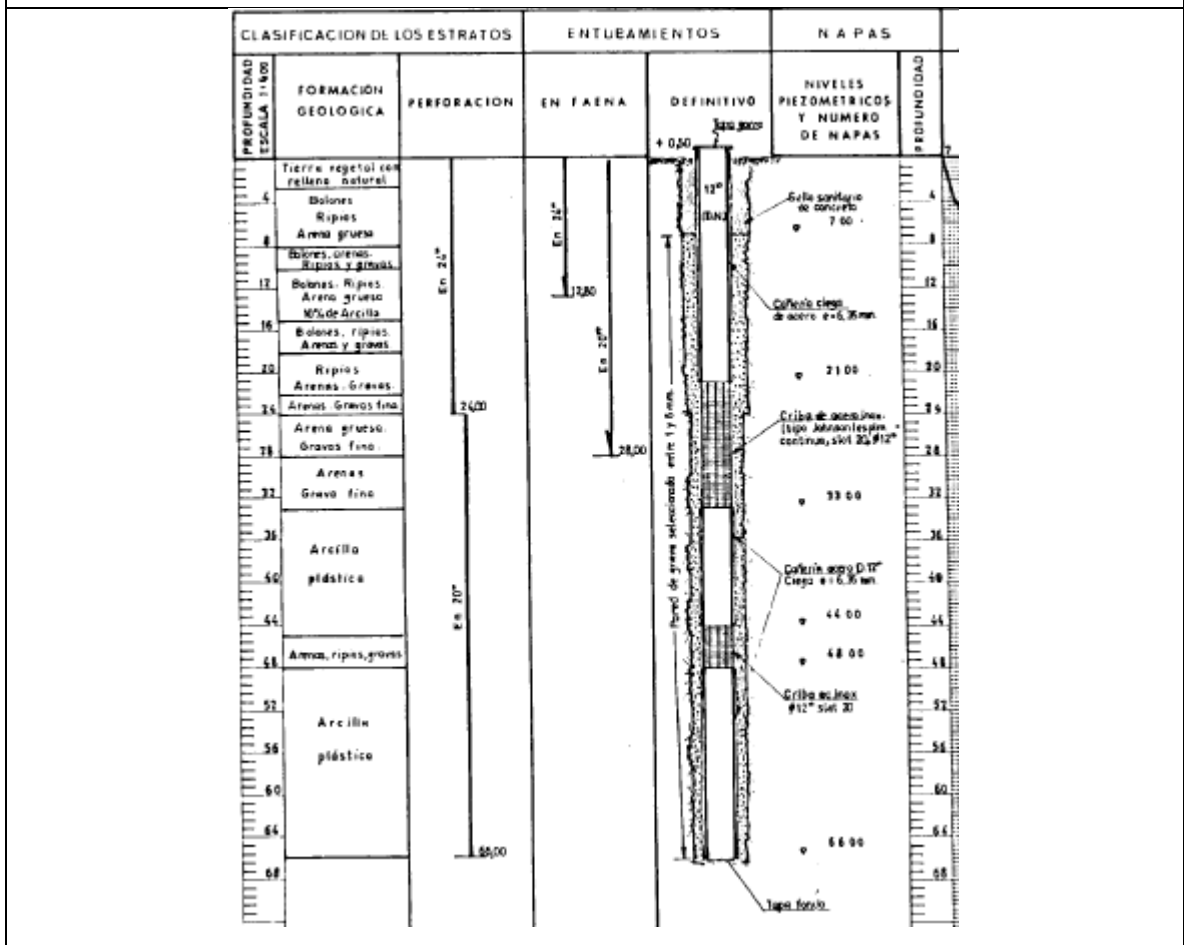
Pozo 1

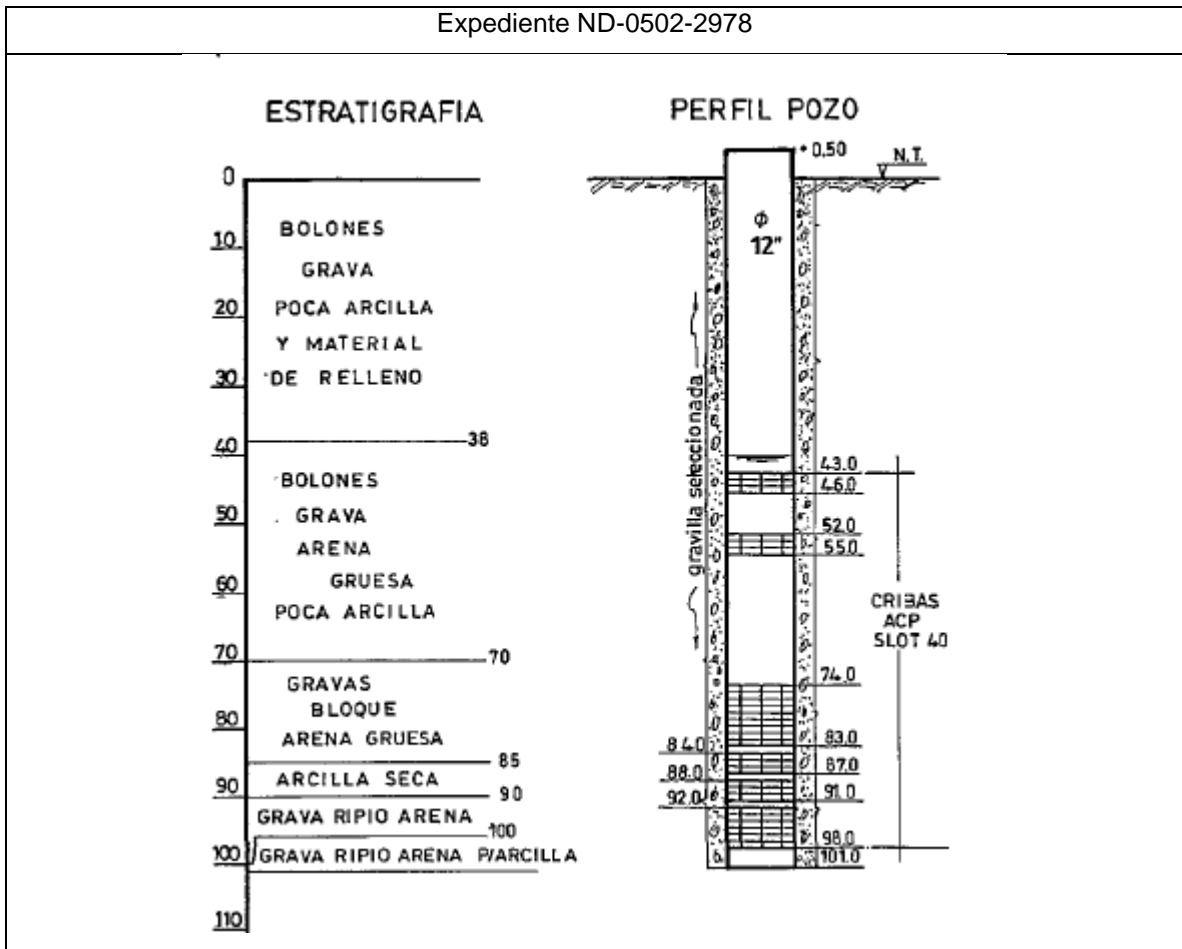


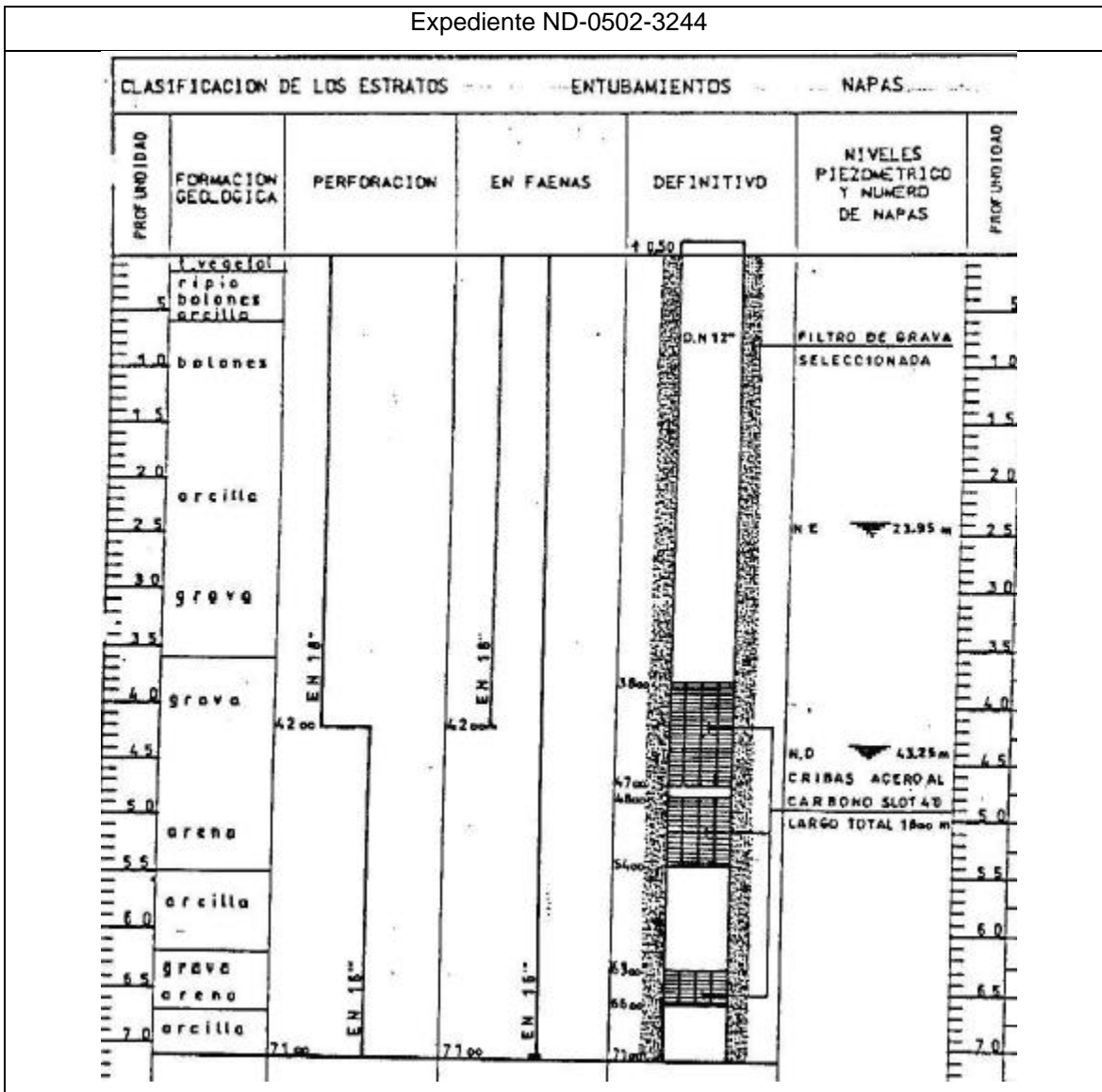




Expediente ND-0502-2591







PERFIL ESTRATIGRÁFICO

ESTRATAS	PROFUNDIDAD, m	
	Desde	Hasta
Capa Vegetal	0	1
Conglomerado de arcilla, arena y grava	1	12
Conglomerado de arena y grava	12	37.5

