



ESCUELA DE
GEOLOGÍA

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL
FORTALECIMIENTO DE LA INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN MODELOS
DESARROLLADOS PARA LA CUENCA DEL RÍO CHOAPA, REGIÓN DE COQUIMBO,
CHILE

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

MICAELA DURRUTY ZEPEDA

PROFESOR GUÍA:

PABLO ÁLVAREZ LATORRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

EDUARDO MORGADO BRAVO

HÉCTOR REYES SERRANO

SANTIAGO, CHILE

JUNIO 2022

RESUMEN

La emergente concientización sobre el cambio climático y la sequía a escala país y global han puesto en evidencia la necesidad de asegurar el suministro de agua, y con esto, la urgencia de entender y acceder a nuevas fuentes de agua dulce como lo son los acuíferos.

La cuenca del Río Choapa se ubica en la zona Sur de la región de Coquimbo, y al menos una comuna de esta cuenca se encuentra bajo decreto por escasez hídrica desde el año 2009. A medida de contrarrestar los efectos de la sequía y en orden de prepararse para el futuro es que se han desarrollado a lo largo de los años 4 modelos hidrogeológicos numéricos en la cuenca que son el objeto de análisis para el desarrollo de este estudio.

El objetivo fundamental en el que se basa esta memoria es generar una propuesta metodológica que busca aumentar la capacidad de los modelos de representar el sistema hidrogeológico real.

La metodología de formulación de la propuesta metodológica se basa en un análisis de la construcción de los modelos hidrogeológicos numéricos en contraste a una serie de atributos definidos por la bibliografía como fundamentales. A través de la comparación de como los distintos modelos abarcaron los atributos se determinaron brechas metodológicas, a partir de las cuales se sustentan las propuestas del programa.

La principal temática que aborda la propuesta metodológica es como acercar los modelos numéricos a hacer una correcta representación de la variabilidad intrínseca del sistema geológico en el que se enmarcan los procesos hidrogeológicos. De esta manera, el programa trata los puntos de modelación del basamento rocoso y el trabajo de las heterogeneidades del depósito en el plano horizontal y eje vertical.

Finalmente, la sobre simplificación del problema geológico y la falta de tridimensionalidad de los modelos hidrogeológicos numéricos en la cuenca del Río Choapa son las principales razones por las cuales los modelos hidrogeológicos pierden la capacidad de representar adecuadamente el sistema.

AGRADECIMIENTOS

Primero me gustaría agradecer a Pablo Álvarez por la oportunidad de hacer la memoria en un tema que me gusta y la paciencia con la que me guio por este proceso. También, agradezco a mi profesor co-guía Eduardo Morgado por las incontables revisiones y buenos consejos académicos que me entrego este último año.

Me gustaría también agradecer a mi familia por el apoyo y cariño que me han entregado a lo largo de mi vida. Especialmente gracias a mi mamá por hacerme quien soy y enseñarme a ser una mujer resiliente y trabajadora. A mis abuelas, por darme mucho amor y ser mis personas favoritas de la vida. A mi papá por siempre apoyarme y estar ahí. A mi abuelo Hernán por inculcarme el esfuerzo y trabajo duro como lecciones de vida.

Finalmente me gustaría agradecer a todos los amigos y amigas que conocí y aprendí a querer en la universidad por hacer esta experiencia de vida inolvidable. Kim, Fran, Sebita, Agatha, Sopapo, Wagner, Stefano y Yaldo gracias por estar ahí desde el principio y aguantar las salidas curiosas de mi carácter. Gracias también a esas personas que se fueron sumando a mi vida en el camino como Santi, Pía, Nacha, Brix, Navarrito y a todo el grupo de la playa. Gracias al team CEE geología 2020-2021 por todo el apañe y buena onda en el proyecto. Finalmente, gracias a Ian por ser una parte importante de mi vida estos últimos meses.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivo general	2
1.4. Objetivos específicos	2
1.5. Metodología	2
1.6. Ubicación y vías de acceso	4
2. MARCO GEOLÓGICO	5
2.1. Geología	5
2.1.1. Devónico, Carbonífero y Pérmico	5
2.1.2. Triásico	5
2.1.3. Jurásico	6
2.1.4. Cretácico Inferior	6
2.1.5. Cretácico Superior	7
2.1.6. Paleógeno	8
2.1.7. Neógeno	8
2.1.8. Cuaternario	9
2.2. Geomorfología	11
2.3. Estructuras y contexto geodinámico	14
2.4. Hidrología	14
2.4.1. Precipitaciones	15
2.4.2. Caudales	17
2.4.3. Temperatura	19
2.4.4. Nivel freático	20
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1. Acuíferos	22
3.2. Parámetros hidráulicos	22
3.2.1. Porosidad total	22
3.2.2. Conductividad hidráulica	23
3.2.3. Transmisividad	24
3.2.4. Coeficiente de almacenamiento	24
3.3. Modelos hidrogeológicos	25
3.3.1. Dominio de modelo	26
3.3.2. Capas del modelo	26
3.3.3. Parametrización	26
3.3.4. Discretización de la grilla	27

3.4.	Geofísica	28
3.4.1.	Método gravimétrico	28
3.4.2.	Método eléctrico	28
3.4.3.	Método electromagnético	29
3.5.	Pruebas de bombeo	30
4.	RESULTADOS	31
4.1.	Definición de atributos	31
4.2.	Definición de modelos a evaluar	32
4.3.	Identificación de brechas	33
4.3.1.	Dominio de modelación	33
4.3.2.	Capas del modelo	38
4.3.3.	Parametrización	40
4.3.4.	Discretización de la grilla	42
5.	DISCUSIONES	43
5.1.	Definición de atributos	43
5.2.	Definición de modelos a analizar	43
5.3.	Acceso a la información	43
5.4.	Propuesta metodológica	45
5.4.1.	Dominio del modelo	46
5.4.2.	Capas del modelo	50
5.4.4.	Discretización de la grilla	53
5.4.5.	Propuestas generales de toma de datos	53
6.	CONCLUSIONES	57
7.	BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación y vías de acceso a la zona de estudio. Izq. Cuenca del Río Choapa a escala país. Der. Cuenca del Río Choapa a escala regional, con vías de acceso. _____	4
Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del Río Choapa. Fuentes: cartas Hoja de Illapel (Rivano y Sepúlveda, 1991) y Quillota - Portillo (Rivano y Sepúlveda, 1991). _____	10
Figura 3. Mapa geomorfológico cuenca Río Choapa. Fuente: Elaboración propia con datos de Rivano y Sepúlveda, 1991. _____	12
Figura 4. Perfil cauce del Río Choapa con sectorización según pendiente. Elaboración propia con datos DEM Alos palar. _____	13
Figura 5. Mapa de pendientes cuenca del Río Choapa. Elaboración propia con datos DEM Alos palar. _____	13
Figura 6. Subdivisión cuenca del Río Choapa y ubicación geográficos puntos de toma de datos de DGA. _____	15
Figura 7. Gráficos precipitaciones anuales en subcuencas del Río Choapa. a) Subcuenca Río Cerro Claro. b) Subcuenca Río Choapa Bajo. c) Subcuenca Río Choapa Medio. d) Subcuenca Río Illapel. e) Subcuenca Río Chalinga. Fuente: Datos DGA. _____	16
Figura 8. Gráfico de caudales medios mensuales en los últimos 10 años en subcuencas Río Choapa Bajo y Río Cerro Claro. Fuente: Datos DGA. _____	18
Figura 9. Gráficos media caudal anual en subcuencas del Río Choapa. a) Subcuenca Río Cerro Claro. b) Subcuenca Río Choapa Bajo. c) Subcuenca Río Choapa Medio. d) Subcuenca Río Illapel. e) Subcuenca Río Chalinga. Fuente: Datos DGA. _____	18
Figura 10. Gráfico temperatura media mensual es 3 subcuencas del Río Choapa. Fuente: Datos DGA. _____	19
Figura 11. Mapa cuenca del Río Choapa con isoterma 0. Fuente: Datos DGA. _____	20
Figura 12. Gráficos niveles freáticos en subcuencas del Río Choapa. a) Subcuenca Río Illapel. b) Subcuenca Río Choapa Medio. c) Subcuenca Río Choapa Bajo. Fuente: Datos DGA. _____	21
Figura 13. Simplificación acuíferos libre y confinados. Fuente: Datos DGA. _____	22
Figura 14. Estructuras de grillas. a) Elementos finitos. b) Diferencias finitas. Fuente: Modificada de Diersch, (2013). _____	27
Figura 15. Representación de anomalía magnética generada por un cuerpo de mayor densidad. Fuente: Modificado de Mariita, (2007). _____	28
Figura 16. Representación de arreglo de electrodos y respuesta de un cuerpo cargable. Fuente: Geofísica Andina S.A. _____	29
Figura 17. Representación gráfica de disposición de espira y respuesta de cuerpo conducto. _____	29

Figura 18. Secuencia metodológica para la definición de atributos a considerar en este estudio. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 19. Clasificación de incertidumbre en interpolación de superficies geológicas. Fuente: Modificado de Wellman (2010).	34
Figura 20. Mapa de la ubicación de los fatos geofísicos en la cuenca del Río Choapa. Fuente: Hidrogestión (2016).	35
Figura 21. Ejemplos de zonas en las que se observa el fenómeno descrito. Fuente: Modificado de Hidrogestión, 2016.	36
Figura 22. Simplificación grafica de acuíferos contenidos en roas fracturadas. Fuente: Modificado de Lachassagne, 2001.	37
Figura 23. Ejemplo interpretación de capas. a) Gráfico resistividad vs profundidad interpretado. b) Perfil interpretado por estratigrafía. Fuente: Modificado de Geodatos, 2012 y DGA, ONU y CORFO, 1979 respectivamente.	39
Figura 24. Mapa de la categorización de permeabilidades propuesta por Hidrogestión (2016) para cuenca del Río Choapa. Fuente: Hidrogestión (2016).	41
Figura 25. Mapa de la categorización de permeabilidades propuesta por AC Ingenieros (2012) para cuenca del Río Choapa. Fuente: AC Ingenieros (2012).	41
Figura 26. Resumen y estructura propuesta metodológica.	45
Figura 27. Simplificación metodología de caracterización de un basamento rocoso fracturado.	49
Figura 28. Comparación de estrategias de parametrización. a) Zonada. b) Interpolada. Fuente: Modificado de Anderson et al. 2015.	51
Figura 29. Ejemplo disposición de TEM propuestos.	54
Figura 30. Mapa de priorización de nuevos datos TEM. Datos: Geodatos, (2012).	55
Figura 31. Mapa distribución pruebas de bombeo al año 2018. Datos: Guerrero 2018.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas usadas en el análisis, sus coordenadas geográficas en UTM y su altura. Fuente: Datos DGA. _____	16
Tabla 2. Estaciones Fluviométricas usadas en el análisis, sus coordenadas geográficas en UTM y su altura. Fuente: Datos DGA. _____	17
Tabla 3. Pozos usados en el análisis y sus coordenadas geográficas en UTM. Fuente: Datos DGA. _____	20
Tabla 4. Valores esperados de conductividad hidráulica según material. _____	23
Tabla 5. Clasificación de potencial de suministro de agua subterránea según la transmisividad del medio. _____	24
Tabla 6. Tabla resumen de atributos considerados por distintos autores para la confección de modelos hidrogeológicos. Fuente: SEIA (2012), BC MOE (2012) y NWC (2012). _____	31
Tabla 7. Tabla resumen modelos a evaluar y a no evaluar. Fuente: Elaboración propia. _____	33

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El agua subterránea representa un recurso de vital importancia a escala global, pues según la UNESCO, esta suministra el consumo de la mitad del agua potable mundial y, además, corresponde a el 30% de las reservas de agua dulce del planeta (IGRAC, 2021). Por otro lado, según datos de la World Resources Institute's Aqueduct Water Risk Atlas (WRI) el año 2018 Chile se ubicó en el número 18 en el ranking mundial de los países con mayor riesgo hídrico. Particularmente el 76% de la superficie de chilena está afectada por sequía, desertificación y suelo degradado (SudAustral Consulting SpA, 2016).

Uno de los parámetros que permite cuantificar la escasez hídrica en una zona son las brechas hídricas. Las brechas hídricas se definen como la diferencia entre la oferta de agua que el sistema es capaz de proveer y la demanda existente de este recurso. El estudio "radiografía del agua: brechas y riesgo hídrico en Chile" (Fundación Chile, 2018), sitúa a la cuenca del Río Choapa como la décima con mayor brecha hídrica en una escala de 25 cuencas estudiadas en todo el país. Esta crisis alcanza un nivel de afectación a tal magnitud que, en la provincia, desde el año 2009 al menos una comuna del Choapa ha estado bajo decreto por escasez hídrica de la Dirección General de Aguas (DGA).

Los modelos hidrogeológicos, que corresponden a una simplificación del sistema acuífero real, pero que retiene sus aspectos más relevantes (SEA, 2012), son ampliamente usados en el mundo para estimar recursos hídricos, predecir atributos del acuífero y futuros escenarios hídricos. La zona de estudio es la cuenca del Río Choapa, ubicada al Sur de la región de Coquimbo, en esta existen un total de cuatro modelos hidrogeológicos numéricos que incorporan datos que van desde 1978 hasta el 2014 (AC Ingenieros, 1998; Hidrogestión, 2016; DGA y PUC, 2019; DICTUC - SEI, 2019), en estos informes mencionan metodologías de trabajo para el planteamiento de sus modelos, en que existen falencias al momento de representar el sistema hidrogeológico real de la cuenca del Río Choapa, que en general, se deben a una sobre simplificación del sistema geológico en el que se enmarcan los sistema hídricos subterráneos.

El plan estratégico de gestión de recursos hídricos de la DGA (PEGH) busca promover la gestión y la administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, prevalencia del interés público y eficiencia en la asignación del recurso hídrico, y para ser desarrollado busca implementar una serie de proyectos que son diseñados en parte considerando los resultados, estimaciones y conclusiones obtenidas a partir de los modelos hidrogeológicos existentes.

1.2. Hipótesis

Existe la necesidad de complementar geológicamente los modelos hidrogeológicos numéricos en la cuenca del Río Choapa para aumentar su capacidad de representar adecuadamente del sistema hidrogeológico real.

1.3. Objetivo general

Proponer una propuesta metodológica que complemente desde un punto de vista geológico el desarrollo e interpretación de modelos hidrogeológicos numéricos de la cuenca del Río Choapa

1.4. Objetivos específicos

- I. Evaluar los modelos hidrogeológicos numéricos existentes en la cuenca del Río Choapa para identificar brechas en su construcción y/o planteamiento a través de un análisis de las metodologías aplicadas, datos usados y bibliografía disponible.
- II. Evaluar metodologías de trabajo o toma de datos propuestas por bibliografía para determinar procedimientos que complementen las brechas previamente identificadas.

1.5. Metodología

Para poder llevar a cabo cada uno de los objetivos planteados se llevaron a cabo una serie de trabajos de recopilación y análisis de información:

- I. Evaluar los modelos hidrogeológicos numéricos existentes en la cuenca del Río Choapa para identificar brechas en su construcción y/o planteamiento a través de un análisis de las metodologías aplicadas, datos usados y bibliografía disponible.
 1. Identificar atributos o características básicas clave definidas en la bibliografía que deben incluir los modelos hidrogeológicos numéricos como fundamento para su planeamiento desde un modelo conceptual para basar la identificación de brechas.
 2. Determinar cuáles de los modelos hidrogeológicos numéricos existentes expone suficiente información sobre su construcción y/o planteamiento para llevar a cabo una evaluación crítica de estos modelos con el objetivo de identificar brechas.
 3. Analizar las metodologías que los modelos hidrogeológicos numéricos aplican, así como también, los datos en que se sustentan para resolver o definir los atributos, con el objetivo de identificar brechas.

- II. Evaluar metodologías de trabajo o toma de datos propuestas por bibliografía para determinar procedimientos que complementen las brechas previamente identificadas.
 1. Analizar cada una de las brechas previamente identificadas en los modelos hidrogeológicos numéricos de la cuenca, para determinar posibles líneas de trabajo que implique una mejora en la formulación del planteamiento o metodología a la que se relaciona la brecha.
 2. Determinar metodologías de trabajo y toma de datos que complementen desde un punto de vista geológico a las brechas identificadas, acercando la capacidad del modelo a representar el sistema hidrogeológico real.

SOLO USO ACADÉMICO

1.6. Ubicación y vías de acceso

La cuenca del Río Choapa se ubica en la provincia de Choapa, en el sector sur de la región de Coquimbo, Chile. Limita al Norte con la provincia de Limarí, al Sur con la región de Valparaíso, al Este con Argentina y al Oeste con las cuencas costeras entre Limarí y Choapa, Choapa y Petorca y el océano Pacífico. La cuenca abarca una superficie de 8.100 km² entre las latitudes 31°10' Sur y 31°15' Sur. Dentro de ella se ubican las comunas de Illapel, Salamanca y Canela, con una población en conjunto de 69.315 habitantes (INE, 2017). El acceso a la zona es por la ruta 5 norte desde Santiago hasta el km 232, en donde se debe tomar el desvío a la ruta 47 y seguirla por 56 km hasta llegar a la comuna de Illapel (Figura 1).



Figura 1. Ubicación y vías de acceso a la zona de estudio. Izq. Cuenca del Río Choapa a escala país. Der. Cuenca del Río Choapa a escala regional, con vías de acceso.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Geología

2.1.1. Devónico, Carbonífero y Pérmico

Complejo metamórfico del Choapa **PZch**
(Rivano y Sepúlveda, 1991)

Unidad más antigua existente en la zona de estudio, con edades que oscilan entre el Devónico Superior y Carbonífero Inferior. Espacialmente, aflora en forma de bandas discontinuas en zonas costeras (Figura 2). Este complejo se compone por filitas, esquistos cuarzo - micáceos, metabasitas y mármol (Rivano y Sepúlveda, 1991).

Formación Huentelauquén **CPh**
(Muñoz-Cristi, 1973; enmend. Rivano y Sepúlveda, 1991)

Aflora en el área occidental de la cuenca, con mayor recurrencia en zonas cercanas al valle del Río Choapa. Datada según contenido fósil entre el Carbonífero Superior y Pérmico Inferior (Rivano y Sepúlveda, 1991). Dentro de la formación se distinguen dos miembros. Miembro La Higuera, inferior, constituida de pelitas negras y areniscas con algunas intercalaciones brechosas hacia la base y el miembro La Cantera, superior, compuesto por calizas y areniscas, con intercalaciones abundantes de conglomerados finos a medios ((Rivano y Sepúlveda, 1991).

2.1.2. Triásico

Formación El Quereo **Trq**
(Cecioni y Westermann, 1968)

Aparece en forma de franja alargada y angosta en dirección N-S, su ancho varía entre 5 y 2 km. Descrita por Cecioni y Westermann en 1968 como una formación de origen marino transicional, subdividida en cuatro miembros principales. El miembro inferior (a), compuesto por brechas de color gris oscuro. El miembro (b), conformado por una intercalación rítmica de capas de areniscas feldespáticas grises y lutitas negras. El miembro de lutitas negras (c), presenta pequeños nódulos de piritas y escasas intercalaciones de areniscas. Y finalmente, el miembro superior (d) de areniscas conglomeradicas ((Rivano y Sepúlveda, 1991). Según el contenido fósil en su miembro C, la edad estimada es Triásico Medio.

2.1.3. Jurásico

Estratos de Pupios **Jp**
(Unidad informal)

Aflora localmente en la zona Sur Oeste de la cuenca del Río Choapa. Corresponde a una secuencia de areniscas, lutitas, calizas y vulcanitas ácidas. Asignada al Jurásico Superior según la presencia de una serie de cuerpos plutónicos de edad 167 - 147 Ma.

Super unidad Mincha **Jmi**
(Rivano et al., 1985)

Conformada por una serie de plutones y batolitos ubicados de forma longitudinal en el extremo occidental de la cuenca, compuestos por monzo y sienogranitos, sienitas cuarcíferas, dioritas cuarcíferas, monzodioritas, gabros, granodioritas y tonalitas. Datada por Rivano et al., 1985 y Munizaga, 1972 con edades comprendidas entre 195 ± 20 y 138 ± 3 Ma.

Formación Tordillos **Jt**
(Yrigoyen, 1976)

Definida originalmente como secuencia de conglomerados y areniscas pardo-rojizas y verdes de origen continental pertenecientes al Jurásico Superior. Esta formación aflora localmente en el sector más oriental de la zona de estudio.

2.1.4. Cretácico Inferior

Formación Arqueros **Ka**
(Aguirre y Egert, 1962; 1965)

Asignada al Cretácico Inferior según criterios de correlación, esta formación se asocia a un ambiente marino y continental y se compone de brechas volcánicas y aglomerados con intercalaciones lenticulares de calizas fosilíferas, areniscas y escasos niveles de conglomerados. Aflora en el sector central del área, al Norte del valle del Río Choapa, en forma de una franja de 21 Km de ancho máximo (Figura 2).

Formación Los Pelambres **Klp**
(Rivano y Sepúlveda, 1991)

Secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que aparecen en el sector más oriental de la cuenca como una gran franja con orientación preferencial N-S (Figura 2). Compuesta por lavas, brechas y conglomerados andesíticos, tobas arenosas y areniscas. Los fósiles descritos en el

área y las relaciones de contacto de esta formación indican una edad del Cretácico Inferior. El ambiente de formación de esta secuencia de rocas se atribuye a un ambiente continental subaéreo con intercalaciones sedimentarias de carácter litoral.

Formación Quebrada Marquesa **Kqm**
(Aguirre y Egert, 1962)

Aflora en el área central de la cuenca con predominancia en zonas aledañas a los valles de los ríos Illapel y Choapa (Figura 2). Descrita en la zona de estudio por Aguirre y Egert (1962) como dos miembros, el inferior, llamado el espino, compuesto por margas, calizas, areniscas y conglomerados con niveles locales de yeso y el superior, llamado quelen, conformado por lavas, areniscas, conglomerados y rocas piroclásticas. Según fauna fósil y criterios de corte se le asigna a esta formación una edad cretácica inferior. El ambiente atribuible a esta secuencia de litologías es una transición entre un miembro de origen litoral a supra litoral en el miembro basal a un ambiente netamente continental en el miembro superior.

Super unidad Illapel **Ki**
(Rivano et al., 1985)

Aflora ocupando una gran extensión, predominantemente en la zona centro occidental de la cuenca del Río Choapa (Figura 2). Compuesta de, sienodioritas, granodioritas, monzogranitos y dioritas. Datada por Munizaga en 1972 y Rivano y Sepúlveda en 1991 con edades que van de $85,9 \pm 2,2$ a 155 ± 20 Ma.

2.1.5. Cretácico Superior

Unidad San Lorenzo **KTsl**
(Rivano et al. 1985)

Conjunto de plutones y pórfidos de composición diorítica y andesítica que afloran como cuerpos individuales en la zona norte de la cuenca. Datada por Rosales en 1988 con K-Ar con $65,3 \pm 3,1$ Ma.

Formación Salamanca **Kv**
(Rivano y Sepúlveda, 1991)

Aparece de manera alargada, con elongación preferencial en la dirección N-S y amplitud máxima de 33 Km, en la zona centro occidental del área de la cuenca del Río Choapa. Descrita por Rivano y Sepúlveda en 1991 en forma de dos miembros, el basal, llamado Santa Virginia, compuesto

principalmente por conglomerados y areniscas rojas con intercalaciones escasas de fangolitas y calizas lacustres y el superior, llamado Río Manque, conformado por abundantes niveles de brechas volcánicas e intercalaciones subordinadas de conglomerados, areniscas y calizas lacustres Jara y Charrier (2014) determinaron una edad de entre $81,5 \pm 1,1$ y $87,7 \pm 1,2$ Ma mediante dataciones de U/Pb en zircones. La secuencia litológica de esta formación permite asignarle una evolución de ambientes, pasando de una sedimentación asociada a procesos aluvionales con eventos lacustres puntuales en el miembro basal a un ambiente volcánico en el miembro superior.

Super unidad Cogotí **Ktc**
(Rivano et al. 1985)

Conjunto de plutones que afloran de forma irregular y con preferencia en los valles y quebradas de la zona centro occidental de la cuenca. Esta super unidad se conforma por gabros, dioritas, tonalitas, monzogranitos y monzodioritas (Rivano et al., 1985). Datada con edades que oscilan entre los 35 a 67 Ma por Rivano et al. en 1985.

2.1.6. Paleógeno

Formación Estero Cenicero **Tle**
(Rivada, 1980)

Constituida en su base por tobas riolíticas y, hacia arriba, andesitas, basaltos, lavas y tobas brechosas de composición andesítica, asociadas a un ambiente continental volcánico. La edad fue acotada al Oligoceno por relaciones de contacto y de corte con otras unidades. Aflora en la zona noroccidental de la cuenca en forma elongada en la dirección N-S.

2.1.7. Neógeno

Formación Farellones **Tf**
(Aguirre, 1960; enmend. Rivano et al. 1990)

Aflora en el área más occidental de la zona de estudio, en forma de banda de 14 km de ancho máximo. Descrita por Aguirre (1960) como una secuencia de volcanitas clásicas y terrígenas y redefinida por Rivano en 1990, quien reconoció 2 miembros, el basal, llamado Tuquitos, conformado por tobas líticas dacíticas a riodacitas y el superior, llamado Buitre, compuesto de lavas andesíticas y andesítico-basálticas. Munizaga y Vicente en 1982 dataron la formación con K-Ar obteniendo edades que oscilan entre $8,4 \pm 0,4$ y $18,7 \pm 4$ Ma.

Super unidad Río Grande Trg
(Rivano et al., 1985)

Conformada por plutones y stocks que afloran en forma de dos cuerpos en la zona oriental de la cuenca, de composiciones monzograníticas, dioríticas y gabroideas (Rivano et al., 1985). Datada por Rivano et al. (1985) y Cuitiño (1985) con edades comprendidas entre los $23,9\pm 2,4$ a $26,3\pm 1,1$ Ma.

Super unidad Río Chicharra Tch
(Rivano et al. 1985)

Aflora como cuerpos individuales de forma alargada en la dirección N-S de cuerpos plutónicos a sub-volcánicos, compuestos por monzodioritas, monzogranitos, dioritas y dacitas (Rivano et al., 1985). Datada con edades que van desde $8\pm 0,3$ a $17,2\pm 0,8$ Ma (Rivano et al., 1985; Munizaga y Vicente, 1982).

Formación Confluencia Tc
(Rivano y Sepúlveda, 1991)

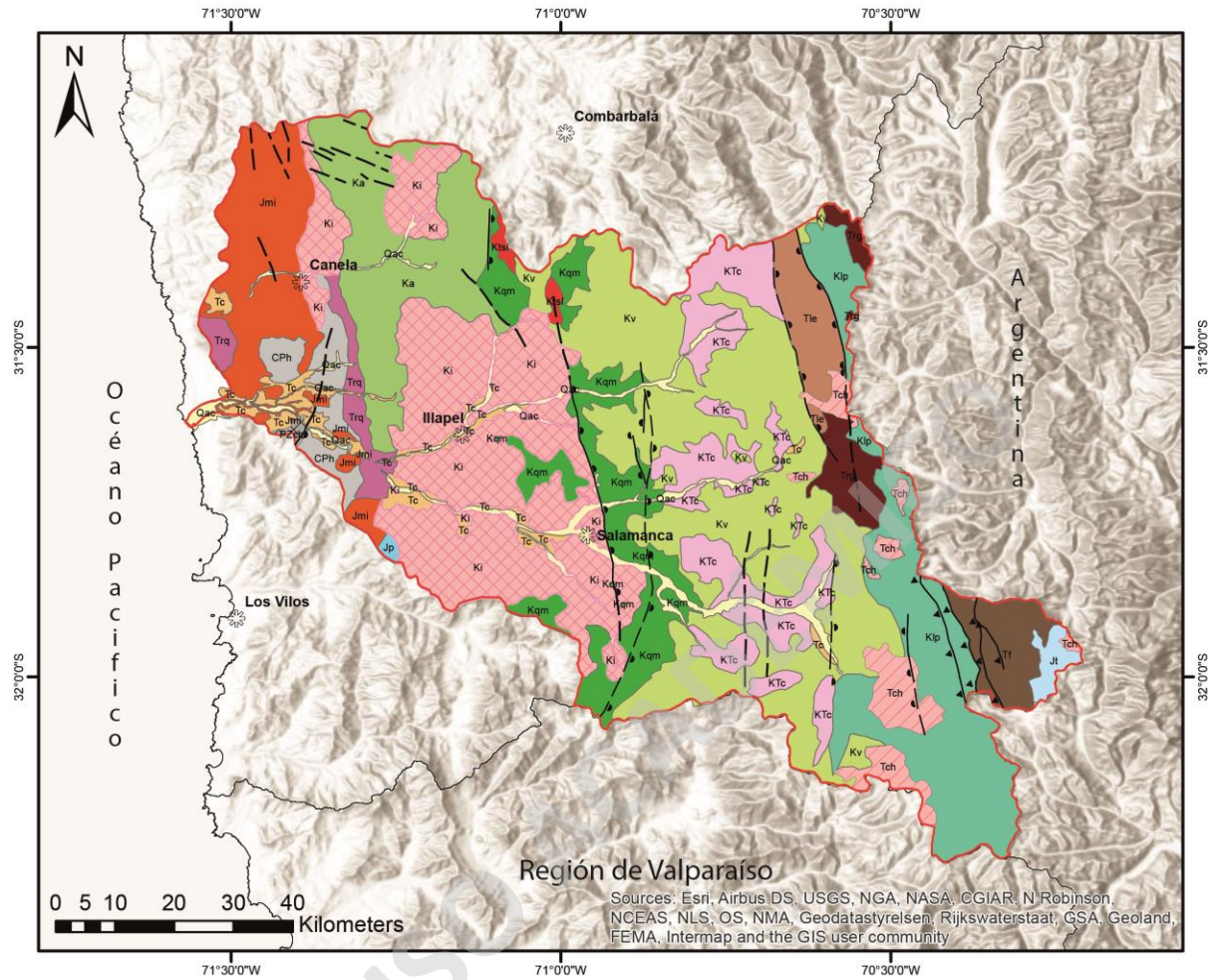
Se dispone en forma de planicies aledañas a las quebradas en la parte oriental de la zona. Descrita como depósitos semiconsolidados de origen fluvio aluvial, compuestos por gravas, arenas y limos de edad Mioceno-Plioceno.

2.1.8. Cuaternario

Depósitos Aluviales y Coluviales
(Rivano y Sepúlveda, 1991)

Dispuestos rellenando valles y quebradas de la zona y asociados a los cursos de agua actuales. Conformados por gravas y ripios mal estratificados, y arenas y limos con buena estratificación.

Mapa geológico cuenca del Río Choapa



Leyenda

(Qac) Depósitos aluviales y coluviales	(Ka) Formación Arqueros	(Tch) Super Unidad Río Chicharra
(Tc) Formación Confluencia	(Jp) Estratos De Pupio	(Trg) Super Unidad Río Grande
(Tf) Formación Farellones	(Jt) Formación Tordillos	(KTc) Super Unidad Cogoti
(Tle) Formación Los Equinos	(Trq) Formación El Quereo	(KTsl) Super Unidad San Lorenzo
(Kv) Formación Viñita	(CPh) Formación Huentelauquen	(Ki) Super Unidad Illapel
(Kqm) Formación Quebrada Marquesa	(PZch) Complejo metamórfico del Choapa	(Jmi) Super Unidad Mincha
(Klp) Formación Los Pelambres		

Simbología

Centro Urbano	Contorno Cuenca Río Choapa	Falla Probable y/o Lineamiento
Falla Inversa Observada	Falla Normal Observada	Falla Normal Inferida

Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del Río Choapa. Fuentes: cartas Hoja de Illapel (Rivano y Sepúlveda, 1991) y Quillota - Portillo (Rivano y Sepúlveda, 1991).

2.2. Geomorfología

El principal agente controlador de la geomorfología desarrollada en el margen occidental del continente sudamericano es la subducción activa de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. En este contexto de orogenia activa se ubica la cuenca del Río Choapa, cuya geomorfología a gran escala se puede dividir en 4 franjas subparalelas a la fosa de subducción (Figura 3), de Oeste a Este son (Rivano y Sepúlveda, 1991):

- **Planicies marinas:** Franja angosta y plana, dispuesta en forma de terrazas discontinuas de ancho máximo 10 kilómetros, ubicada en el borde occidental de la Cordillera de la Costa a una altura de entre 0 a 150 m.s.n.m.
- **Cordillera de la costa:** Cadena montañosa de ancho y altura variable entre 27 y 35 Km y 150 a 1200 m.s.n.m. respectivamente en la zona de la cuenca del Río Choapa. Particularmente, entre los 29.5° y 32° S, este macro relieve se ve degradado y seccionado por la red de drenaje (Aguilar et al, 2013). Esto, sumado a el aumento progresivo de las elevaciones desde la costa hasta la divisoria de aguas impide diferenciar la Cordillera de la Costa de los Andes (Rodríguez et al, 2009).
- **Cordillera media:** Cordones de cerros que unen la cordillera de la costa con la cordillera principal. Dentro de la zona de estudio presenta un ancho máximo de 30 Km y alturas que varían entre 350 y 2700 m.s.n.m.
- **Cordillera Andina:** Principal rasgo geomorfológico de la zona. Presenta un relieve abrupto, con alturas que llegan hasta los 4400 m.s.n.m. y un ancho variable hasta 70 Km de ancho.

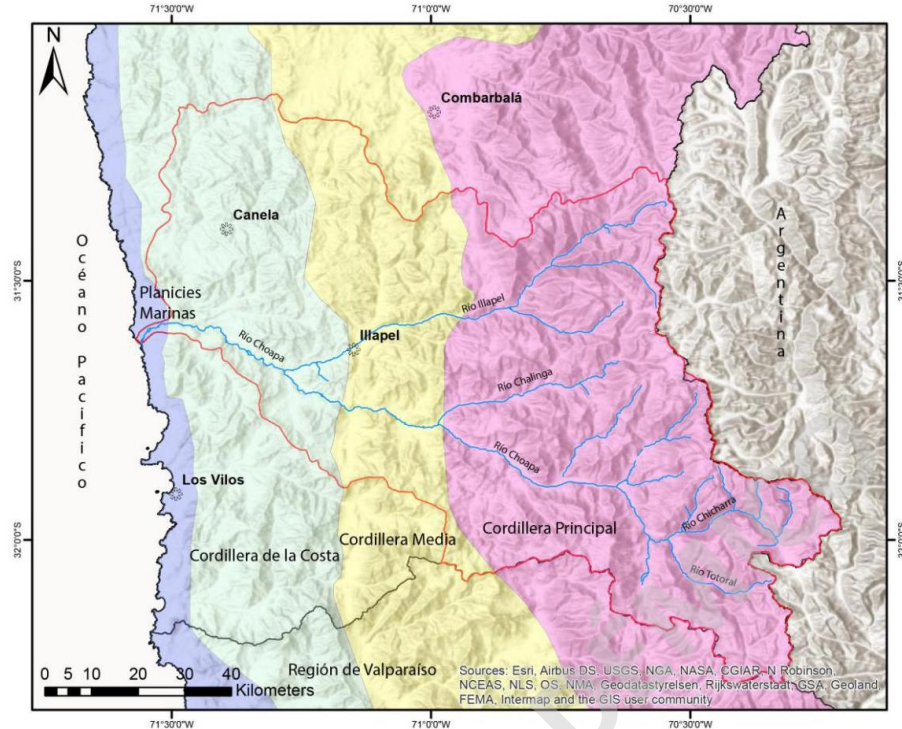


Figura 3. Mapa geomorfológico cuenca Río Choapa. Fuente: Elaboración propia con datos de Rivano y Sepúlveda, 1991.

El principal drenaje de la cuenca es el Río Choapa, que nace en la alta Cordillera de los Andes por la confluencia de los ríos Chicharra y Totoral. Su morfología y dinámica serán explicadas según la pendiente que presenta, definiendo así, 3 subdivisiones. Zona baja, con una pendiente promedio de 0,59%, zona media que presenta una pendiente media de 1,34% y finalmente, la zona alta, que tiene una pendiente media de 4,68% (Figura 4).

- **Zona Baja:** Comienza en la desembocadura del Río Choapa y termina 15 km aguas arriba de la confluencia del Río Illapel. En este tramo, el valle presenta un rumbo preferente NO-SW y anchos que varían entre 50 y 2500 metros, siendo las zonas angostas muy poco frecuentes. El relieve de las rocas circundantes tiende a ser muy suavizado (Figura 5) y el río en sí, presenta características propias de un río meandrónico.
- **Zona Media:** Empieza 15 Km aguas arriba de la junta con el Río Illapel y termina en la confluencia con el Río Manque. En este tramo, el valle tiene un rumbo preferente NO-SW y anchos que varían entre 200 y 2000 metros. El relieve de las rocas circundantes es más escarpado que en la zona baja, con énfasis en los sectores cercanos a la confluencia con el Río Manque (Figura 5). El río en esta zona es meandrónico, con mucha menos sinuosidad que en la zona baja.

- Zona Alta:** Empieza en la confluencia con el Río Manque y termina en la cabecera de la cuenca, abarcando el Río Totoral. Este tramo, el valle tiene un rumbo preferente NNE-SSW y anchos que varían entre 10 y 1000 metros, siendo las zonas angostas muy comunes, en especial en el área del Río Totoral. La morfología de las rocas que encajonan el valle es muy escarpada, con abundancia de pedimentos abruptos circundantes al depósito (Figura 5). El río en esta zona es de tipo recto, con alta incidencia en el basamento rocoso.

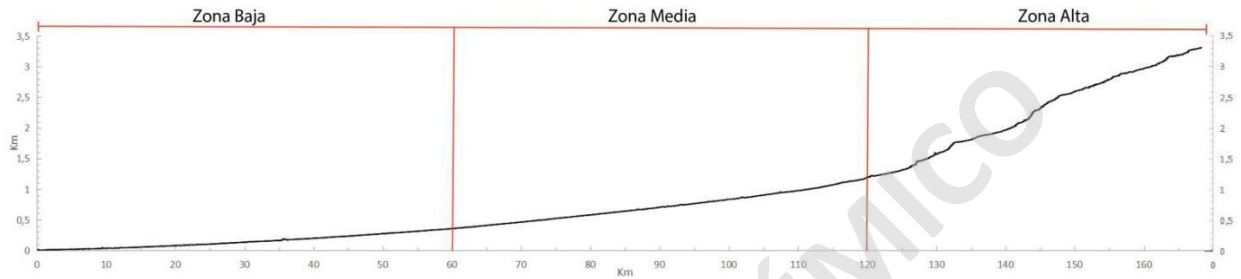


Figura 4. Perfil cauce del Río Choapa con sectorización según pendiente. Elaboración propia con datos DEM Alos palsar.

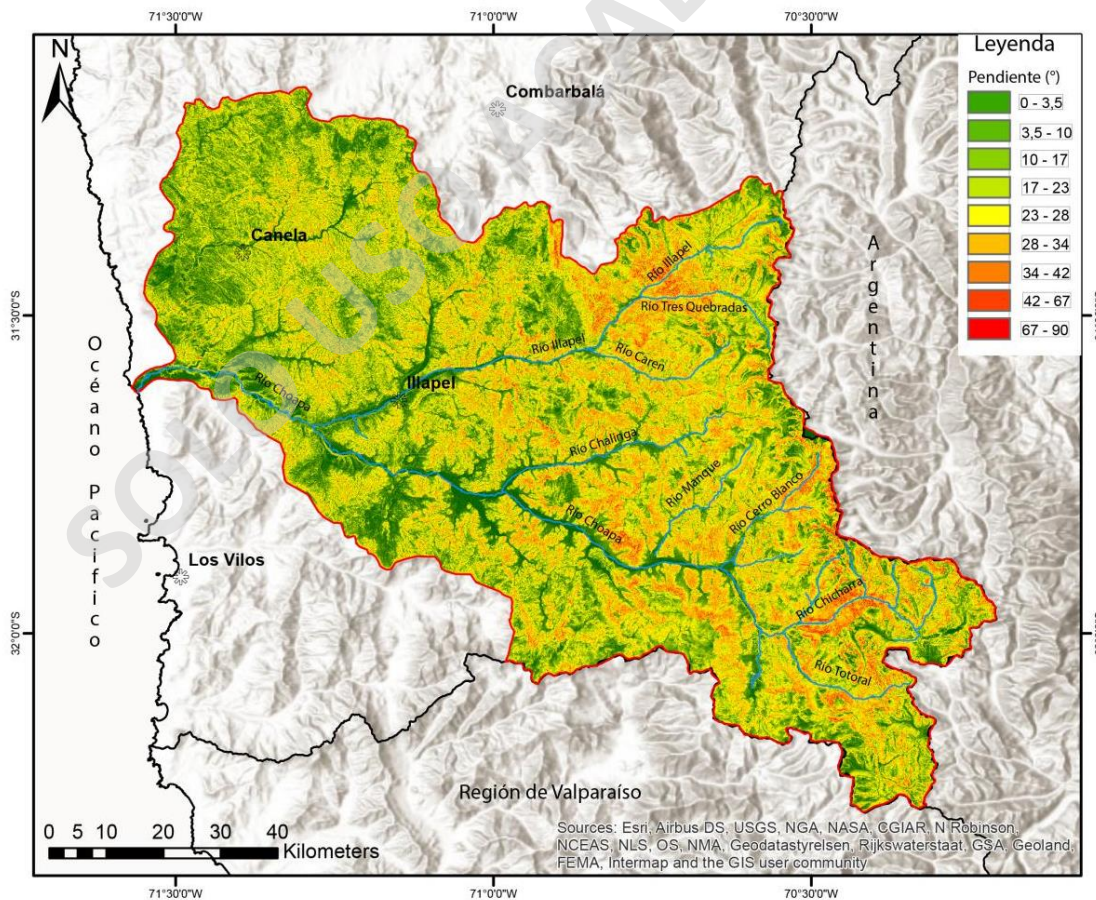


Figura 5. Mapa de pendientes cuenca del Río Choapa. Elaboración propia con datos DEM Alos palsar.

2.3. Estructuras y contexto geodinámico

El borde Oeste del continente sudamericano se caracteriza por la subducción activa de la placa de nazca por debajo de la sudamericana. Dentro de este contexto la cuenca del Río Choapa se ubica en la zona de “*flat-slab*” de los Andes Centrales (Latitud 32°- 33° Sur).

Rivano y Sepúlveda (1991) reconocieron tres macro unidades estructurales en la zona, de Oeste a Este son:

- **Dominio costero:** Basamento Paleozoico limitado al Este por una discordancia angular con la formación El Quereo. Se puede distinguir un ambiente tectónico sometido a polideformación conformado por el Complejo Metamórfico del Choapa y la Formación Arrayán. En la zona de la cuenca del Río Choapa afloran en este dominio una serie de fallas de rumbo preferencial N-S y NE-SO, siendo la más destacable la falla normal Millahue con manteo al Este.
- **Dominio Central:** Contiene un estilo de plegamiento suave y amplio en la Formación Arqueros y un gran sinclinal que conforma la totalidad Formación Salamanca. Dentro de la zona de estudio aflora la falla normal Pupio de rumbo N-S y manteo al Oeste y las falla Manquehua y Llimpo, ambas de rumbo preferente N-S y manteo al Oeste.
- **Dominio Cordillerano:** Las principales estructuras se dan como parte de cabalgamientos que han generado a nivel local pliegues de arrastre y fallas inversas de alto ángulo con vergencia preferente al Oeste. En la zona de la cuenca del Río Choapa, en términos de deformación frágil destacan el graben Estero Cenicero, la falla inversa Río Alitre de rumbo N-S y vergencia al Oeste y la falla normal Pocuro de rumbo N-S y manteo al Este. La deformación dúctil es abundante, en forma de pliegues anticlinales y sinclinales en la Formación Los Pelambres.

2.4. Hidrología

La cuenca del Río Choapa fue subdividida en siete cuencas para el análisis hidrológico (Figura 6):

- Río Choapa Bajo
- Río Choapa Medio
- Río Illapel
- Río Chalinga
- Río Cerro Blanco
- Río Chicharra
- Río Totalal

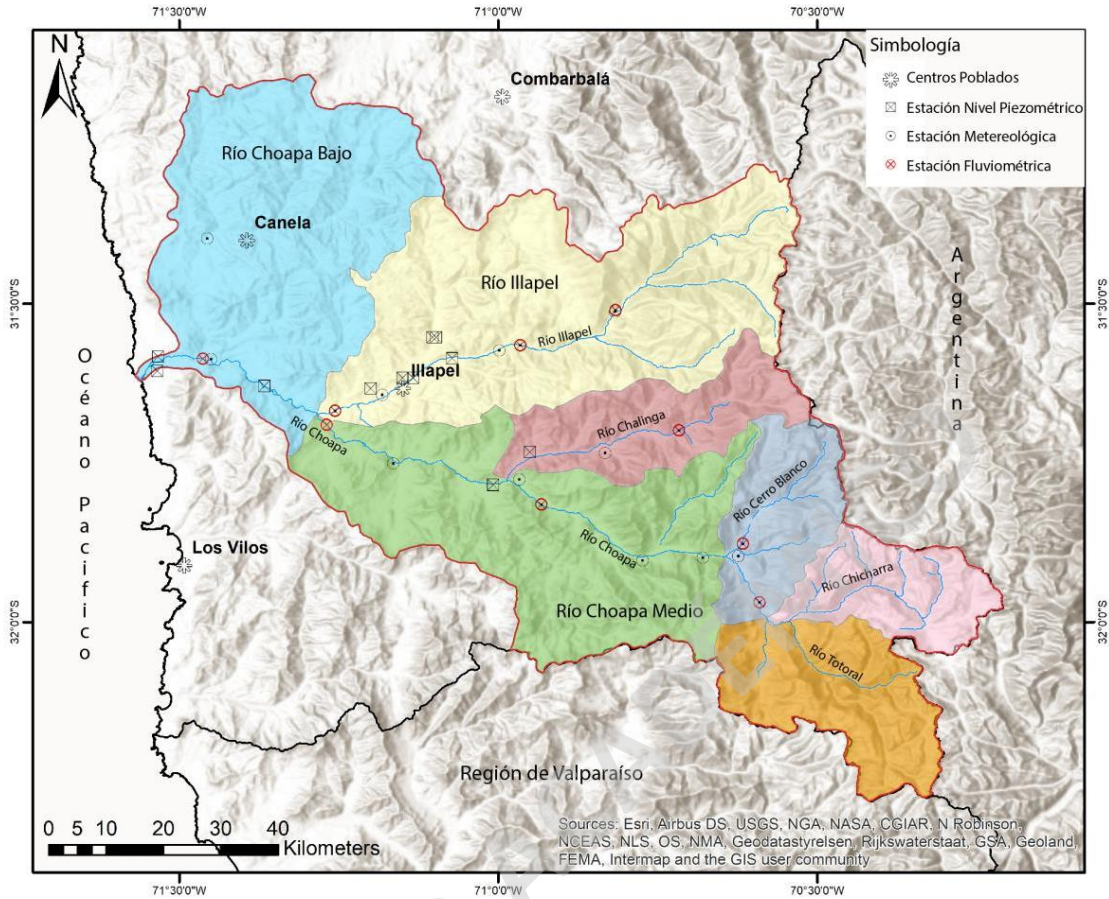


Figura 6. Subdivisión cuenca del Río Choapa y ubicación geográficos puntos de toma de datos de DGA.

2.4.1. Precipitaciones

Para obtener un análisis histórico de las precipitaciones en las distintas subcuencas que conforman la cuenca del Río Choapa, se trabajaron 11 estaciones meteorológicas de la dirección general de aguas (DGA) que tengan datos registrados en al menos 28 de los últimos 30 años. Además, las estaciones fueron seleccionadas evitando proximidad entre sí, para aumentar la representatividad del análisis (Tabla 1). Las subcuencas Río Totoral y Río Chicharra no tienen estaciones meteorológicas, por lo que quedan excluidas de este análisis.

Las precipitaciones de las últimas 3 décadas han sido homogéneas entre las 5 subcuencas, en donde, todas presentan una tendencia similar a la disminución sistemática de las precipitaciones, con énfasis en el periodo 2018 - 2019 (Figura 7), esto se ve respaldado por las medias móviles, en que desde el año 2005 ninguna ha superado la media histórica de su respectiva subcuenca, lo que implica que incluso el periodo anómalo 2015-2017 de altas precipitaciones fue capaz de hacer un impacto a un mayor plazo en el estado hídrico de la zona.

Sub-Cuenca	Estación meteorológica	Coordenadas		Altura m.s.n.m.
		Norte (m)	Este (m)	
Río Choapa Bajo	La Canela	6523752	266445	290
	Mincha Norte	6502706	267509	50
Río Choapa Medio	Limahuida	6485124	294965	300
	Coiron	6468923	332248	840
	Salamanca	6482674	313736	510
Río Cerro Claro	Cuncumen	6469914	346469	1100
	Río Choapa en Cuncumen	6461883	349754	1200
Río Chalinga	San Agustín	6487532	326406	1050
Río Illapel	Illapel DGA	6497017	293094	290
	Huintil	6505125	310378	650
	Las Burras	6512155	327474	1150

Tabla 1. Estaciones meteorológicas usadas en el análisis, sus coordenadas geográficas en UTM y su altura. Fuente: Datos DGA.

Particularidades se dan en las cuencas Río Cerro Claro y Río Choapa Medio (Figuras 7a y 7c), en donde eventos de altas precipitaciones previos al año 2000 tienden a ser más intensos que en las otras tres subcuencas.

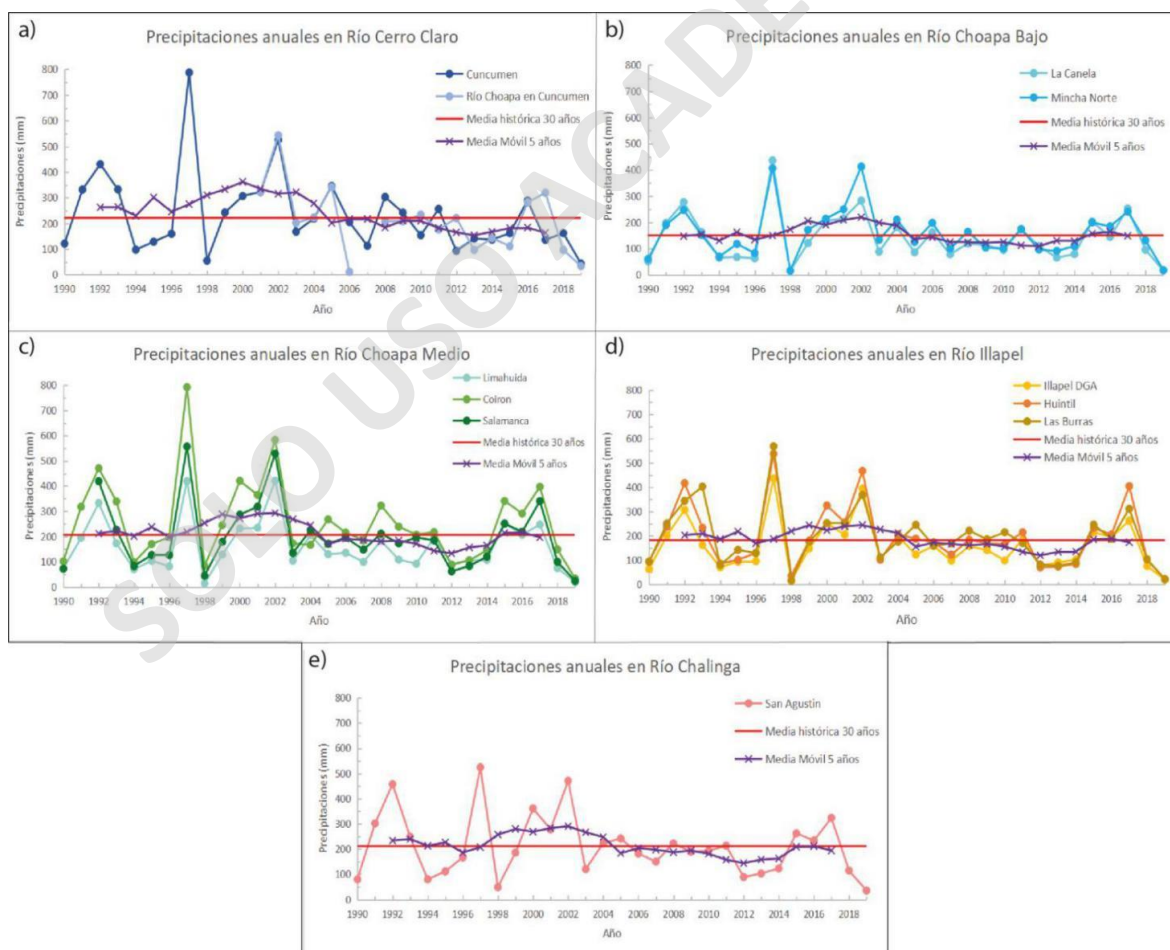


Figura 7. Gráficos precipitaciones anuales en subcuencas del Río Choapa. a) Subcuenca Río Cerro Claro. b) Subcuenca Río Choapa Bajo. c) Subcuenca Río Choapa Medio. d) Subcuenca Río Illapel. e) Subcuenca Río Chalinga. Fuente: Datos DGA.

2.4.2. Caudales

Los caudales históricos en las distintas subcuencas que conforman la cuenca del Río Choapa se obtuvieron de nueve estaciones fluviométricas de la DGA, que contienen datos registrados en al menos 28 de los últimos 30 años. Además, las estaciones fueron seleccionadas evitando proximidad entre sí, para aumentar la representatividad del análisis (Tabla 2). Las subcuencas Río Totoral y Río Chicharra no tienen estaciones fluviométricas, por lo que quedan excluidas de este análisis.

Sub-Cuenca	Estación Fluviométrica	Coordenadas		Altura m.s.n.m.
		Norte (m)	Este (m)	
Río Choapa Bajo	Río Choapa aguas arriba estero La Canela	6502749	266282	40
Río Choapa Medio	Río Choapa en Salamanca	6478374	317085	500
	Río Choapa en Puente Negro	6491637	284944	200
Río Cerro Claro	Río Cuncumen antes junta Choapa	6472007	347110	1030
	Río Choapa en Cuncumen	6461883	349754	1200
Río Chalinga	Río Chalinga en La Palmilla	6491612	337333	800
Río Illapel	Río Illapel en El Peral	6494086	286157	206
	Río Illapel en Huintil	6506056	313467	775
	Río Illapel en Las Burras	6512386	327549	1079

Tabla 2. Estaciones Fluviométricas usadas en el análisis, sus coordenadas geográficas en UTM y su altura. Fuente: Datos DGA.

Los caudales de las últimas 3 décadas en las 5 subcuencas tienen todos a disminuir (Figura 9). Comparándolos entre sí, las medias de caudales anuales en las subcuencas Río Illapel y Río Chalinga son mucho menores que en el resto de la cuenca.

Los máximos y mínimos caudales (Figura 9) son correlacionables con los eventos pluviométricos registrados en la zona (Figura 7). Se debe considerar igual que existe un efecto no medurado, relacionado a el aumento de las extracciones de agua al sistema río - acuífero con los años.

La altura y ubicación geográfica de los cauces tiene un efecto en la estacionalidad de sus máximos caudales en un año. En la zona de estudio este efecto se ve en contraste entre las estaciones Río Choapa en Cuncumén, que se ubica en la cordillera principal y la estación Río Choapa arriba del estero La Canela, que se ubica en las planicies litorales (Figura 8). En la primera, los máximos caudales se dan en la época de octubre a diciembre, asociados a los deshielos de las nieves caídas en invierno. Mientras que, en la segunda, se ve un efecto mixto, con altos entre mayo a julio, asociados a las precipitaciones y en la época de des hielos, debido a que al estar en la zona baja de la cuenca recibe aportes de todos los afluentes del río.

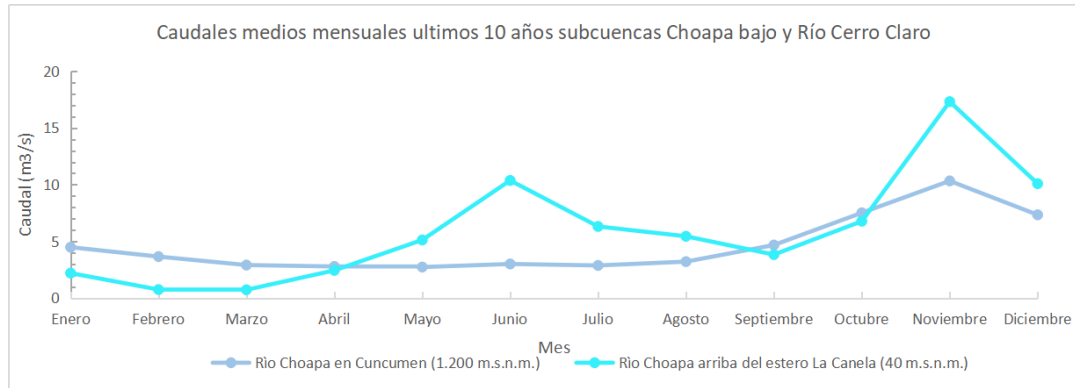


Figura 8. Gráfico de caudales medios mensuales en los últimos 10 años en subcuencas Río Choapa Bajo y Río Cerro Claro.

Fuente: Datos DGA.

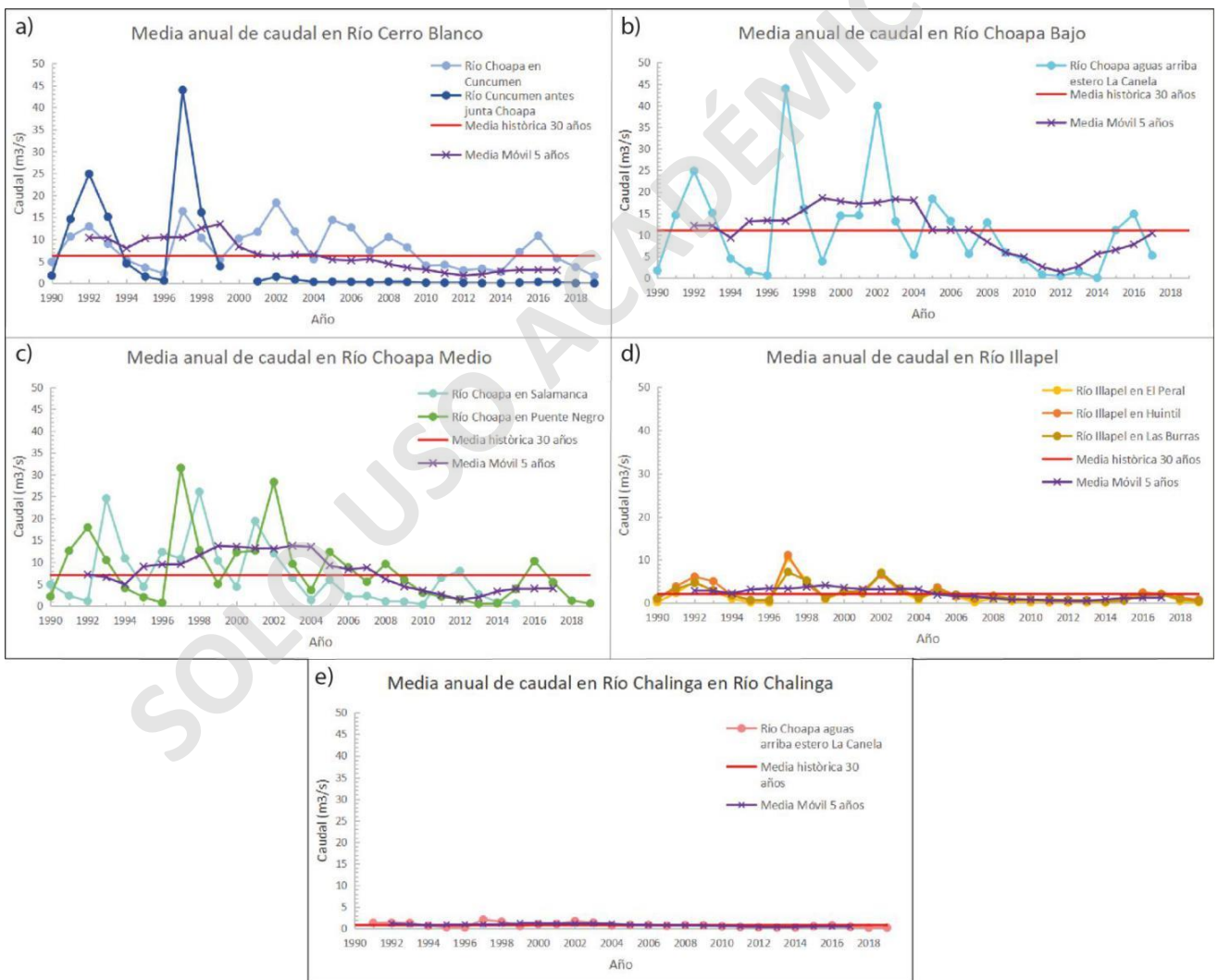


Figura 9. Gráficos media caudal anual en subcuencas del Río Choapa. a) Subcuenca Río Cerro Claro. b) Subcuenca Río Choapa Bajo. c) Subcuenca Río Choapa Medio. d) Subcuenca Río Illapel. e) Subcuenca Río Chalinga. Fuente: Datos DGA.

2.4.3. Temperatura

Las temperaturas en la cuenca varían según las subcuencas, a modo general, las menores temperaturas se dan durante los meses de invierno y las mayores temperaturas se observan entre diciembre y marzo, en verano (Figura 10). Dentro de las subcuencas, Río Choapa Medio y Río Illapel tienen temperaturas muy similares durante el año, pero en Río Choapa Alto, las temperaturas son constantemente menores, esto está asociado a su ubicación con respecto a la Cordillera Andina.

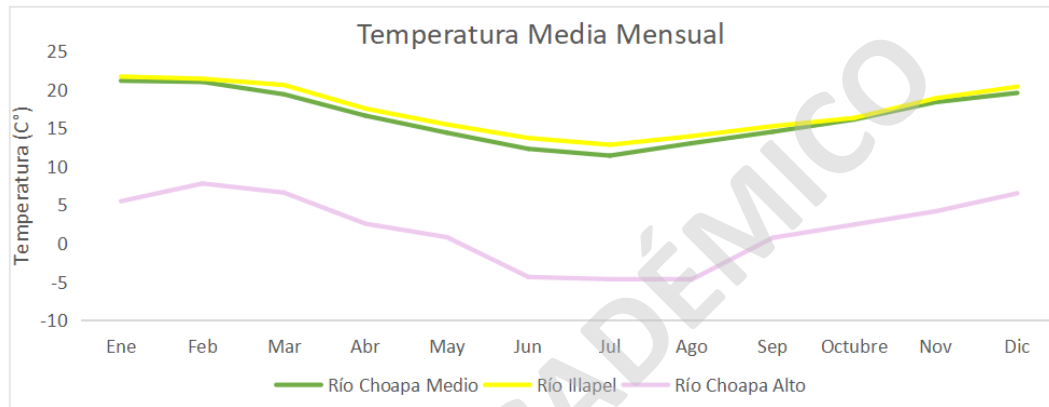


Figura 10. Gráfico temperatura media mensual es 3 subcuencas del Río Choapa. Fuente: Datos DGA.

La altura de la isoterma 0°C delimita aproximadamente las zonas que recibirán lluvia o nieve (Garreaud, 2013), su análisis es importante debido a que el estado de las precipitaciones condiciona las variaciones estacionales de los caudales en la cuenca. En la zona de estudio, la isoterma 0 se ubica en la alta Cordillera de los Andes, subparalela a la frontera con Argentina (Figura 11).

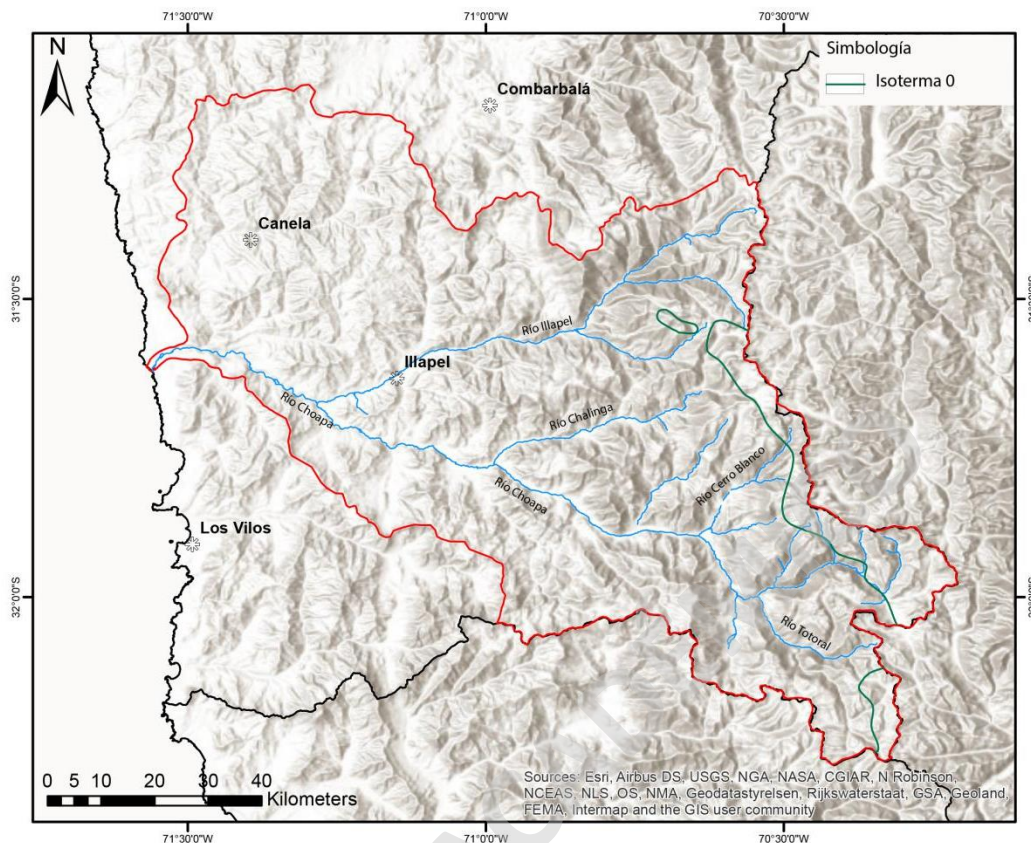


Figura 11. Mapa cuenca del Río Choapa con isoterma 0. Fuente: Datos DGA.

2.4.4. Nivel freático

El nivel freático en acuíferos libres corresponde al nivel en donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica. Los niveles freáticos históricos en las distintas subcuencas que conforman la cuenca del Río Choapa se obtuvieron de cuatro pozos de la dirección general de aguas, que contienen datos registrados en al menos 28 de los últimos 30 años (Tabla 3). Las subcuencas Río Totoral, Río Chicharra, Río Cerro Claro y Río Chalinga no tienen suficientes datos históricos, por lo que quedan excluidos de este análisis.

Sub-Cuenca	Estación meteorológica	Coordenadas	
		Norte (m)	Este (m)
Río Choapa Bajo	Pueblo Huentelauquen	6500436	259538
	Pueblo Huentelauquen 2	6502910	259591
	Tunga Norte	6498190	275546
Río Choapa Medio	Asentamiento El Tambo	6481635	309891
	Asentamiento Panguecillos	6476460	322861
	Chalinga	6487415	315256
Río Illapel	Pueblo Cárcamo	6503579	303412
	Pueblo Cuz-Cuz	6498051	291343
	A.P. Illapel	6499993	296050

Tabla 3. Pozos usados en el análisis y sus coordenadas geográficas en UTM. Fuente: Datos DGA.

Los niveles freáticos en la cuenca del Río Choapa presentan la inclinación común a mantenerse relativamente estables hasta el año 2005, en donde empiezan a aumentar su profundidad hasta el año 2016, en donde se somerizan abruptamente, asociado al evento de precipitaciones anómalas de ese año. En el último periodo, del 2017 al presente, la tendencia a la profundización de los niveles se ve marcada (Figura 12). El pozo Asentamiento El Tambo (Figura 12b) es el único de los analizados que no presenta la tendencia antes descrita, este pozo más bien ha presentado una profundización estable pero poco considerable de sus niveles desde el año 2009.

Dentro del análisis de niveles freáticos hay que tener en cuenta el efecto del aumento de extracciones subterráneas que ha experimentado la zona en los últimos 20 años. Este fenómeno, probablemente asociado a el aumento de la demanda agrícola y minera del recurso hídrico, indudablemente contribuye a la profundización de los niveles en las últimas décadas.

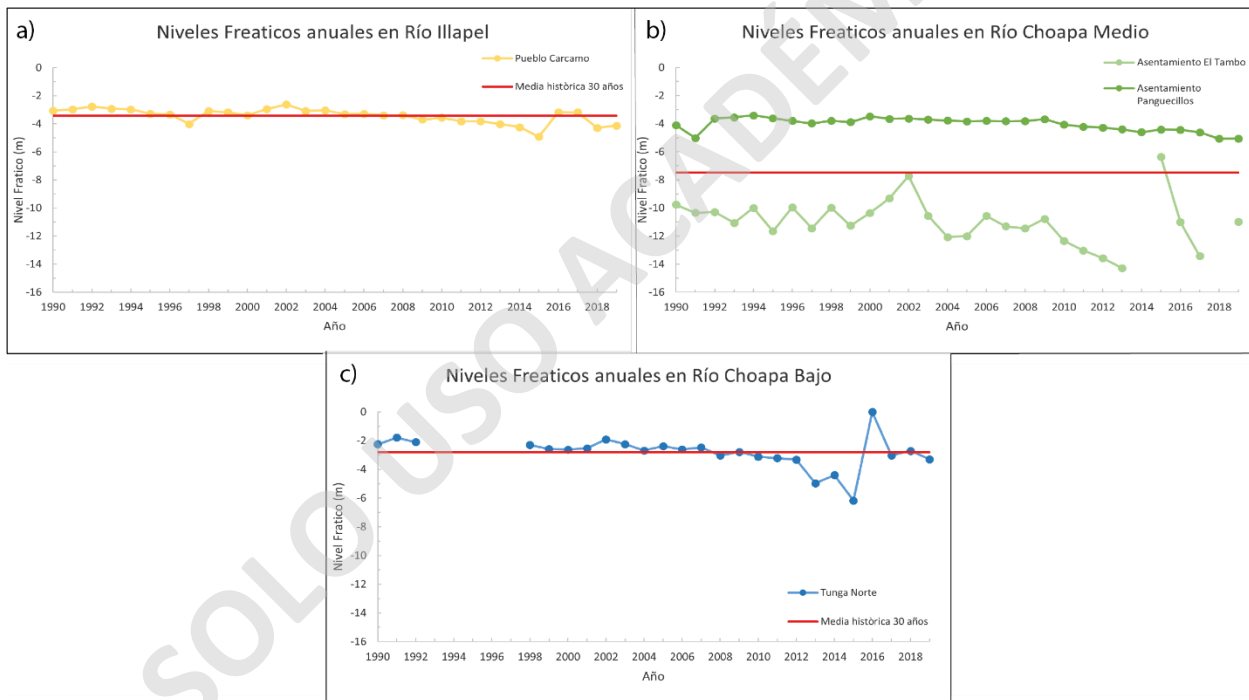


Figura 12. Gráficos niveles freáticos en subcuencas del Río Choapa. a) Subcuenca Río Illapel. b) Subcuenca Río Choapa Medio. c) Subcuenca Río Choapa Bajo. Fuente: Datos DGA.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Acuíferos

Un Acuífero es un depósito no consolidado o formación rocosa permeable capaz de almacenar y transmitir agua a través de poros o fracturas (Guerra, 2018). El agua superficial infiltra a través de las distintas capas del suelo hasta llegar a una capa impermeable, en donde se acumula (Mendéz, 2016).

Los acuíferos son confinados cuando se encuentran entre dos capas limitantes que tienen una conductividad hidráulica nula (Figura 13) y, en consecuencia, están expuestos a una presión superior a la atmosférica (Britannica, 2020), y son libres o no confinados cuando su nivel superior o freático está en contacto con la atmósfera (Figura 13) y es libre de variar según los aportes superficiales (Şen, 2015).

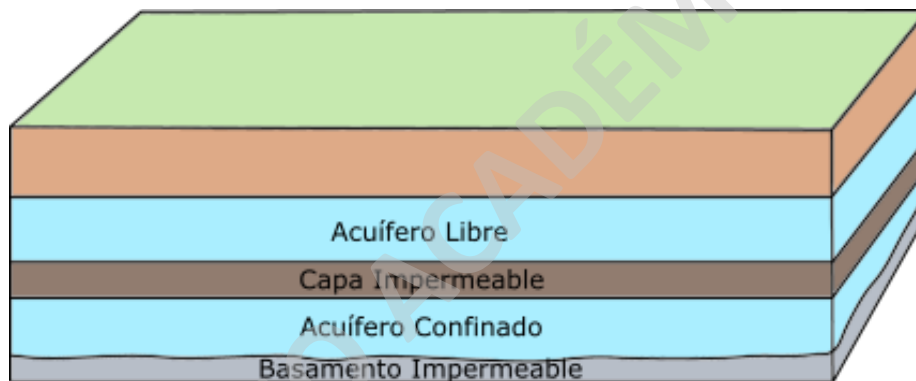


Figura 13. Simplificación acuíferos libres y confinados. Fuente: Datos DGA.

3.2. Parámetros hidráulicos

3.2.1. Porosidad total

La porosidad de la roca o depósito es definida como la razón del volumen de poros en contraste con el volumen total. Se expresa como porcentaje (Guo, 2019).

La porosidad responde a la ecuación:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

Donde,

- V_p es volumen total de poros.
- V_t es volumen total del acuífero.

3.2.2. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica ha sido descrita como el parámetro que controla el proceso de infiltración en los acuíferos (Puvvadi et al., 2011), puede ser definida como la capacidad de un fluido de pasar por los poros o fracturas del medio y es dependiente del material (Saravanan, 2019). Un aumento de la conductividad hidráulica de los sedimentos implica que mayor será la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo (Aird, 2019).

La expresión de la conductividad hidráulica (K) es:

$$K = \frac{kg}{\nu} \quad (2)$$

Donde,

- k es permeabilidad.
- g es aceleración de gravedad.
- ν es viscosidad cinemática.

La conductividad hidráulica al ser intrínseca al material (Bouwer, 1978) (Tabla 4), puede variar en múltiples ordenes de magnitud dentro de un mismo deposito según las heterogeneidades propias de los depósitos asociados a rellenos fluvioaluviales.

Material	K (m/día)
Capas de arcilla profundas	10^{-8} - 10^{-2}
Suelos de arcilla	0,2
Suelos de margas	0,1 - 1
Arena fina	1 - 5
Arena media	5 - 20
Arena gruesa	20 - 100
Grava	100 - 1000
Mezcla de arena y grava	5 - 100
Mezcla de arcilla y grava	0,001 - 0,1

Tabla 4. Valores esperados de conductividad hidráulica según material.

3.2.3. Transmisividad

Se puede definir como el flujo de agua que pasa a través de un área perpendicular a la dirección del flujo, de un metro de ancho que se extiende sobre todo el espesor saturado del acuífero (Şen, 2015).

La ecuación de la transmisividad se expresa como:

$$T = kb \quad (3)$$

Donde,

- k es permeabilidad.
- b es la potencia del acuífero.

Krasny en 1993 estableció el potencial de suministro de un acuífero según la transmisividad de este (Tabla 5).

T (m/día ²)	Clasificación	Potencial de suministro de agua subterránea
>1000	Muy Alta	Potencial de gran importancia regional
100 - 1000	Alta	Potencial de menor importancia regional
10 - 100	Intermedia	Potencial de suministro local
1 - 10	Baja	Potencial menor de suministro local
0,1 - 1	Muy Baja	Potencial de suministro local limitado
<0,1	Impermeable	Sin potencial

Tabla 5. Clasificación de potencial de suministro de agua subterránea según la transmisividad del medio.

3.2.4. Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento se define como la cantidad de agua por unidad de volumen de suelo que se drena durante un descenso unitario del nivel freático (Freeze & Cherry, 1979). Durante el descenso del nivel freático el agua se desplaza por la fuerza de gravedad y es sustituida por aire (Guarracino & Tocho, 2013). Este parámetro es equivalente a cuanta agua es realmente disponible para el uso humano (Heath, 1987).

Para acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es:

$$S \cong m_e \quad (4)$$

Donde,

- m_e es porosidad específica.

En acuíferos confinados el agua esta comprimida y es liberada exclusivamente por descompresión (Villarroya, 2009). En ese caso la expresión de almacenamiento específico es:

$$s = \gamma b(m\beta + \alpha) \quad (5)$$

Donde,

- γ es peso específico del agua.
- b es espesor del acuífero.
- m es porosidad del acuífero.
- β es coeficiente de compresibilidad del agua.
- α es coeficiente de compresibilidad del terreno.

3.3. Modelos hidrogeológicos

Un modelo hidrogeológico corresponde a una simplificación del sistema acuífero real, pero que retiene sus aspectos más relevantes (SEA, 2012). Son ampliamente usados en el mundo para estimar recursos hídricos, predecir atributos del acuífero y futuros escenarios hídricos.

El tipo de modelo analizado en esta memoria son los modelos numéricos. Estos son modelos matemáticos que buscan representar el sistema natura a partir de una serie de sistemas de ecuaciones (Oreskes y Bokulich, 2017).

Los modelos numéricos son implementados con el objetivo de entender la hidrodinámica del acuífero y cuantificar el comportamiento del flujo y transporte. Debe representar y explicar la hidrodinámica del sistema a partir capacidad de cálculo de los computadores y el desarrollo de códigos y software (Fundación Chile, 2018).

La construcción de un modelo hidrogeológico numérico se hace a partir de un modelo conceptual previamente propuesto. Para poder migrar de manera adecuada de un modelo conceptual a la construcción de un modelo numérico se necesita definir una serie de atributos, que se pueden considerar como fundamentales (BC MOE, 2012). En el siguiente apartado se describirán las principales características de los atributos que en su definición dependen de la geología.

3.3.1. Dominio de modelo

El dominio de un modelo hidrogeológico numérico corresponde al área en que la simulación matemática será computada, este abarca el volumen de material geológico en el cual ocurren los procesos que se buscan estudiar (SEIA, 2012; BC MOE, 2012).

Particularmente, en caso de acuíferos de relleno de valle como los presentes en el área de estudio, el dominio del modelo corresponde al sedimento de relleno aluvial en el que potencialmente ocurre flujo de agua subterráneo. Los bordes del dominio quedan determinados por la “condición de no flujo” que presenta el basamento rocoso al tener propiedades hidráulicas contrastantes con el depósito (SEIA, 2012).

3.3.2. Capas del modelo

En modelos en que el dominio hidrogeológico presente variaciones en las propiedades hidráulicas asociadas a heterogeneidades propias de la génesis geológica del depósito, es necesario subdividir el dominio en subdominios o capas para aumentar la representatividad y precisión del modelo (NWC, 2012; Gao, 2011). Estas capas deben definirse de manera que representen o reflejen los diferentes estratos que conforman el depósito y apunta a caracterizar o conceptualizar el funcionamiento hidrogeológico del subsuelo (SEIA, 2012) e incorporar la variabilidad natural del sistema al modelo (BC MOE, 2012).

3.3.3. Parametrización

La selección de los parámetros a incluir en un modelo y el método de distribución de estos en el dominio es un aspecto fundamental para la correcta representatividad del sistema hidrogeológico real. Debido a la incertidumbre de la distribución espacial de los parámetros asociada a las

heterogeneidades geológicas dentro de un dominio, se debe elegir una forma apropiada de representar estos parámetros. La guía metodológica de modelos hidrogeológicos canadiense (BC MOE, 2012) define 2 métodos aplicables para determinar la distribución espacial de los parámetros:

- Zonación: Se usa el valor medio de los parámetros hidráulicos para caracterizar el dominio o subdominio en el caso de que un modelo multicapa sea propuesto.
- Interpolación: Consiste en la interpolación de los valores de un parámetro en el dominio a partir de un set de valores conocidos en el espacio. Este método solo debe ser usado si es que existe suficientes datos para conseguir una interpolación representativa.

3.3.4. Discretización de la grilla

La discretización de la grilla hace referencia a el tamaño de las celdas y el método de engrillado. El tamaño de la celda debe ser el apropiado para que el modelo sea simple pero representativo (SEIA, 2012; BC MOE, 2012). Existen dos métodos de engrillado para modelos hidrogeológicos, estos son el método de las diferencias finitas y de elementos finitos.

Estos métodos se diferencian en la geometría de las celdas, siendo de forma triangular la de elementos finitos (Figura 14a) en contraste a una forma rectangular la de diferencias finitas (Figura 14b) (NWC,2012). Una grilla de geometría triangular permite una mejor representatividad de los bordes del dominio en la eventualidad de que el borde del modelo sea altamente irregular y permite una mayor densidad de nodos en zonas de mayor interés. Mientras que al utilizar el método de diferencias finitas se requiere un engrillado mucho más fino para representar de buena forma los bordes del dominio, lo que aumenta el tiempo de computación del modelo (SEIA, 2012; NWC,2012).

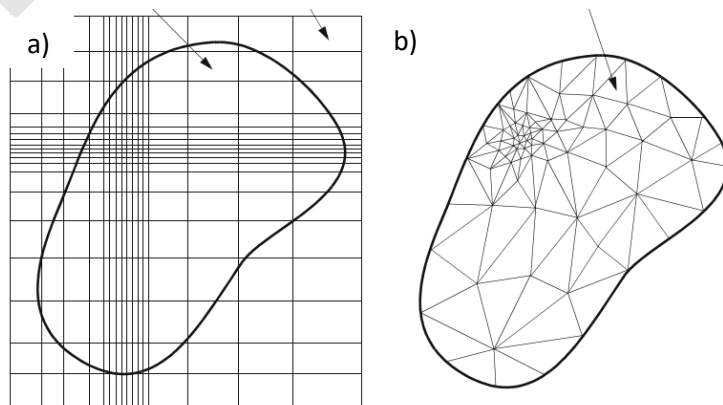


Figura 14. Estructuras de grillas. a) Elementos finitos. b) Diferencias finitas. Fuente: Modificada de Diersch, (2013).

3.4. Geofísica

3.4.1. Método gravimétrico

El método gravimétrico consiste en la medición de las variaciones o anomalías de la atracción gravitatoria que se asocian a cambios en la densidad de las rocas o sedimentos que conforman el subsuelo (Figura 15), permitiendo así, tener una visión de la disposición subterránea de cuerpos de densidad contrastante. Se basa en la primera ley de Newton, que contempla la atracción entre dos cuerpos dependiendo de la masa de estos y la distancia entre si (Geodatos, 2015). Las mediciones se hacen con un gravímetro, en una malla regular o perfil, en las cuales los puntos de medición están definidos previamente.

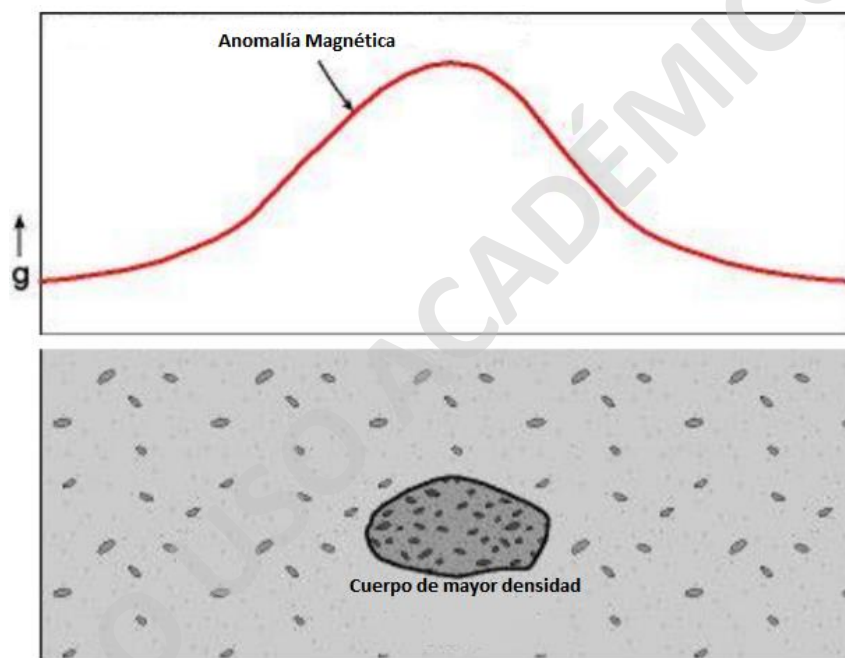


Figura 15. Representación de anomalía magnética generada por un cuerpo de mayor densidad. Fuente: Modificado de Mariita, (2007).

3.4.2. Método eléctrico

Esta metodología tiene por objetivo determinar la distribución de la resistividad de subsuelo. La resistividad de las rocas y depósitos es la propiedad de los materiales que indica su grado de oposición a conducir la corriente eléctrica y depende de su porosidad, disposición geométrica de los poros, la proporción de poros rellenos de agua frente a huecos secos y la resistividad de agua de relleno (Aracil et al. 2003). Este método se emplea inyectando una corriente eléctrica continua en la superficie, a través de dos electrodos (Electrodos A y B) y midiendo el voltaje en otro par de

electrodos (Electrodos M y N) (Figura 16), a lo largo de un perfil de medida y hasta un cierto rango de profundidad (Lugo et al. 2008).

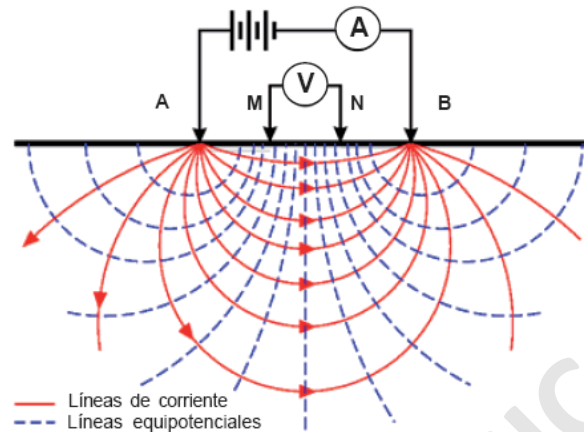


Figura 16. Representación de arreglo de electrodos y respuesta de un cuerpo cargable. Fuente: Geofísica Andina S.A.

3.4.3. Método electromagnético

Esta metodología de prospección geofísica consiste en la inducción de una corriente eléctrica a una espira, generalmente en forma de cuadrado (Tx) desplegada sobre la superficie. El objetivo de esta corriente es generar un campo magnético principal que penetra por el subsuelo e induce campos electromagnéticos secundarios a cuerpos conductivos como capas saturadas en agua (Geodatos, 2015) (Figura 17). Finalmente, se corta la corriente eléctrica y se mide el campo magnético secundario inducido (Rx). La magnitud y decrecimiento en el tiempo de las corrientes secundarias dependen de la conductividad eléctrica del suelo y la forma de los cuerpos o capas conductoras (Guimaraens, 2014), el resultado de este método es la resistividad eléctrica del subsuelo.

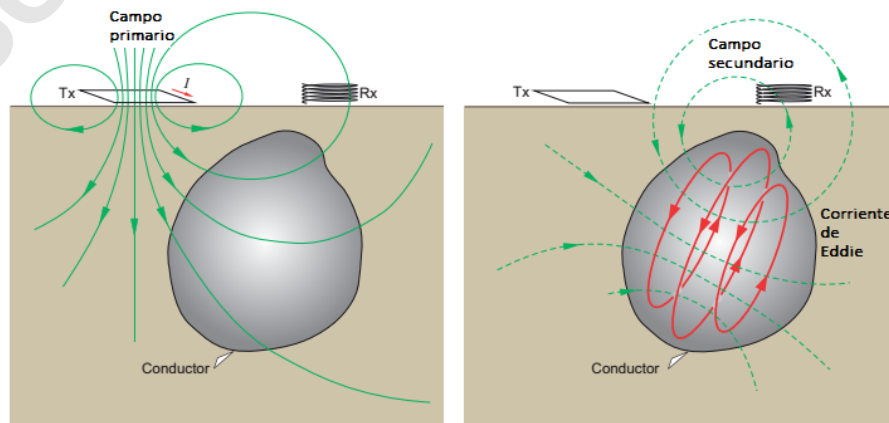


Figura 17. Representación gráfica de disposición de espira y respuesta de cuerpo conductor.

3.5. Pruebas de bombeo

Las pruebas de bombeo se utilizan para calcular las propiedades hidráulicas del subsuelo y se sustentan en el principio de que si se bombea agua de un pozo y se mide la subsidencia del agua en este y en otros pozos a una distancia conocida, se puede calcular la ecuación del flujo del agua que circula por el medio (Kruseman y Ridder, 1994).

Estas pruebas se dividen en dos tipos, de gasto variable y gasto constante. En la prueba de bombeo por gasto variable, se extrae agua de un pozo con un caudal conocido y constante por un periodo de tiempo determinado, luego de que se acabe el tiempo se aumenta el caudal y se reinicia el tiempo. El objetivo de esta prueba es determinar un caudal sustentable para realizar la prueba por gasto constante. Una prueba por gasto constantes se basa en la extracción de un caudal conocido por un largo periodo de tiempo y medir la disminución del nivel freático en pozos a una distancia conocida (Winkley, 2019).

SOLO USO ACADÉMICO

4. RESULTADOS

4.1. Definición de atributos

Para la construcción de un modelo hidrogeológico numérico se deben definir una serie de atributos o características mínimas para que las funciones matemáticas entreguen una correcta representación del sistema acuífero real (BC MOE, 2012; NWC,2012; SEIA, 2012). La definición de estos atributos es un paso fundamental para el planteamiento de un modelo hidrogeológico numérico, por lo que representan una unidad fundamental de los modelos y serán la base del análisis de brechas en este estudio.

Para determinar que atributos serán incluidos en este trabajo se llevó a cabo una metodología de 3 pasos (Figura 18) que consto de una recopilación bibliográfica y la aplicación de una serie de filtros con el objetivo de eliminar ambigüedades por parte de los autores y determinar que atributos son apropiados considerar desde un punto de vista geológico.

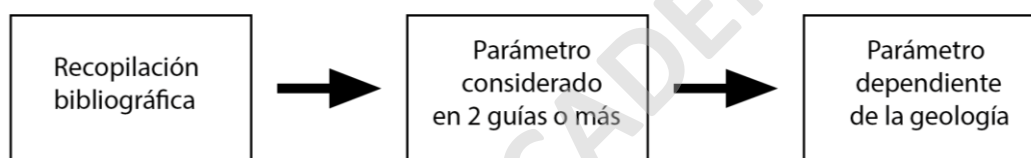


Figura 18. Secuencia metodológica para la definición de atributos a considerar en este estudio. Fuente: Elaboración propia.

Distintas fuentes (BC MOE, 2012; NWC,2012; SEIA, 2012) proponen diferentes atributos a ser considerados fundamentales en sus respectivas metodologías para la construcción de modelos hidrogeológicos. Para tener una perspectiva multidimensional de aquellos atributos que deben ser considerados en este estudio, se realiza un análisis bibliográfico de aquellos trabajos que abarcan esta temática, creando así, una tabla resumen de los atributos considerados respectivamente por los autores (Tabla 6).

Atributo	Fuente		
	SEIA, 2012	BC MOE, 2012	NWC, 2012
Dominio de modelación			
Discretización			
Dominio en el tiempo			
Condiciones de borde			
Tasa de recarga			
Parametrización			
Selección de pozos de observación			
Capas del modelo			
Definir condiciones iniciales			

Tabla 6. Tabla resumen de atributos considerados por distintos autores para la confección de modelos hidrogeológicos. Fuente: SEIA (2012), BC MOE (2012) y NWC (2012).

Como criterio de definición de aquellos atributos que serán evaluados en este estudio, se propone que serán contemplados todos aquellos atributos que sean considerados de relevancia en al menos dos de las tres guías recopiladas (Tabla 6). El objetivo de este filtro es evitar ambigüedades de alguno de los autores. Los atributos considerados por los autores en primera instancia, antes del filtro de este estudio, son:

- Dominio de modelación.
- Discretización de la grilla.
- Dominio en el tiempo.
- Condiciones de borde.
- Parametrización.
- Capas del modelo.
- Condiciones iniciales.

Relacionado los objetivos de este estudio, serán evaluados solo aquellos atributos que sean netamente dependientes de características o propiedades intrínsecas a la geología de la cuenca del Río Choapa. De acuerdo con lo anterior, y luego de un análisis de la dependencia geológica de los atributos, aquellos que serán considerados a análisis a lo largo de este estudio son:

- Dominio de modelación.
- Parametrización.
- Capas del modelo
- Discretización de la grilla.

4.2. Definición de modelos a evaluar

Con respecto a lo expuesto arriba, para realizar una evaluación de los atributos determinantes en cada modelo es necesario que este exponga un mínimo de información sobre las metodologías y suposiciones adoptadas para su confección.

De los cuatro modelos disponibles en la cuenca del Río Choapa, los de DGA 2019 y DICTUC-SEI 2019 se basan en el modelo de AC Ingenieros del 2012 para conseguir una migración a lenguaje MODFLOW nativo y un acople a un modelo superficial respectivamente. Por lo que en esencia no aportan nuevo conocimiento ni interpretaciones al original, razón por la cual no serán incorporados en el análisis de esta memoria.

En consecuencia de lo anterior, los modelos que serán objeto de este estudio son los presentados por Ac Ingenieros el año 2012 titulado “investigación recarga artificial de acuíferos cuencas del

Río Choapa y Quilimarí, región de coquimbo” y por Hidrogestión el año 2016 titulado “Modelación hidrogeológica de acuíferos de la cuenca del Río Choapa – región de coquimbo ubicación de baterías de pozos colectivos para dar mayor explotación al acuífero compensando los recursos superficiales de las interferencias río-acuífero” (Tabla 7).

Modelos evaluados	Modelos no evaluados
AC Ingenieros, 2012	DICTUC y SEI, 2019
Hidrogestión, 2016	DGA, 2019

Tabla 7. Tabla resumen modelos a evaluar y a no evaluar. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Identificación de brechas

A partir de lo dicho anteriormente, la identificación de brechas se basa en el análisis de como los modelos definidos abarcan y solucionan la definición y caracterización de cada atributo definido previamente. Entonces, la estructura en que se presentan las brechas como resultados es bajo el título del atributo a partir del cual fueron identificadas.

4.3.1. Dominio de modelación

Como se estableció en el capítulo Marco Teórico, el dominio de un modelo hidrogeológico para un sistema contenido en depósitos fluvio aluviales, como lo es el objeto de este estudio, corresponde a todo el relleno sedimentario, que debido a variables relacionadas a los procesos que condicionaron su génesis puede presentar características que permitan el flujo y almacenamiento de agua a través de su porosidad primaria.

Para determinar la profundidad de contacto roca-relleno en la cuenca del Río Choapa existen datos directos o duros, obtenidos a partir de mediciones directas, como la profundidad en la que un pozo alcanza el basamento y datos indirectos o blandos, compilados a partir de mediciones indirectas como geofísica.

Con el objetivo de desarrollar un sólido en tres dimensiones que represente el borde inferior y lateral del dominio del modelo a partir de los datos de la profundidad del basamento, ya sean directos o indirectos, se aplican métodos de interpolación. Estos permiten estimar matemáticamente el valor que debería tener una variable en un punto sin medición a partir de los datos existentes colindantes.

Brecha 1: Falta de validación de interpolación y reconocimiento de la incertidumbre en la modelación del basamento

Wellman (2010) clasifica la incertidumbre de modelos geológicos en 3 categorías. La primera, asociada a la calidad e imprecisión de los datos en sí, la segunda, relacionada a la incertidumbre del modelo por la interpolación de variables y la tercera, que hace referencia a la falta de conocimiento general del sistema real.

Para este análisis se considerará la segunda categoría de Wellman (2010). Como se definió arriba, esta incertidumbre se desarrolla o acentúa en los espacios que hay entre los datos que son usados en la interpolación (Figura 19.b). Debido a la distribución en forma de perfiles de TEM y gravimetría, mayoritariamente transversales y con menor frecuencia longitudinales (Figura 20), esta incertidumbre se vería aumentada en zonas con alta distancia entre perfiles geofísicos. El concepto de que la incertidumbre crece lejos de los datos medidos se basa en que mientras más lejos se encuentra un punto interpolado de uno medido más probable es que estos no tengan una correlación espacial y menos probable que el valor interpolado sea igual al medido.

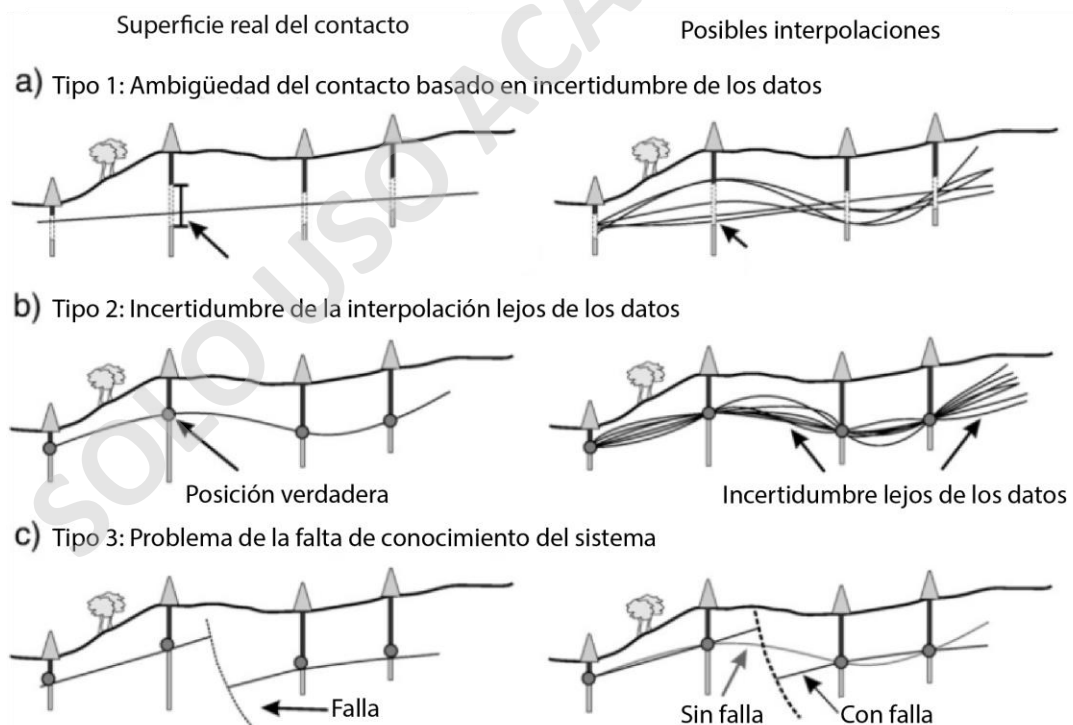


Figura 19. Clasificación de incertidumbre en interpolación de superficies geológicas. Fuente: Modificado de Wellman (2010).

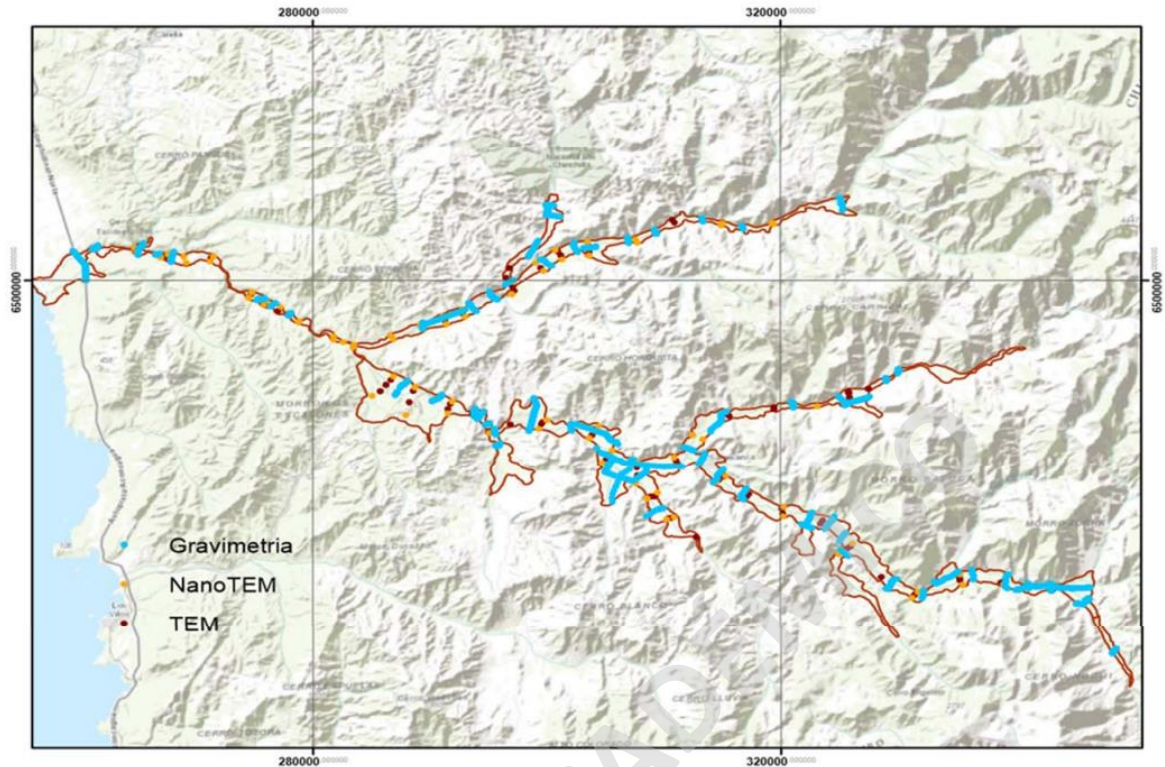


Figura 20. Mapa de la ubicación de los datos geofísicos en la cuenca del Río Choapa. Fuente: Hidrogestión (2016).

El proceso de validación de una interpolación permite, como dice su nombre, validar la eficacia del resultado obtenido de una interpolación (Cifuentes, 2016). Por lo que a través del desarrollo de este proceso se puede entender cuál es el real nivel de representatividad de un basamento interpolado con el basamento real de la cuenca del Río Choapa.

Ambos modelos estudiados no especifican el tipo de método de interpolación del basamento utilizado, ni los parámetros de aplicación, así como tampoco presentan validaciones ni reconocen la incertidumbre relacionada a la interpolación de contacto roca-depósito en el modelo.

El sustento de esta brecha recae en la importancia que existe de asegurar que el proceso por el cual se está consiguiendo interpolar el basamento sea lo más transparente posible para poder analizar de manera crítica el resultado expuesto y con esto, disminuir la incertidumbre asociada a este proceso.

Aparte de lo anterior, la interpolación de la geometría del basamento es un paso necesario para la construcción de modelos hidrogeológicos, pues es imposible tener el dato de la forma del basamento en la cuenca completa. Es por esto, que esta brecha debe ser minimizada y reconocida.

Brecha 2: Falta de realidad del basamento modelado en los bordes de la cuenca

Como se expuso anteriormente, la interpolación del basamento rocoso es un proceso necesario pero que conlleva mucha incertidumbre.

Dentro de los mapas de la profundidad del basamento presentados por Hidrogestión (2016) en su informe, existen zonas directamente aledañas al borde de la cuenca en que el basamento alcanza abruptamente profundidades de hasta 80 metros (Figura 21), en zonas en la que el DEM muestra pendientes de las caras del valle que alcanzan hasta 28%, por lo que no existiría una continuidad geomorfológica entre la verticalidad de la roca entre lo que está cubierto por sedimento y lo que está justo por arriba. Esto último abre espacio a la propuesta de una segunda brecha relacionable a la interpolación del basamento rocoso.

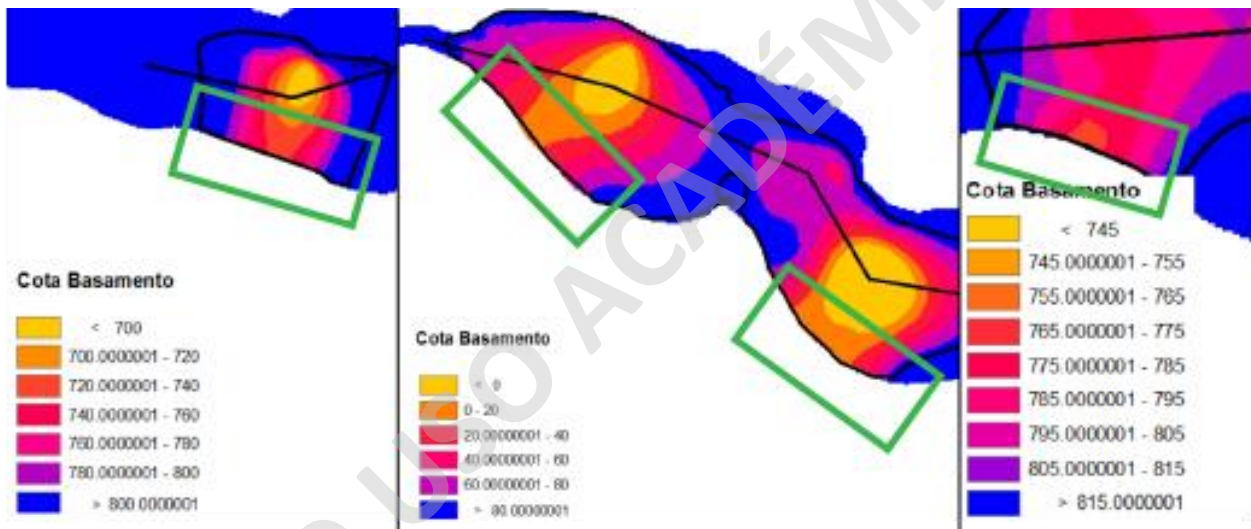


Figura 21. Ejemplos de zonas en las que se observa el fenómeno descrito. Fuente: Modificado de Hidrogestión, 2016.

Brecha 3: Reconocimiento e integración de las condiciones de fracturamiento del basamento

El agua subterránea no solo se da en los poros de los depósitos poco consolidados, también se da en porosidad secundaria de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias (Varalakshmi, 2014). Estos sistemas son altamente heterogéneos, se conocen como acuíferos en roca dura o acuíferos fisurados y ocurren en los primeros metros del contacto de la roca con la atmósfera, representado como zonas de meteorización, así como también en fracturas y fallas en distintas profundidades de la unidad rocosa (Figura 22).

Los medios fracturados pueden representar un rol importante en la oferta de agua subterránea (Kirsch, 2009), especialmente en zonas áridas y semiáridas, en donde el agua superficial escasea (Lachassagne, 2001), por lo que su caracterización debe ser considerada en el sistema hidrogeológico de la cuenca del Río Choapa.

Los sistemas fisurados pueden encontrarse interactuando con los sistemas acuíferos porosos. Este fenómeno puede darse en las zonas de contacto del basamento rocoso meteorizado con el depósito que se ubica arriba de este, pudiendo tener valores de permeabilidad mucho más altos de los esperados en un basamento libre de meteorización. También se puede dar en las zonas en que estructuras de gran escala como zonas de fallas o fracturas intersectan con el basamento, alterando la permeabilidad del basamento y las condiciones de flujo.

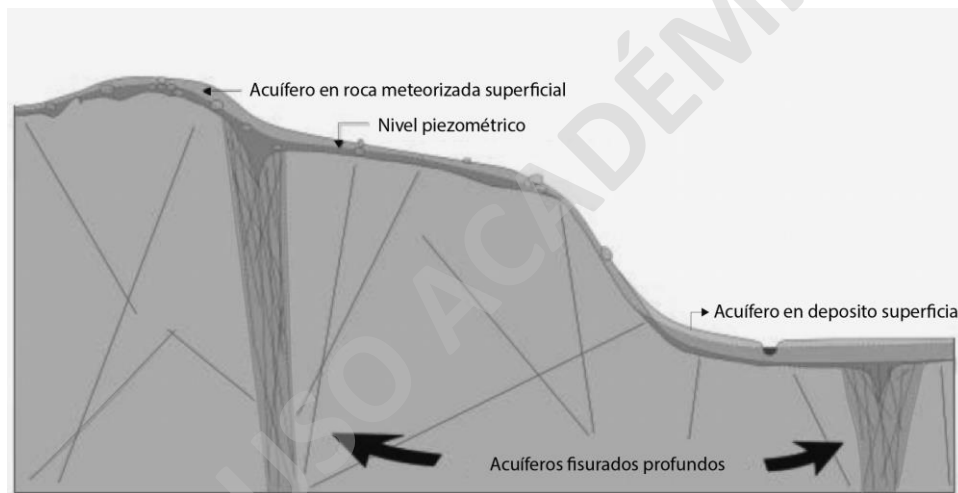


Figura 22. Simplificación gráfica de acuíferos contenidos en rocas fracturadas. Fuente: Modificado de Lachassagne, 2001.

En la cuenca del Río Choapa existe registro bibliográfico de la ocurrencia de basamento rocoso meteorizado. El informe "CHI-535" (1979) asevera que las rocas del basamento de la cuenca generalmente presentan porosidad secundaria, además de contar con zonas de meteorización que pueden alcanzar entre 5 y 10 metros de profundidad. Por otro lado, Geodatos (2012) describe a partir de la interpretación de datos TEM la existencia de una "capa de roca alterada húmeda o saturada" que se ubica justo arriba del basamento impermeable a una profundidad media de 40 metros. También, hay descritas 3 zonas de fallas que cortan el basamento de la cuenca con un rumbo preferencial N-S (Rivano y Sepúlveda, 1991).

Ninguno de los modelos objeto de este estudio consideran el efecto del grado de fracturamiento o meteorización del basamento en sus estimaciones de flujo subterráneo y recursos hídricos disponibles en la cuenca del Río Choapa.

4.3.2. Capas del modelo

Brecha 4: Reconocimiento y trabajo de heterogeneidades intrínsecas del depósito en el eje vertical

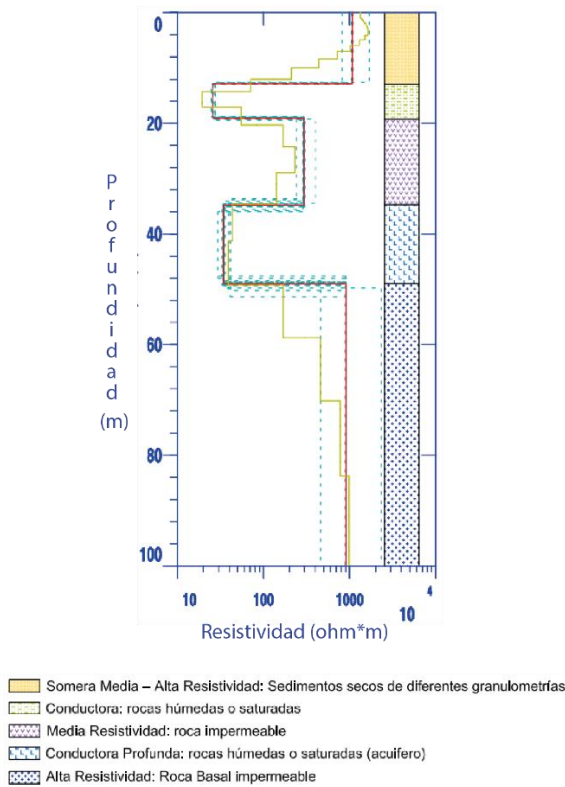
La definición de capas hidrogeológicas en un dominio se usa para representar las variaciones en las propiedades del acuífero en eje vertical o en la profundidad del relleno fluvio aluvial, pues permite sectorizar unidades que tienen similares capacidades para almacenar o transmitir el agua a través de sus poros.

Como se discutió en el capítulo Marco Geológico, el valle del Río Choapa presenta variaciones en la geomorfología de las rocas que lo circundan, así como también, en la pendiente del cauce a lo largo de su trayecto desde la cabecera de la cuenca hasta su desembocadura. Estas variaciones en las propiedades del cauce implican, variaciones internas en los depósitos que rellenan el valle del Río Choapa. Estas variaciones o heterogeneidades se hacen evidentes en los registros estratigráficos de la zona.

El informe "CHI-535" fue desarrollado por la DGA, ONU y CORFO el año 1979 y dentro de sus resultados para la cuenca del Río Choapa, propone a partir de un estudio de estratigrafía de pozos, que el sistema hidrogeológico de la cuenca se subdivide en 5 capas o unidades hidrogeológicas que no necesariamente existen homogéneamente en toda la cuenca (Figura 22.b). Por otro lado, el año 2012 la empresa Geodatos publica un estudio de TEM (Transiente Electromagnético) y nanoTEM de la cuenca, en donde realizan 160 mediciones que se distribuyeron desde la desembocadura hasta la cabecera de la cuenca. Como resultado, concluyen de igual manera que el informe CHI-535 que existen 5 unidades hidrogeológicas distinguibles en la cuenca del Río Choapa (Figura 22.a).

Por lo tanto, suponer homogeneidad en los depósitos que rellenan la cuenca de Río Choapa no solo es inviable de forma teórica, sino que, además existe evidencia estratigráfica tanto como geofísica de gran variabilidad en los sedimentos, ya sea en el eje vertical como en el plano horizontal.

a)



b)

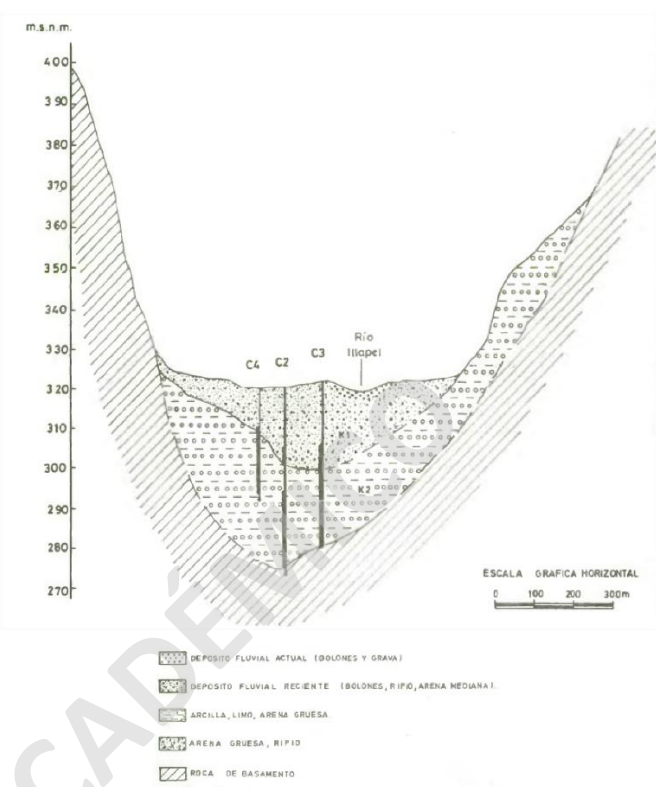


Figura 23. Ejemplo interpretación de capas. a) Gráfico resistividad vs profundidad interpretado. b) Perfil interpretado por estratigrafía. Fuente: Modificado de Geodatos, 2012 y DGA, ONU y CORFO, 1979 respectivamente.

El modelo de AC Ingenieros (2012) considera en su estructura una capa homogénea desde la cabecera hasta la desembocadura, ignorando de forma indirecta la variabilidad interna de los depósitos en la cuenca del Río Choapa.

Por su lado, Hidrogestión (2016) para el desarrollo de su modelo, propone la subdivisión del dominio hidrogeológico en dos capas correlacionadas con las unidades confluencia y depósitos cuaternarios, obviando de manera absoluta la variabilidad interna de estas dos unidades.

Suponer homogeneidad en sistemas acuíferos puede llevar a errores críticos en la estimación de recursos hídricos y cálculo del flujo en medios porosos, como la sobre estimación del volumen de agua contenido en el acuífero o la subestimación de la dispersión de contaminantes en el medio subterráneo.

4.3.3. Parametrización

Brecha 5: Reconocimiento y trabajo de heterogeneidades intrínsecas del depósito en el plano horizontal

La idea de parametrización de un modelo hidrogeológico está fuertemente ligada a la variabilidad interna de los depósitos que conforman la potencial unidad hidrogeológica en el plano cartesiano XY, debido a que como se expuso en el apartado de Marco Teórico, el valor que toma un parámetro hidrogeológico esta intrínsecamente relacionado a la granulometría y distribución del depósito.

Es por lo anterior, que el argumento expuesto en el apartado de arriba para demostrar la alta variabilidad interna de los depósitos en la cuenca del Río Choapa concluida por el informe CHI-535 (1979) y Geodatos (2012) es válida para la parametrización, de la misma forma que lo es para la definición de capas. Pues, estos dos atributos pueden ser definidos de manera interdependiente debido a que ambos trabajan la variabilidad interna de los depósitos.

Hidrogestión (2016) realiza un análisis de datos de pruebas de bombeo, descripción de estratigrafía de pozos y observaciones en terreno para categorizar las secciones del acuífero que tienen similares propiedades hidrogeológicas. En términos generales, respeta las dos unidades hidrogeológicas que expusieron anteriormente, definiendo una capa superior, correlacionable con los depósitos cuaternarios y una inferior, que corresponde a la formación confluencia.

Para la capa superior, utilizaron datos de pruebas de bombeo, en que extrajeron valores medios de las permeabilidades de todo el largo del pozo para caracterizar el punto, sin considerar ni describir la sección del relleno de la que esa prueba de bombeo es representativa. Con los datos obtenidos consiguieron una zonificación de 7 categorías que distribuyeron en el plano XY (Figura 23) y proyectaron en profundidad de manera vertical, no considerando la variabilidad vertical interna del depósito, basando la distribución 3D del parámetro únicamente en una proyección de valores que obtuvieron a partir de la generalización de las propiedades de la columna del relleno.

Para la capa inferior no existen datos de pozos, por lo que a partir de observaciones en terreno suponen que esta unidad debe tener parámetros 20% más bajas que la capa superior, pero manteniendo la misma distribución de la zonificación realizada anteriormente. Suponiendo así, indirectamente, que ambas unidades tienen una distribución XY exactamente igual de las propiedades hidrogeológicas de sus respectivos depósitos.

AC Ingenieros (2012) realiza algo similar a Hidrogestión (2016), en donde propusieron una zonificación en el plano XY (Figura 24) con una serie de pruebas de bombeo promediadas hacia la superficie. Con respecto a la variación vertical de las propiedades no especifican nada.

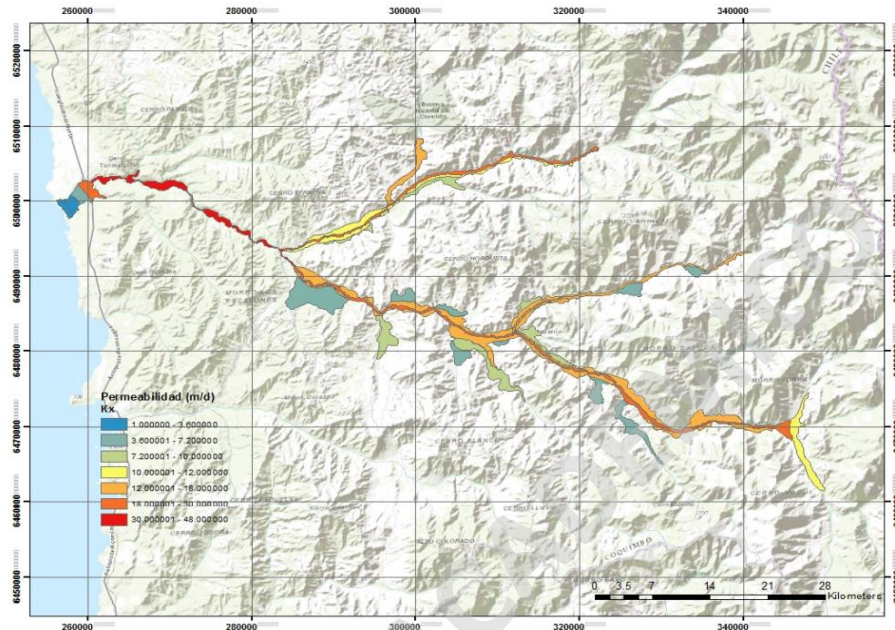


Figura 24. Mapa de la categorización de permeabilidades propuesta por Hidrogestión (2016) para cuenca del Río Choapa.

Fuente: Hidrogestión (2016).

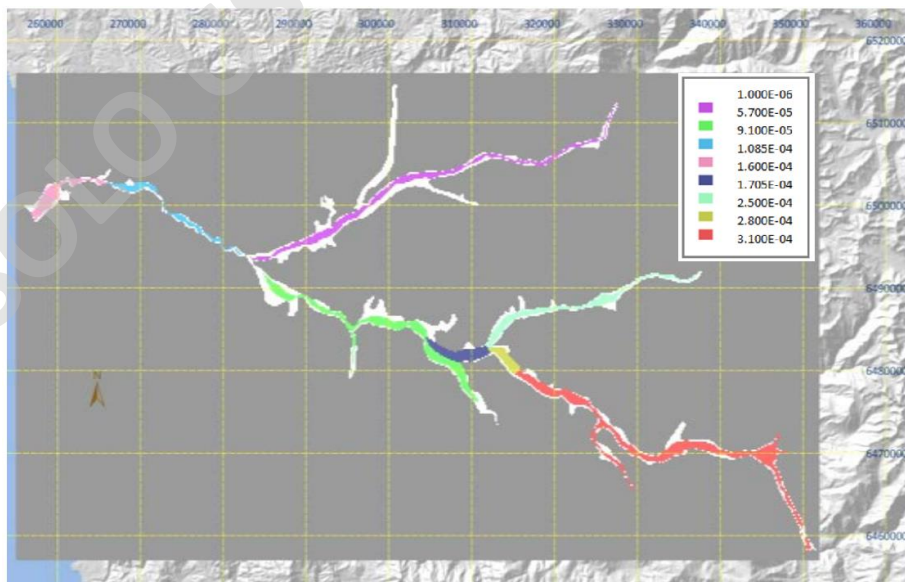


Figura 25. Mapa de la categorización de permeabilidades propuesta por AC Ingenieros (2012) para cuenca del Río Choapa.

Fuente: AC Ingenieros (2012).

4.3.4. Discretización de la grilla

La discretización de la grilla al trabajar en las 3 direcciones cartesianas permite abordar el problema de las heterogeneidades tanto verticales como horizontales, por lo que se es atribuible las dos brechas descritas en los puntos de capas del modelo y parametrización.

Debido a sus características, la discretización de la grilla no es netamente dependiente de la geología, sino que también es una decisión técnica o administrativa. Esto último se debe a que una grilla muy fina o con poca distancia entre sus nodos afecta directamente en la necesidad del poder de cálculo para la realización del modelo.

Por otro lado, el tipo de grilla está directamente relacionado al software utilizado, por lo tanto, es una decisión indirecta en el proceso de modelación, más relacionada a la experiencia del modelador con algún software que a la variable en sí.

SOLO USO ACADÉMICO

5. DISCUSIONES

5.1. Definición de atributos

La dificultad de seleccionar una metodología teórica para la comparación de modelos hidrogeológicos yace en encontrar un factor en común entre modelos que tienen en su origen objetivos diferentes. Por lo que es fundamental usar como criterio los atributos, pues estos son información fundamental que un modelo debe presentar independiente del objetivo de este.

La estandarización del requerimiento mínimo de información entregada sobre los criterios, datos o suposiciones adoptadas al momento de construir modelos hidrogeológicos numéricos permite tener una base mínima para hacer un análisis crítico de la capacidad del modelo de representar el sistema acuífero real.

Existe una interdependencia entre “Definición de capas”, “Parametrización” y “Discretización de la grilla” debido a que, en su forma particular, las 3 buscan aumentar la representatividad de la variabilidad interna del depósito. Si bien, la definición de capas busca un trabajo de las heterogeneidades en el eje vertical y la parametrización más bien trabaja en el plano horizontal, la discretización de la grilla funciona de manera horizontal y vertical, lo que demuestra que existe más de una configuración de estos factores que pueda ser correcta o que se acerque a la realidad. Si bien el parámetro de discretización de la grilla es en su base dependiente de la geología, puede depender también de los objetivos del modelo, densidad de los datos y poder de cómputo, por lo que se debe tener en consideración su codependencia al momento de seleccionar o definir este parámetro.

5.2. Definición de modelos a analizar

Los modelos de DGA (2019) y DICTUC-SEI (2019) al ser basados en el modelo de AC Ingenieros (2012) se puede suponer que consecuentemente arrastran las mismas brechas que su modelo base. De todas maneras, esto no se puede probar debido a una ausencia en las especificaciones mínimas de los parámetros utilizados en su construcción. Por otro lado, es posible que esta ausencia de información se deba a que estos informes tienen objetivos distintos a los convencionales, que están más bien relacionados a entender el sistema subterráneo.

5.3. Acceso a la información

Las plataformas de acceso a la información de la DGA presentan ventajas, como la libre disposición de los datos al público y una amplia red de estaciones de control a lo largo del país

con larga data histórica, así como también, tiene desventajas. Estas últimas se manifiestan en dos categorías. La primera, relacionada a la dificultad existente para acceder a los informes de pruebas de bombeo para una cuenca en específico, en donde actualmente, para recopilar los datos necesarios, se debe revisar una base de datos de 81.884 expedientes digitales, que pueden incluir resoluciones para más de una cuenca del país. Debido a estos grandes volúmenes de datos no existe una manera eficiente de obtener la información requerida. Por otro lado, el orden y disposición en que se descargan las bases de datos hidrométricos, en archivos de formato Microsoft Excel dificulta el trabajo en estos mismos, debido a que se debe reordenar todo el archivo antes de realizar cualquier análisis sistemático.

SOLO USO ACADÉMICO

5.4. Propuestas

La estructura de las propuestas se basa en que cada propuesta se sustenta en su respectiva brecha a solucionar, por lo que para cada brecha existe al menos una propuesta. Estas, están categorizadas por atributo con el objetivo de tener una estructura ordenada para una mejor comprensión (Figura 25).

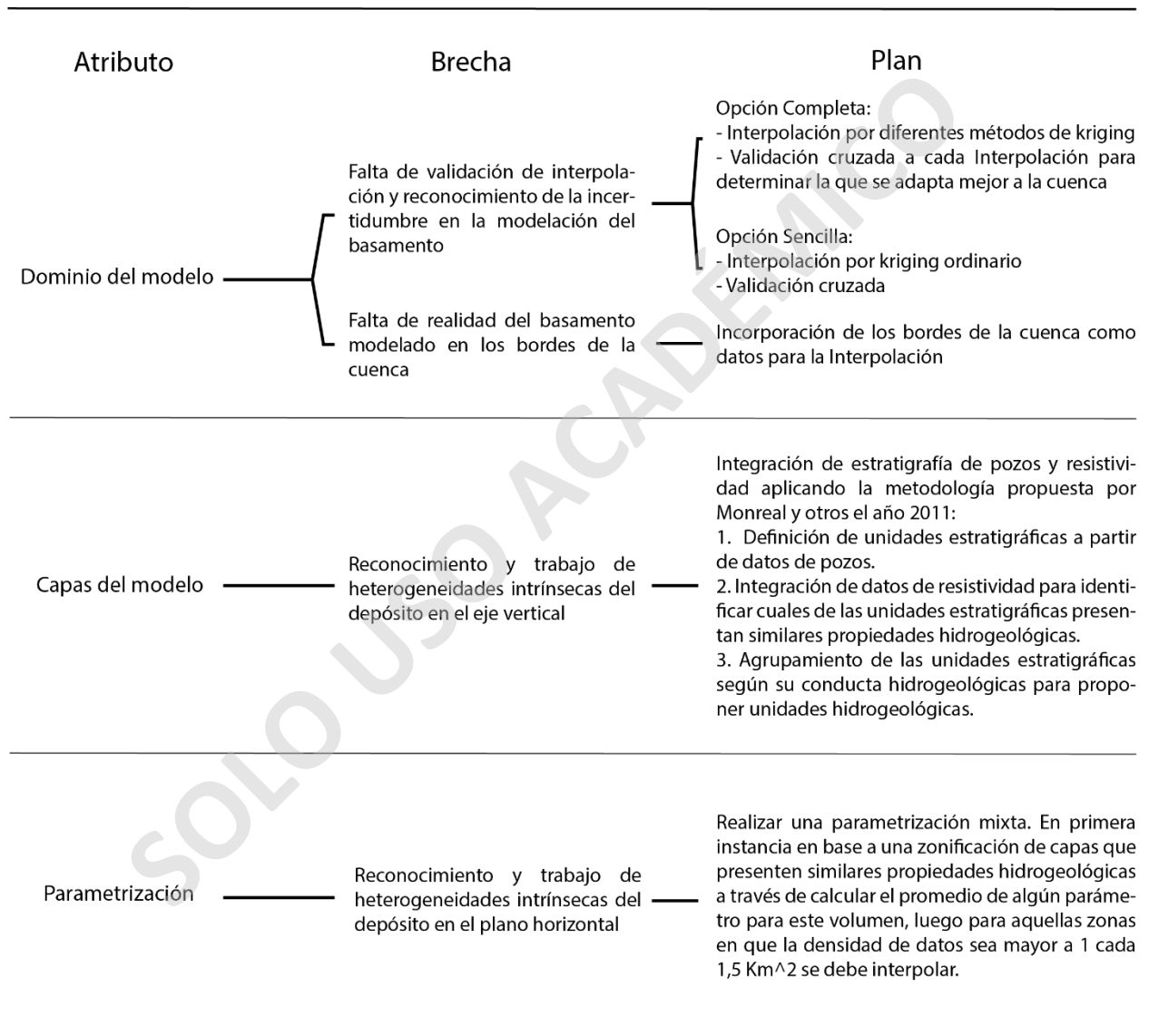


Figura 26. Resumen y estructura de las propuestas.

5.4.1. Dominio del modelo

Geometría del basamento rocoso validada

Para obtener como resultado la geometría validada del basamento rocoso de la cuenca del Río Choapa, en este trabajo se propone dos alternativas. La primera, basada en conocimiento teórico y bibliográfico sobre los métodos de interpolación de superficies y su validación y la segunda, de carácter complejo, que permitirá definir la geometría validada del basamento y el método de interpolación y sus parámetros que más se adecuan a la determinación del contacto roca – relleno de la cuenca.

La determinación de qué metodología usar dependerá de factores administrativos, como presupuesto disponible, tiempo dispuesto y poder de cómputo. El propósito de ofrecer una alternativa más sencilla recae en la necesidad de establecer un mínimo de calidad del proceso de definición del basamento rocoso en caso de que no existan los recursos para llevar a cabo la alternativa más compleja.

Procedimiento sencillo

El método kriging, de inferencia espacial, busca interpolar variables disminuyendo el error cuadrado o varianza de estimación a partir la definición de la dirección de máxima continuidad de la variable en el espacio y es ampliamente utilizado en el campo de las geociencias (Stein, 1999). Dentro de la familia de kriging existen una serie de métodos que, si bien se basan en los mismos supuestos, varían entre ellos al suponer la estacionariedad de la media, el trabajo de las tendencias y el uso de residuos (Rossi y Deutsch, 2014). Los principales miembros de esta familia de estimadores son kriging simple, ordinario, universal y con deriva externa. La elección del método a usar depende de las propiedades geológicas, la información disponible y las características de la función aleatoria a estimar (Rossi y Deutsch, 2014). Dentro de estas subcategorías de este método destaca kriging ordinario, el más usado por los modeladores para interpolar variables (Wackernagel, 1995). Dentro de las ventajas de kriging ordinario están su tendencia a disminuir el error en la varianza de estimación y su carácter no sesgado al buscar eliminar también el error en la media residual de los datos. Las principales desventajas observadas por distintos autores (Schloeder et al. 2001; Zhu y Lin, 2010) en la aplicación de kriging ordinario está relacionada a una pérdida de representatividad de la interpolación cuando los datos están muy alejados entre sí y el sobre suavizado de la superficie interpolada (Leuangthong, et al. 2004).

La necesidad de validar un proceso de interpolación asegura que el proceso matemático llevado a cabo cumple el requisito mínimo de acercarse lo más posible a la realidad el resultado según los datos existentes.

El método de validación cruzada permite validar la cercanía a la realidad de la realización de una interpolación con su respectivo método y parámetros, así como también, comparar distintos métodos de kriging y parámetros entre sí, para determinar cuál conjugación de estos acerca más la superficie interpolada a la realidad. Este método funciona a partir de la idea de dejar una medición afuera de la interpolación y medir que tan similar al dato conocido dejado afuera es el dato interpolado para ese punto (Oz, 2003; Clark, 2004). Esto se debe hacer con un set de datos predeterminados para obtener un resultado válido para toda la cuenca.

Por todo lo expuesto, la opción sencilla para modelar el basamento rocoso de la cuenca del Río Choapa que se propone es este plan, es la aplicación de una interpolación a través de kriging ordinario seguido por una validación cruzada para tener conocimiento de la representatividad del basamento modelado. En caso de que el resultado de la validación sea poco favorable es factible variar alguno de los parámetros que definen el variograma, volver a interpolar por kriging ordinario y realizar una nueva validación cruzada en orden de buscar un resultado que se aproxime más a la realidad.

Procedimiento complejo

Como se expuso anteriormente, existen variados métodos de kriging válidos en la bibliografía, por lo que se debe reconocer la necesidad de determinar cuál de estos métodos se adecua más a las propiedades y distribución espacial de los datos en la cuenca de Río Choapa, de manera de establecer el método de interpolación que más acerca este proceso a representar correctamente la realidad.

El fundamento de esta alternativa para interpolar el basamento rocoso es la comparación entre los cuatro métodos de kriging antes nombrados para determinar cuál se acerca más a representar la realidad. El estándar de comparación se obtiene a través de aplicar validación cruzada a cada uno de los basamentos modelados, para así determinar que método de kriging entrega un error cuadrado medio menor.

Zúñiga (2021) aplica esta metodología en la cuenca del estero de Casablanca, obteniendo como resultado el método de interpolación de la superficie del basamento que más se acerca a la realidad, concluyendo finalmente, que esta metodología es eficiente.

Aumento de representatividad natural del borde de la cuenca

Independiente del método a usar, se propone incluir como datos al borde de la cuenca, porque que, si no se consideran como dato a interpolar, las zonas cercanas al borde tenderán a sobre influirse por los datos profundos, generando así, una posible exageración de la profundidad del contacto roca – depósito en zonas aledañas al borde. El fenómeno de exageración de las profundidades puede llevar a una sobre estimación del volumen de sedimentos y con esto, del agua contenida en el sistema.

La metodología más sencilla de obtención de estos datos es a través de alguna plataforma de gestión de la información con un archivo de modelo de elevación digital (DEM) para la zona. Está ampliamente aceptado en la bibliografía que los DEM pueden presentar errores, que se traducen en incertidumbre (Oksanen, 2006; Felicísimo, 1994; Wechsler, 2007). Estos errores tendrían un efecto adverso, aumentando la incertidumbre de este punto de la propuesta metodológica. Por lo que es necesario en vista de la evidencia proponer un método de corrección de este error.

El método de corrección de DEM con puntos de control geográfico busca corregir el modelo de elevación a partir de la disminución del error cuadrado medio entre las mediciones del DEM satelital y una serie de puntos GPS tomados en terreno que se denominan puntos de control. Autores que han usado este método (e. g., Montealegre, et al. 2017 y Burgos y Salcedo, 2014) documentan disminuciones en el error cuadrado desde 19,607 hasta 0,022 y de 1,1 a 0,1 metros respectivamente.

Debido a la naturaleza y objetivo del dato que se necesita para incorporar el borde del depósito a la interpolación, los datos de GPS para la corrección del DEM deben ser tomados en los bordes del mismo depósito de manera estratégica a lo largo de todo el contacto para mejorar la representatividad del proceso.

Consideraciones generales

Otras condiciones generales que pueden ser incluidas en las metodologías, sin importar el método de interpolación que se determine usar, son concluidas en un trabajo de Zúñiga (2021) que propone, que subdividir la cuenca en subcuencas para realizar la interpolación aumenta la representatividad del proceso al orientar la búsqueda de anisotropías a lo largo del eje de cada subcuenca y también añade que se debe incluir una división por octantes en las zonas más alejadas de los bordes, esto para disminuir el efecto de los datos del borde de la cuenca, que al ser los más numerosos van a tender a sobre influir en las zonas profundas. En el caso en que luego de realizar la división por octantes el efecto de los datos del borde aún genere un efecto en

la interpolación de datos en profundidad, se debe evaluar la alternativa de hacer un filtro por tipo de muestras (e. g., muestras subterráneas o datos del borde), para asegurar que la interpolación de zonas profundas se les dé prioridad a los datos subterráneos (directos o indirectos).

Reconocimiento e integración de las condiciones de fracturamiento del basamento

Los primeros metros del basamento hidrogeológico; de una cuenca rellena por depósitos poco consolidados con propiedades acuíferas; pueden exhibir alteración o meteorización que predisponga que esta zona presente la capacidad de almacenar y/o transmitir agua y, en consecuencia, pueda potencialmente ser parte de las reservas hídricas de la cuenca.

La metodología de la caracterización de las zonas meteorizadas del basamento corresponde a una comparación entre datos de resistividad eléctrica, gravimetría y pozos estratigráficos (Figura 27). El primer paso, es definir a partir de gravimetría y pozos estratigráficos cual es la profundidad en la que se encuentra el basamento. El segundo paso, es estudiar las resistividades del basamento, pues si los primeros metros de este presentan resistividades relativamente más bajas que lo que está justo por debajo, se podría interpretar que esa baja en la resistividad está controlada por la presencia de agua líquida en su estructura, en contraste a un basamento seco o no meteorizado. Esta metodología ha sido empleada con éxito en cuencas de similares características en Chile (Eg. Dictuc (2021), Geodatos (2012) y PROMMRA y CEAZA (2019)).

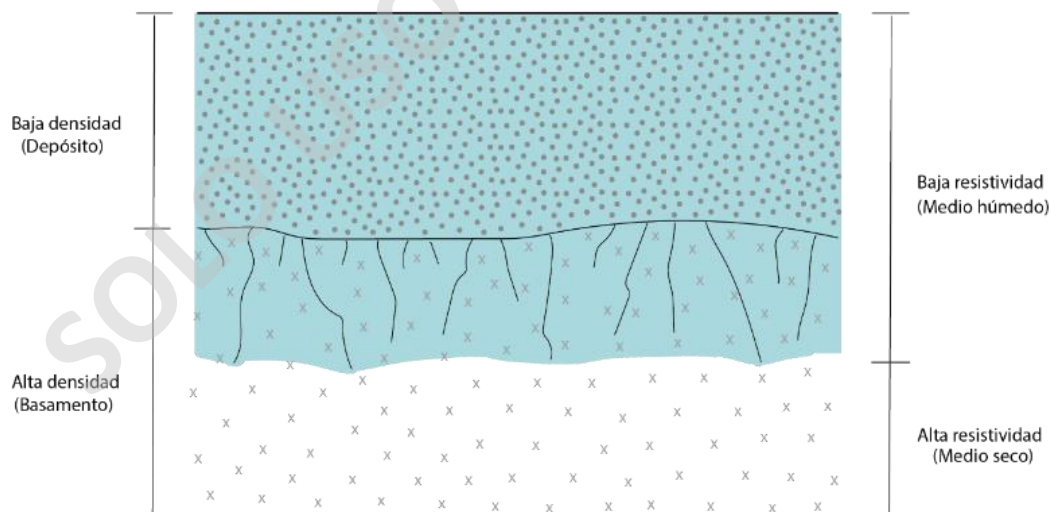


Figura 27. Simplificación metodológica de caracterización de un basamento rocoso fracturado.

La caracterización de la saturación de los primeros metros de basamento fue llevada a cabo por Geodatos (2012) en la cuenca del Río Choapa, por lo que el enfoque de esta propuesta es que esta información se considere en futuros modelos hidrogeológicos numéricos y la metodología descrita sea aplicada en próximos datos TEM que puedan ser llevados a cabo en la cuenca.

5.4.2. Capas del modelo

Definición de capas del modelo

Como se expuso anteriormente, la capacidad de los modelos existentes en la cuenca de representar las heterogeneidades del depósito es una de las principales problemáticas que existen en la modelación hidrogeológica de la cuenca del Río Choapa.

La definición de capas para un modelo hidrogeológico aumenta la precisión del modelo al acercarlo a la realidad mediante una mejor representación de las condiciones de flujo naturales del sistema, en especial, en sistemas en que existen capas de menor conductividad hidráulica entre dos capas acuíferas (Gao, 2011). Este procedimiento se lleva a cabo a partir de la sectorización de zonas con similares características hidrogeológicas, que deben ser definidas en la etapa de conceptualización del modelo (SEIA, 2012).

Para llevar a cabo una propuesta de capas para el modelo es necesario hacer un trabajo iterativo entre los datos de estratigrafía de pozos y datos geofísicos, esto debido a que la geofísica sirve de complemento para la interpolación de la estratigrafía de los pozos, pues rellena el espacio entre datos directos con información de un parámetro geofísico que puede ser atribuible, y en consecuencia extrapolable a la granulometría.

En definitiva, la propuesta de este plan para la definición de unidades hidrogeológicas sigue las directivas desarrolladas por Monreal et al. (2011) para acuíferos granulares como los de la cuenca del Río Choapa. Los autores, proponen una metodología de 3 pasos para la determinación de unidades hidrogeológicas: el primer paso propuesto corresponde a un análisis litológico o granulométrico del relleno sedimentario a partir de bibliografía o datos de pozos estratigráficos con el objetivo de reconocer subunidades litológicas; el segundo paso es hacer una integración de la resistividad del subsuelo y datos de pruebas de bombeo para comprender que zonas del relleno o subunidades litológicas tienen similares comportamientos hidrogeológicos; el tercer paso corresponde a un agrupamiento y reagrupamiento de las subunidades litológicas en base a su conducta hidrogeológica para formar así unidades hidrogeológicas.

Con el objetivo de llevar a cabo lo propuesto arriba y enriquecer el conocimiento del sistema hidrogeológico de la cuenca del Río Choapa, se propone en este plan llevar a cabo una campaña de toma de datos TEM.

5.4.3. Parametrización del modelo

Definición de la estrategia de parametrización

La selección de una estrategia adecuada de parametrización de un modelo hidrogeológico numérico tiene efectos significativos en la complejidad e incertidumbre del modelo (Cui, et al. 2021), y depende de los objetivos de la modelación, heterogeneidad y anisotropía del acuífero, ubicación de zonas con altos gradientes y zonas sensibles ambientalmente, esfuerzo computacional y la resolución deseada para los resultados (SEIA, 2012).

Una característica crucial que se debe buscar durante la parametrización es encontrar un punto en que no se fomente la sobre simplificación del modelo, pero a su vez, no se le añada mucha complejidad e incertidumbre al proceso (Godoy, 2018).

Tradicionalmente existen 2 estrategias para la parametrización de modelos hidrogeológicos más usadas en la bibliografía, estas son por zonación y por interpolación (Anderson, et al. 2015; Baalousha, et al. 2019; Cui, et al. 2021 y SEIA, 2012). El método de zonación consta de promediar el valor de algún parámetro en una zona en la que se identifique que tiene similares propiedades (Figura 26.a), en el caso propuesto en este estudio de desarrollar un modelo de capas, esta estrategia consiste en promediar el valor de los parámetros en cada capa y así usar un valor uniforme o estándar por capa. El método de interpolación se basa en realizar una interpolación entre los valores existentes para rellenar el espacio existente entre cada dato (Figura 26.b).

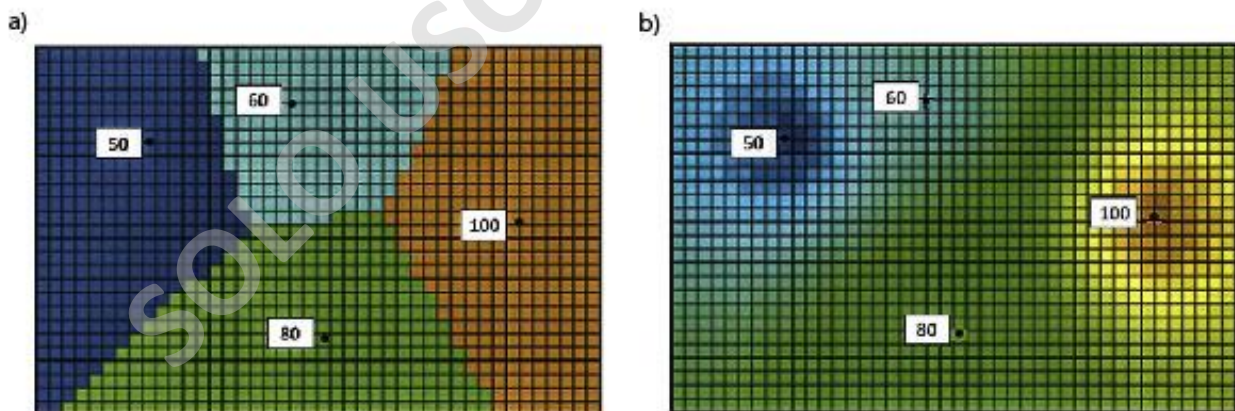


Figura 28. Comparación de estrategias de parametrización. a) Zonada. b) Interpolada. Fuente: Modificado de Anderson et al. 2015.

Ambos métodos presentan fortalezas y debilidades técnicas, el método de zonificación se caracteriza por ser un método sencillo y con baja necesidad de datos. En su contraparte, el método que involucra interpolación requiere de un mayor tiempo de cálculo y una alta cantidad de mediciones. Este último es considerado superior que el método por zonación debido a su alta

flexibilidad y eficiencia, además de obtener una parametrización suave y gradual (Baalousha et al. 2019; Doherty; 2003; Godoy, 2018; Kapoor y Kashyap, 2021), que tiende a ser más representativa de la variabilidad interna de los depósitos. Por otro lado, Anderson et al. (2015) propone que un híbrido entre estas dos metodologías puede ser aplicado para mejorar la representatividad de la heterogeneidad del sistema con una baja cantidad de datos o con datos distribuidos de manera preferencial en algunas áreas.

Existen trabajos que abarcan la temática de la densidad de mediciones apropiada para realizar una interpolación representativa de la distribución de los parámetros de un sistema hidrogeológico. Baalousha et al. (2015) concluye que para un acuífero kárstico debe existir un dato cada 43,55 km², por su parte, Cui et al. (2021) utiliza una densidad de un dato cada 76 km² para caracterizar un acuífero en rocas porosas. Finalmente, Sreekanth et al. (2015) realiza una interpolación con una grilla simétrica de datos con una densidad de 1 dato cada 1,5 km² en una cuenca hidrográfica fluvio aluvial similar a la cuenca del Río Choapa, por lo que para este estudio se considera apropiado un mínimo de 1 dato cada 1,5 km².

Debido a la pobre disponibilidad y distribución preferencial de datos de parámetros hidráulicos en la cuenca, además de la baja calidad de la información presentada con estos datos, al estar promediados a la superficie, sin considerar la sección del relleno que se está caracterizando, es que se propone en este estudio la realización de una parametrización mixta, en donde, se debe comenzar proponiendo una zonación según las capas del modelo y luego, para aquellas capas o zonas en donde la densidad de datos sea superior a 1 cada 1,5 km² se debe aplicar una interpolación local a ese subdominio.

Esta decisión se soporta en las condiciones actuales de la información y datos de la cuenca. En caso de que más estudios se lleven a cabo, en que se incluya una basta cantidad de nuevos antecedentes de parámetros hidráulicos y que estos vengán adecuadamente posicionados en las 3 dimensiones y no promediados a la superficie, sería apropiado considerar el método de interpolación de variables general en el dominio completo.

Según las dimensiones de la cuenca del Río Choapa debe existir un mínimo de 167 datos distribuidos de forma homogénea para lograr una interpolación representativa del dominio. En la actualidad existen 76 datos de pruebas de bombeo disponibles, sin considerar aquellos datos que no son válidos al estar promediados a la superficie y la alta heterogeneidad del muestreo. Por lo tanto, para tener una representación válida de la cuenca es necesario realizar al menos 91 muestreos, que rellenen de forma homogénea las zonas no caracterizadas del valle.

5.4.4. Discretización de la grilla

Debido a la codependencia de la discretización de la grilla presentada en resultados es que este atributo será más bien trabajado como una discusión relacionada a la conjugación que se puede llevar a cabo entre este atributo y las capas de la grilla y parametrización con el objetivo de resolver las brechas relacionadas a la falta de representatividad de las heterogeneidades del relleno.

La tridimensionalidad de la grilla y el hecho de que siempre debe estar presente en un modelo hidrogeológico numérico genera que esta se pueda conjugar con otros atributos para acercarse a la realidad un modelo, esto debido a como se comentó anteriormente, esta depende de la cantidad de datos de parámetros existentes o del poder de cómputo dispuesto por los modeladores. En el caso de la cuenca del Río Choapa en la actualidad, aplicar una grilla muy fina no es una decisión estratégica, debido a que al existir pocos datos que rellenen los nodos de la grilla solo se estará sumando tiempo de cálculo al modelo sin ninguna mejora aparente al modelo.

5.4.5. Propuestas generales de toma de datos

Propuesta de toma de datos TEM

El método geofísico TEM permite obtener una imagen de las resistividades del subsuelo de manera no invasiva, rápida y de bajo costo (Harris, et al. 2006; Reynolds, 2010; Sapia et al. 2014). Este método está ampliamente aplicado en la hidrogeología (e.g. Auken et al. 2003; Carrasquilla y Ulugergerli, 2006; Taylor et al. 1992; Kanta, et al. 2013) debido a la relación que existe entre la porosidad y la resistividad del medio (Brown, 1980; Kwader, 1985; Clark y Page, 2011).

La proposición de aplicar TEM como método de complemento para entender mejor el sistema hidrogeológico del Río Choapa se soporta en varios factores. Como se argumentó arriba, es un método de bajo costo, rápido y con una interpretación relativamente sencilla, además, dentro de la información geofísica existente en la cuenca, es la que más abunda, por lo que se podría hacer un trabajo complementario entre información existente y nueva, finalmente, debido a su naturaleza, el TEM puede aportar datos de profundidad del basamento, que pueden servir para enriquecer de datos no solo del relleno de la cuenca, pero a la vez de su contacto con el basamento y también es complemento en el proceso de parametrización.

Si bien no existe una cantidad mínima de puntos TEM que sea aceptable o un distanciamiento mínimo entre estaciones válido, un aumento en la cantidad de datos disminuye la incertidumbre y con esto, la confiabilidad del modelo. Además, aumentar la densidad de datos en la cuenca

mejora la resolución de estructuras geológicas y permite identificar datos erróneos por fallos en el instrumento y eliminarlos (Kirsch, 2009).

Las transectas de perfiles TEM preexistentes en la zona se encuentran a distancias que varían entre 1,6 y 4,4 km. La propuesta es realizar una serie de pruebas que se dispongan en forma de línea de lado a lado del relleno, con una prueba nanoTEM en cada extremo de la línea y pruebas TEM en el medio con distancias que no deberían superar los 300 m. La cantidad de TEM en cada perfil dependerá del ancho de la sección del valle y de la disponibilidad de espacio (Figura 27).

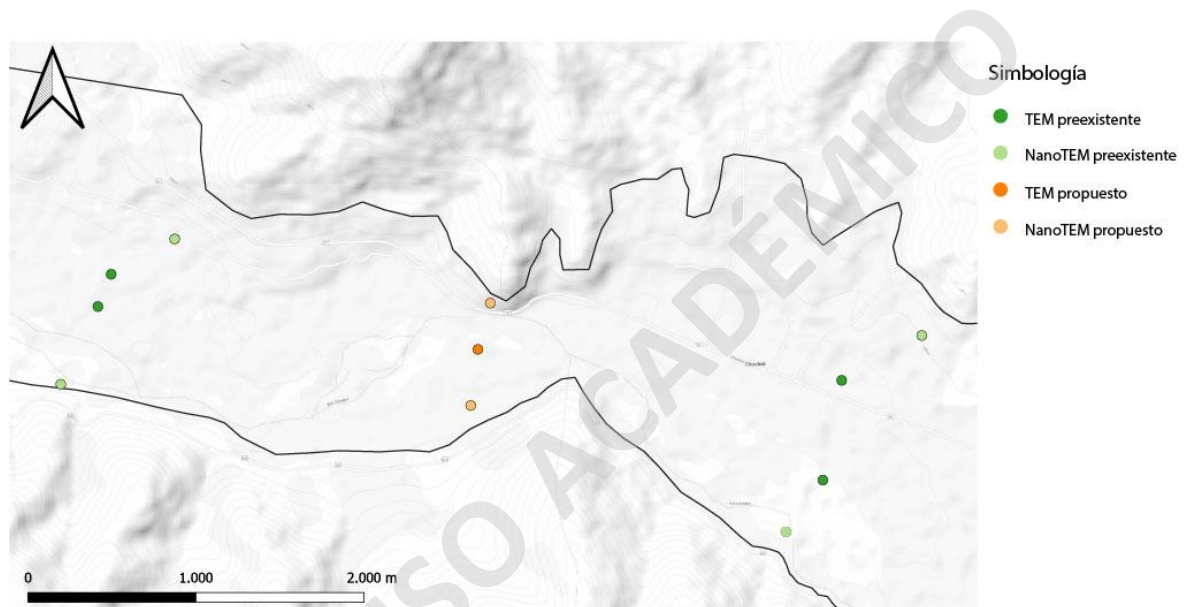


Figura 29. Ejemplo disposición de TEM propuestos.

Para poder proponer zonas en las que priorizar la toma de perfiles TEM se realizó un análisis bibliográfico sobre tres trabajos que hicieron estudios TEM para caracterización hidrogeológica. En los trabajos estudiados (Demirci, et al. 2020; Farzadian, et al. 2018; Geodatos, 2016), la distancias entre perfiles TEM no superó los 3.000 metros. Es por esto último que se plantea en este plan darle prioridad a la toma de datos TEM a aquellas zonas en las que existan más de 3.000 metros entre perfiles preexistentes (Figura 28).

Otra prioridad para la toma de datos como aporte a la determinación de la profundidad al basamento es realizar una serie de perfiles TEM en zonas en las que existan transiciones litológicas en el basamento (Figura 28), pues estas, podrían significar zonas en las que la continuidad del basamento varía por una diferencia de resistencia a la erosión de la roca y, en consecuencia, una diferencia de la morfometría de la cuenca.

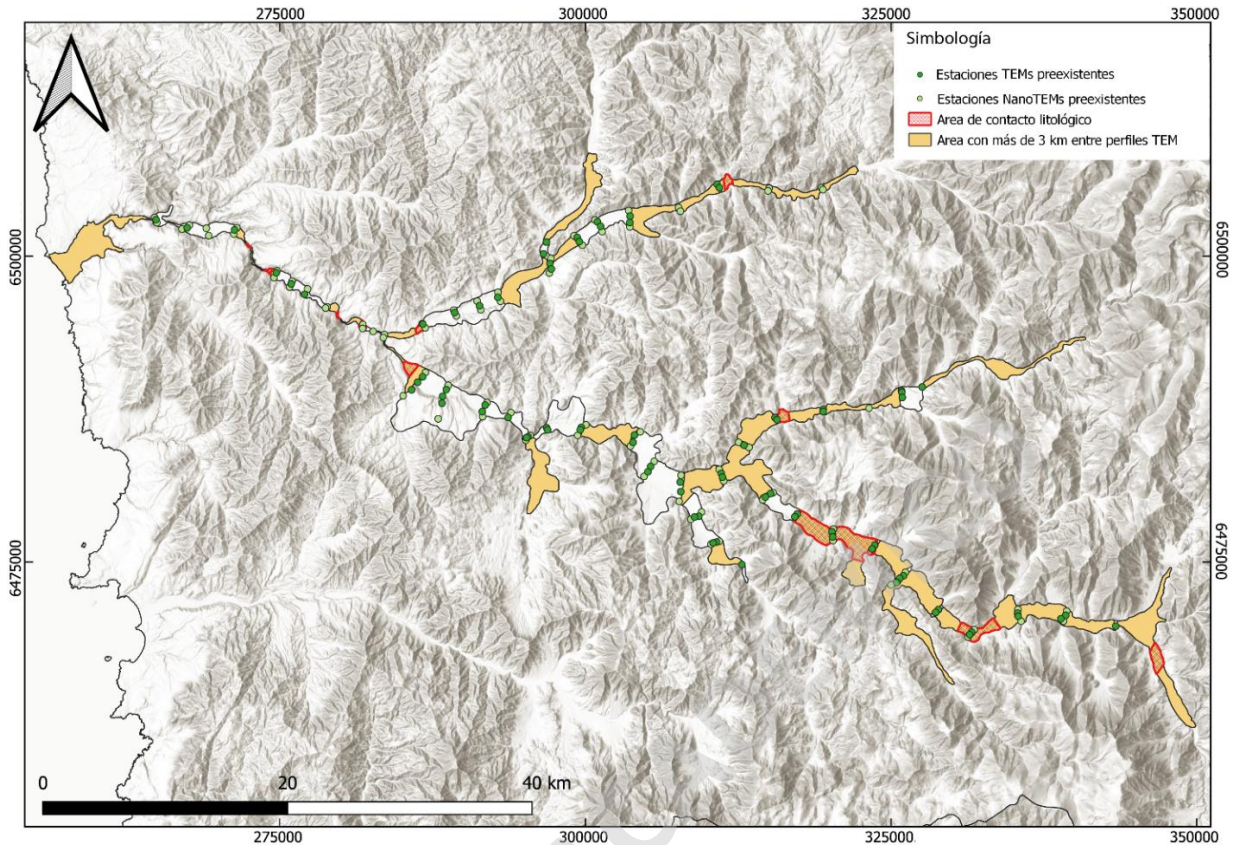


Figura 30. Mapa de priorización de nuevos datos TEM. Datos: Geodatos, (2012).

El método TEM tiene considerables beneficios, pero también cuenta con desventajas. Estas se presentan mayoritariamente en el proceso de toma de datos y pueden disminuir considerablemente la calidad de la medición. Las principales fuentes de error en TEM son geométricas (geometría y disposición de los loops), instrumentales (fallas en el equipo), geológicas (anisotropías en la parte superior del medio) y culturales (Blanco, 2016). Esta última se relacionan a la existencia de estructuras antrópicas conductoras cerca de la medición, que podrían generar un campo electromagnético secundario que altere los resultados (Yáñez, 2017). Es por esto último, que como consideración general a la toma de datos TEM, los puntos deben encontrarse lo más alejado posible de fuentes de ruido electromagnético como líneas de alta tensión, tuberías subterráneas o maquinarias.

Revisión de datos previos y propuesta de pruebas de bombeo

Los datos directos de parámetros hidráulicos de la cuenca fueron obtenidos a través de pruebas de bombeo. Los modelos analizados en este estudio utilizan para llevar a cabo su parametrización datos de pruebas de bombeo promediados a la superficie, esto quiere decir que el dato carece

de coordenada en el eje Z cartesiano, por lo que no se sabe la sección del relleno que efectivamente se ve caracterizada por ese dato cartesiano, dejando en evidencia la necesidad de un análisis de los archivos de la DGA para complementar la información existente.

Una vez realizada la revisión de los archivos de la DGA y ya habiendo determinado que mediciones de parámetros tienen suficientes antecedentes para poder incluirlas en la parametrización, se propone en este programa la complementación de esos valores con la realización de nuevas pruebas de bombeo en zonas en que la caracterización no sea la suficiente (Figura 29). Según lo expuesto anteriormente, para tener una parametrización por interpolación representativa, la densidad de datos debe ser superior a 1 dato cada 1,5 km², por lo que el objetivo debe ser realizar pruebas de bombeo en zonas que no cumplan este criterio.

Por otro lado, se recomienda realizar una caracterización de las zonas profundas del acuífero, pues, a la fecha no existe información sobre la distribución de los parámetros hidrogeológicos en las zonas cercanas al contacto al basamento.

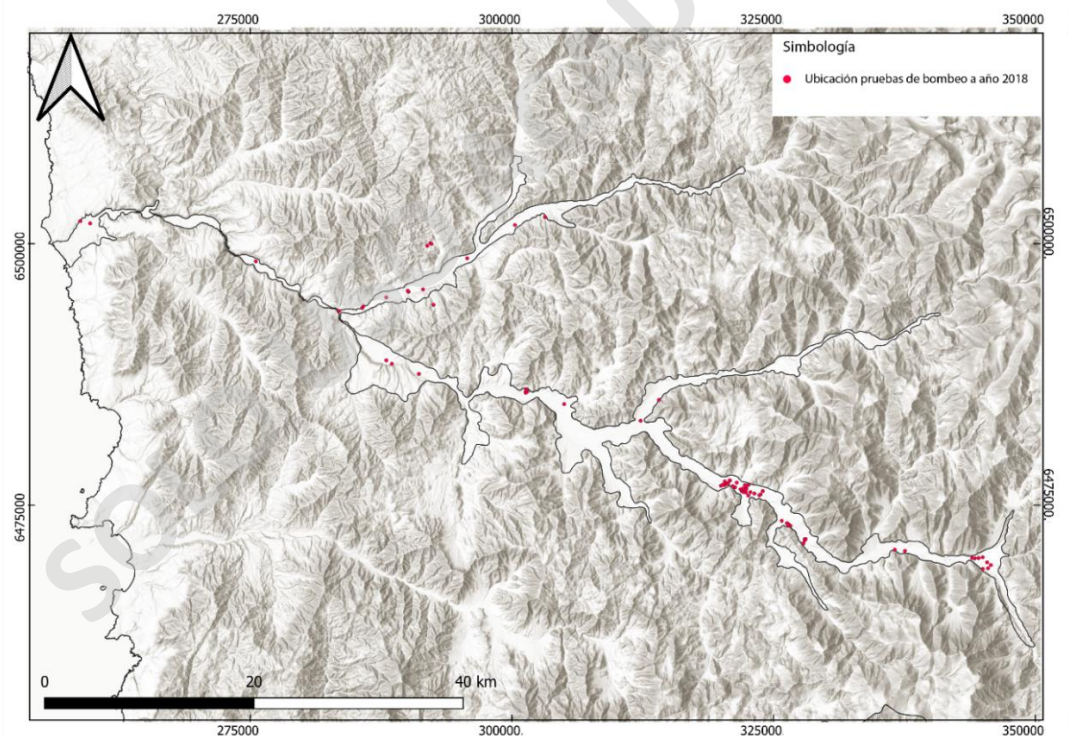


Figura 31. Mapa distribución pruebas de bombeo al año 2018. Datos: Guerrero 2018.

6. CONCLUSIONES

Los sistemas de aguas subterráneas se encuentran controlados por procesos geológicos, tanto en su formación como en su funcionamiento y estructura. Los modelos hidrogeológicos numéricos existentes en la cuenca del Río Choapa carecen en su planteamiento y desarrollo de un análisis e integración comprensivo del problema geológico en el que se enmarcan estos procesos, proponiendo modelos que terminan perdiendo veracidad y capacidad de representar el sistema hidrogeológico real por una sobre simplificación del problema geológico.

Los modelos estudiados demuestran una evidente falta de tridimensionalidad, esto debido a la tendencia que presentan de promediar los valores de los datos hacia la superficie del relleno, generando así, una falta de consideración de la variabilidad interna de los depósitos en el eje vertical, comprometiendo nuevamente su capacidad de representar al sistema hidrogeológico real.

La metodología de trabajo aplicada fue eficiente y adecuada para lograr realizar un análisis crítico e identificación de brechas geológicas a los modelos de la cuenca, esto se basa en que el trabajo y estudio de estos modelos en base a sus atributos permite seguir un orden lógico y estructurado en la revisión de parámetros que muchas veces son interdependientes entre sí.

La interpolación del basamento rocoso es un paso necesario para construir un modelo hidrogeológico numérico y nunca estará ausente de incertidumbre, por lo que la propuesta de probar diferentes métodos de interpolación para determinar cuál es el más certero supone una buena alternativa, debido a que busca disminuir la incertidumbre de este proceso al mínimo según la cantidad de datos que existan y las características de la cuenca. Por otro lado, proponer una opción más sencilla resulta fundamental para asegurar un mínimo de calidad en el proceso de interpolación del basamento rocoso.

La aplicación e integración de un método geofísico como el TEM para complementar el conocimiento del subsuelo en la cuenca resulta interesante debido a que representa un método rápido y barato de aumentar el entendimiento del sistema acuífero, pero a su vez debe ser tratado con cautela debido a la posibilidad de errores por interferencia antropogénica y a la dependencia que tiene de la persona que lleva a cabo las interpretaciones de los datos.

Dividir el dominio del modelo en capas o unidades hidrogeológicas acerca un modelo hidrogeológico a representar el sistema real de manera sencilla y eficaz, siempre y cuando la cantidad de capas propuestas sean las suficientes para que el sistema no sea sobre simplificado, pero también, considerando que proponer demasiadas capas puede añadir incertidumbre y exceso de tiempo de cómputo al modelo.

La metodología propuesta por Monreal et al. (2011) para la subdivisión de capas en modelos hidrogeológicos es sencilla, eficaz y eficiente, por lo que representa una buena alternativa para suplir la brecha propuesta en la cuenca del Río Choapa.

Realizar un análisis de la validez de los datos de parámetros hidráulicos es fundamental para la correcta parametrización de la cuenca, pues una serie de datos promediados a la superficie falla en representar la variabilidad interna del depósito, por lo que no sería aceptable geológicamente trabajar con datos promediados a la superficie.

Caracterizar los primeros metros de basamento rocoso es esencial, pues esta zona de transición tiene potencialmente la capacidad de almacenar y transmitir agua, por lo que puede tener un efecto en las condiciones de flujo subterráneo, como además, representar un volumen no cuantificado de agua, afectando así, la estimación de la disponibilidad hídrica del sistema hidrogeológico de la cuenca del Río Choapa.

Existe un amplio margen de mejoras sobre el manejo y almacenamiento de los datos existentes en la cuenca por parte de la DGA. El estado actual de la plataforma hace que la recolección y trabajo de los datos resulte en una tarea tediosa que aleje al modelador de incorporar los datos por disposición de tiempo y presupuesto. Una plataforma ordenada y didáctica para la adquisición de los datos de la cuenca permitiría una integración más rápida y eficiente de la información, que resultaría en un beneficio para el conocimiento y entendimiento del sistema hidrogeológico de la cuenca del Río Choapa.

En general, las propuestas de la propuesta metodológica incluido en este estudio buscan aumentar la representatividad del sistema geológico y de sus factores controladores en el sistema hídrico de la cuenca del Río Choapa de manera sencilla y eficaz, para así, aumentar las chances de que estas propuestas sean consideradas en futuros modelos que puedan ser desarrollados en la cuenca.

7. BIBLIOGRAFÍA

- AC Ingenieros Consultora LTDA (2012). Investigación recarga artificial de acuíferos cuencas del Río Choapa y Quilimarí, región de coquimbo.
- Aguilar, G.; Riquelme, R.; Martinod, J.; Darrozes, J. (2013). Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32°S. *Andean geology*, 40(1), 79-101. <https://dx.doi.org/10.5027/andgeoV40n1-a04>.
- Aguirre, L.; Egert, E. (1962). Las formaciones manganesesíferas de la región de Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. *Revista Minerale*s, No. 76, p. 25-37. Santiago.
- Arid, P. (2019). Deepwater Pressure Management. *Deepwater Drilling*, 69–109. doi:10.1016/b978-0-08-102282-5.00003-x.
- Anderson, M., Woessner, W., y Hunt, R. (2015). Spatial Discretization and Parameter Assignment. *Applied Groundwater Modeling*, 181–255. doi:10.1016/b978-0-08-091638-5.00005-5.
- Aracil, E., Aaruri, U., Vallés, J., Martínez-pagán, P., Porres, F. (2003). Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica. En: Ingeopres. Madrid: Entorno Gráfico, vol. 122, p. 34-39. ISSN: 1136-4785.
- Auken, E., Jorgensen, F., & Sorensen, K. (2003). Large-scale TEM investigation for groundwater. *Exploration Geophysics*, 34(3), 188. doi:10.1071/eg03188.
- Baalousha, H., Fahs, M., Ramasomanana, F., Younes, Anis. (2019). Effect of Pilot-Points Location on Model Calibration: Application to the Northern Karst Aquifer of Qatar. *Water*. 11. 10.3390/w11040679.
- Blanco, B. (2016). Análisis de las variaciones de resistividad eléctrica utilizando Transiente electromagnético en la cuenca de Santiago.
- Bouwer, H. (1978). *Groundwater Hydrology*. McGraw Hill Book Company, New York.
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, (2020). Aquifer. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/aquifer>.

- Brown, R. (1980). Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid-solid coupling factor in Biot's equations for acoustic waves in fluid-filled porous media. *GEOPHYSICS*, 45(8), 1269–1275. doi:10.1190/1.1441123.
- Burgos, V. y Salcedo, A. (2014). Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información.
- Carrasquilla, A., y Ulugergerli, E. (2006). Evaluation of the transient electromagnetic geophysical method for stratigraphic mapping and hydrogeological delineation in Campos Basin, Brazil.
- Cecioni, G.; Westermann, G. (1968). The Triassic/Jurassic marine transition of Coastal Central Chile. *Pacific Geology*, No. 1 p. 41-75.
- Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas. ¿Qué es el agua subterránea? (2021), de (IGRAC) Sitio web: <https://www.un-igrac.org/es/es/que-es-agua-subterranea>.
- Cifuentes, A. (2016). Evaluación de diferentes métodos de interpolación para la variable precipitación en el departamento de Caldas – Colombia.
- Clark J. y Page R. (2011) Inexpensive Geophysical Instruments Supporting Groundwater Exploration in Developing Nations, *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 3 No. 10, pp. 768-780. doi: 10.4236/jwarp.2011.310087.
- Clark, I. (2004). *The Art of Cross Validation in Geostatistical Applications*.
- Cui, T., Sreekanth, J., Pickett, T., Rassam, D., Gilfedder, M., y Barrett, D. (2021). Impact of model parameterization on predictive uncertainty of regional groundwater models in the context of environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 90, 106620. doi: 10.1016/j.eiar.2021.106620.
- Cuitiño, L. (1985). Estudio geológico del yacimiento de lapolíazuli Flor de los Andes. Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica, Memoria de título, 150p. Santiago.
- Demirci, İ., Gündoğdu, N. Y., Candansayar, M. E., Souplos, P., Vafidis, A., y Arslan, H. (2020). Determination and Evaluation of Saltwater Intrusion on Bafra Plain: Joint Interpretation of Geophysical, Hydrogeological and Hydrochemical Data. *Pure and Applied Geophysics*. doi:10.1007/s00024-020-02573-2.

- DGA, ONU y CORFO. (1979). Hidrogeología de la cuenca del Río Choapa.
- DICTUC S.A y SEI (2019), Desarrollo de herramienta para el análisis de gestión en el marco del plan nacional de recursos hídricos.
- Dictuc S.A. (2021). Diagnóstico hidrogeológico del acuífero del río camarones, región de Arica y Parinacota, Chile. RESUMEN EJECUTIVO.
- Diersch, H. (2013). Fundamental Concepts of Finite Element Method (FEM). FEFLOW, 239–404. doi:10.1007/978-3-642-38739-5_8.
- Doherty, J. (2003). Ground Water Model Calibration Using Pilot Points and Regularization. Ground Water, 41(2), 170–177. doi:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02580.x.
- Farzamian, M., Alves Ribeiro, J., Khalil, M. A., Monteiro Santos, F. A., Filbandi Kashkouli, M., Bortolozzo, C. A., y Mendonça, J. L. (2018). Application of Transient Electromagnetic and Audio-Magnetotelluric Methods for Imaging the Monte Real Aquifer in Portugal. Pure and Applied Geophysics. doi:10.1007/s00024-018-2030-7.
- Felicísimo, A. (1994): Parametric statistical method for error detection in digital elevation models.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. (1979). Groundwater, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. J.
- Fundación Chile. (2018).” Radiografía del agua: Brechas y Riesgo hídrico en Chile”.
- Gao, H. (2011). Groundwater Modeling for Flow Systems with Complex Geological and Hydrogeological Conditions. Procedia Earth and Planetary Science, 3, 23–28. doi: 10.1016/j.proeps.2011.09.061.
- Garreaud, R. (2013): Warm winter storms in Central Chile. J. of Hydrometeorology, 14, 1515-1534.
- Geodatos S.A. (2015). Estudio geofísico para la modelación hidrogeológica del salar de atacama.
- Geodatos S.A. (2016). Estudio geofísico complementario en el salar de punta negra sector quebrada guanaquero, región de antofagasta.
- Godoy, V. (2018). Incertidumbre de parámetros hidrogeológicos en simulaciones predictivas con aplicación en subcuenca del río rapel, región de coquimbo.

- Guarracino, L. y Tocho, C. (2013). Determinación del coeficiente de almacenamiento o porosidad drenable mediante mediciones de gravedad in situ.
- Guerra M. (2018). Acuífero. In: Bobrowsky P.T., Marker B. (eds) Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_17.
- Guerrero, P. (2018). Proyecto de recarga artificial en la cuenca Río Choapa; propuesta de zonas óptimas para su implementación y evaluación económica.
- Guimaraens, M., Barrios, A. y Martín, J. (2014). Utilización de transiente electromagnético para la ubicación y diseño de pozos para la captación de agua subterránea - alhsud xii congreso latinoamericano de hidrogeología Santiago, Chile, agosto 2014.
- Guo, B. (2019). Petroleum reservoir properties. Well Productivity Handbook, 17–51. doi:10.1016/b978-0-12-818264-2.00002-6.
- Haghnegahdar, A., Tolson, B. A., Craig, J. R., y Paya, K. T. (2015). Assessing the performance of a semi-distributed hydrological model under various watershed discretization schemes. Hydrological Processes, 29(18), 4018–4031. doi:10.1002/hyp.10550.
- Harris, B., Wilkes, P., & Kepic, A. (2006). Acquisition of Very Early Time Transient Electromagnetic Data for Shallow Geotechnical, Environmental and Hydrogeological Applications. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2006. doi:10.4133/1.2923701
- Heath, R. C. (1987). "Basic Ground-Water Hydrology." U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220.
- Hidrogestión (2016). Modelación hidrogeológica de acuíferos de la cuenca del Río Choapa – región de Coquimbo. Ubicación de baterías de pozos colectivos para dar mayor explotación al acuífero compensando los recursos superficiales de las interferencias río-acuífero.
- Jara, P. y Charrier, R. (2014). Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Mesozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32° y 32°30'S: Implicancias estructurales y paleogeográficas. *Andean geology*, 41(1), 174-209. <https://dx.doi.org/10.5027/andgeoV41n1-a07>.

- Kanta, A., Soupios, P., Barsukov, P., Kouli, M., & Vallianatos, F. (2013). Aquifer characterization using shallow geophysics in the Keritis Basin of Western Crete, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 70(5), 2153–2165. doi:10.1007/s12665-013-2503-z
- Kapoor, A., Kashyap, D. (2021). Parameterization of Pilot Point Methodology for supplementing Sparse Transmissivity Data.
- Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics*. doi:10.1007/978-3-540-88405-7
- Krasny, J. (1993). Classification of transmissivity magnitude and variation. *Groundwater*, 31: 230-236.
- Kruseman, G. y Ridder, N. (1994). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*
- Kwader, T. (1985). Estimating Aquifer Permeability from Formation Resistivity Factors. *Ground Water*, 23(6), 762–766. doi:10.1111/j.1745-6584.1985.tb01955.x.
- Lachassagne, P. (2001). Overview of the Hydrogeology of Hard Rock Aquifers: Applications for their Survey, Management, Modelling and Protection. *Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers*, 40–63. doi:10.1007/978-1-4020-6540-8_3.
- Leuangthong, O., McClennan, J. y Deutsch, C. (2004). Minimum Acceptance Criteria for Geostatistical Realizations. *Natural Resources Research*.
- Liao, Kaihua & Xu, Shaohui & Wu, Jichun & Zhu, Qing. (2013). Spatial estimation of surface soil texture using remote sensing data. *Soil Science and Plant Nutrition*. 59. 10.1080/00380768.2013.802643.
- Lugo, E., Playà, E. y Rivero, Ll. (2008). Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección de formaciones evaporíticas.
- Mariita, N. (2007). *The gravity method*.
- Méndez, P. (NA). Abatimiento del nivel piezométrico en acuíferos confinados con pozos de bombeo. Comparación entre la solución analítica y numérica mediante Modflow.
- Miall, A. (2006). *Fluvial Depositional Systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03237>.
- Ministerio de Obras Públicas. (2012). *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2010-2025*. Memoria no publicada.

- Monreal, R., Rangel, M., Grijalva, A., Minjarez, I. y Morales, M. (2011). Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas: caso del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1),119-135. ISSN: 1405-3322.
- Montealegre, F., Rodríguez, A., Tavarone, M., Senisterra, G., Gómez M., Gaspari, F., Perdomo, R., Simontacchi, L. (2017). Modelos digitales de elevación: correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta geológica lilloana*.
- Munizaga, F. (1972). Edades radiométricas de rocas chilenas. *In Instituto de Investigaciones Geológicas, Jornadas de Trabajo*, Vol. 2, Sec. 1, p. 132-135. Antofagasta.
- Munizaga, F.; Vicente, J. (1982). Acerca de la zonación plutónica y del volcanismo mioceno de los Andes de Aconcagua (Lat. 32°-33°S): Datos Radiométricos K-Ar. *Revista Geológica de Chile*, No. 16, p. 3-21.
- Oficina De Estudios y Políticas Agrarias. (2020). Ficha regional: Región de Coquimbo.
- Oksanen, J. (2006). Digital Elevation Model Error in Terrain Analysis.
- Oreskes, N., Bokulich, A. (2017). "Models in the Geosciences" Springer Handbook of Model Based Science. Springer. Pp. 891-911.
- Ortiz, O. (NA). Propiedades Hidrodinámicas de los Medios Porosos.
- Oz, B. (2003). Cross Validation for Selection of Variogram Model and Kriging Type: Application to IP Data from West Virginia.
- Pontificia Universidad Católica de Chile (2019). Migración de modelos hidrogeológicos desarrollados en visual-modflow y groundwater vistas hacia su estado nativo de código modflow.
- PROMMRA y CEAZA. (2019). Desarrollo de un modelo 3D de reservas de agua subterránea en una plataforma web para mejorar toma de decisión durante sequías en el río Limarí, Chile. INFORME TÉCNICO.
- Puvvadi, S., Sridharan, A. y Vk, S. (2011). Hydraulic Conductivity of Bentonite Sand Mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*. 37. 406-413. 10.1139/t99-120.
- Reynolds, J. (2010). An introduction to applied and environmental geophysics.

- Rivano, S., Sepúlveda, P. (1991). Geología del área Illapel, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, mapa escala 1:100.000.
- Rivano, S., Sepúlveda, P. (1991). Geología del área Quillota - Portillo, Regiones de Valparaíso y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, mapa escala 1:100.000.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Hervé, M., Puig, A. (1985). Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32°S, latitud sur, Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 24, p. 63-74.
- Rodríguez, M., Carretier, S., Charrier, R. (2009) Evolución geomorfológica neógena en el valle del Río Choapa [31 a 32o S]: resultados preliminares [artículos de congresos].
- Rosales, G. (1988). Geología del área de Combarbalá-San Lorenzo (31°00 y 31°15' latitud sur). Región de Coquimbo. Memoria de Título. *Departamento de Geología y Geofísica*, 122p. Santiago.
- Rossi, M., y Deutsch, C. (2014). Mineral Resource Estimation. doi:10.1007/978-1-4020-5717-5
- Sapia, V., Viezzoli, A., Jorgensen, F., Oldenborger, G. A., y Marchetti, M. (2014). The Impact on Geological and Hydrogeological Mapping Results of Moving from Ground to Airborne TEM. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 19(1), 53–66. doi:10.2113/jeeeg19.1.53.
- Saravanan, S., Parthasarathy, K., & Sivaranjani, S. (2019). Assessing Coastal Aquifer to Seawater Intrusion: Application of the GALDIT Method to the Cuddalore Aquifer, India. *Coastal Zone Management*, 233–250. doi:10.1016/b978-0-12-814350-6.00010-0.
- Schloeder, C., Zimmerman, N., y Jacobs, M. (2001). Comparison of Methods for Interpolating Soil Properties Using Limited Data. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 470. doi:10.2136/sssaj2001.652470x.
- Sen, Z. (2015). Unconfined Aquifers. *Practical and Applied Hydrogeology*, 209–278. doi:10.1016/b978-0-12-800075-5.00004-2.
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2021). Guía para el uso de modelos de agua subterránea en el SEIA.
- Sreekanth, J., Moore, C., Wolf, L. (2015). Estimation of Optimal Groundwater Substitution Volumes Using a Distributed Parameter Groundwater Model and Prediction Uncertainty Analysis. *Water Resources Management*. 29. 10.1007/s11269-015-1022-y.

- Taylor, K., Widmer, M., y Chesley, M. (1992). Use of transient electromagnetics to define local hydrogeology in an arid alluvial environment. *GEOPHYSICS*, 57(2), 343–352. doi:10.1190/1.1443248.
- Varalakshmi, V., Venkateswara Rao, B., SuriNaidu, L., y Tejaswini, M. (2014). Groundwater Flow Modeling of a Hard Rock Aquifer: Case Study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(5), 877–886. doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0000627.
- Villarroya, F. (2009). Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego.
- Wackernagel, H. (1995). Ordinary Kriging. *Multivariate Geostatistics*, 74–81. doi:10.1007/978-3-662-03098-1_11.
- Wechsler, S. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union.
- Wellmann, F., Horowitz, F., Schill, E., Regenauer-Lieb, K. (2010). Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. *Tectonophysics*. 490. 10.1016/j.tecto.2010.04.022.
- Winkley, S. (2019). An introduction to pumping tests.
- Yáñez, R. (2017). Análisis interpretativo del recurso hídrico subterráneo utilizando el método Transiente electromagnético en el dominio del tiempo en la cuenca del Río Limarí, IV Región de Coquimbo, Chile.
- Yrigoyen, M., (1976). Observaciones geológicas alrededor del Aconcagua. Primer congreso geológico chileno (2 - 7 agosto 1976)
- Zhu, Q. y Lin, H. (2010). Comparing Ordinary Kriging and Regression Kriging for Soil Properties in Contrasting Landscapes.
- Zúñiga, A. (2021). Métodos de interpolación para la creación de superficies de basamentos rocosos: revisión, comparación e implicancias en aspectos hidrogeológicos.