

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS DE RIESGO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE CON
POZOS EN TRES CIUDADES DE CHILE**

JAVIER ZÁRATE RODRÍGUEZ

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

**CHILLÁN-CHILE
2022**

**ANÁLISIS DE RIESGO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE
CON POZOS EN TRES CIUDADES DE CHILE**

Aprobado por:

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Titular

Profesor Guía

Luis Antonio Seminario Salas
Ingeniero en Industrias Alimentarias, Msc
Profesor Asistente

Profesor Asesor

Jerónimo Paredes Cáceres
Licenciado en Matemáticas, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesora Asistente

Directora de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesora Asociada

Decana

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a todo aquel que fue parte de mi camino para convertirme en profesional, a mis compañeros, profesores y a todos los funcionarios de la universidad. Agradecer a mi familia, por darme el apoyo, las herramientas y la tranquilidad para poder enforcarme en mis estudios.

Además, deseo agradecer en especial a los profesores Msc. Luis Antonio Seminario Salas y Dr. Jerónimo Paredes Cáceres por ser parte de mi comisión, por aconsejarme en cada reunión que se tuvo, consejos que cuales fueron recibidos con mucho gusto. Agradecer en especial a Dr. José Luis Arumí Ribera, profesor guía en este estudio, por su paciencia, buen trato, por la entrega de sus conocimientos, por la libertad que me dio a la hora de realizar mi informe, por nunca limitarme, por sus buenos deseos hacia mi futuro y por estar siempre que lo necesité.

Por último, agradecer al Centro Fondap, ANID/Fondap/15130015 por la oportunidad de obtener esta beca para la realización de este proyecto de habilitación profesional.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo general.....	6
2.2 Objetivos específicos.....	6
ANTECEDENTES GENERALES	7
3.1 Área de estudio.....	7
3.2 Consideraciones del estudio.....	9
3.3 Marco teórico	10
3.3.1 Hidrografía del área de estudio.....	10
3.3.2 Pozos.....	11
3.3.3 Nivel Estático de los pozos (Ne)	12
3.3.4 Agua Potable	14
3.3.5 Calidad de agua.....	14
3.3.6 Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA)	15
3.3.7 Sector Hidrológico de Aprovechamiento Común (SHAC)	15
3.3.8 Riesgos	16
3.3.9 Método BGR-DGA	16
METODOLOGÍA.....	19
4.1 Balance Hídrico.....	19
4.1.1 Demanda (DAA).....	19
4.1.2 Recargas.....	20
4.1.3 Estimación del estrés hídrico	23

4.2	Niveles Estáticos.....	24
4.3	Riesgos y vulnerabilidad	25
4.3.1	Calidad de agua.....	25
4.3.2	Uso de suelos	25
4.3.3	Método BGR-DGA	26
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1	Balance Hídrico.....	30
5.1.1	Demanda Hídrica	30
5.1.2	Precipitaciones.....	31
5.1.3	Recargas preliminares	32
5.1.4	Balance hídrico	33
5.1.5	Estimación del estrés hídrico	34
5.2	Nivel Estático	35
5.2.1	Ovalle.....	35
5.2.2	Chillán	36
5.2.3	Osorno	37
5.3	Riesgos y Vulnerabilidad	38
5.3.1	Calidad de agua.....	38
5.3.2	Uso de suelo	39
5.3.3	Método BGR-DGA	41
	CONCLUSIONES.....	44
	BIBLIOGRAFÍA	46
	ANEXOS.	50

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Ciudades estudiadas.	7
Tabla 2. Plantas de extracción estudiadas.	12
Tabla 3. Derechos otorgados a Empresas Sanitarias estudiadas.	12
Tabla 4. Fuentes de Abastecimiento.	14
Tabla 5. Formato de los DDA otorgados.	20
Tabla 6. Estimación preliminar de recargas en los acuíferos.	20
Tabla 7. Estaciones meteorológicas de las ciudades estudiadas.	21
Tabla 8. Capas vectoriales.	23
Tabla 9. Datos para la estimación de recargas.	23
Tabla 10. Sondajes en operación.	24
Tabla 11. Capa vectorial.	25
Tabla 12. Puntajes ponderados para el método BGR.	29
Tabla 13. Clases de Efectividad Generalizada de Protección y Vulnerabilidad asociada.	29
Tabla 14. Caudal máximo otorgado por DAA.	30
Tabla 15. Niveles de Estrés Hídrico.	34
Tabla 16. Riesgos asociados a los pozos estudiados.	40
Tabla 17. Capacidad de Campo.	41
Tabla 18. Recargas naturales.	41
Tabla 19. Litología.	42

Tabla 20. Nivel estático.	42
Tabla 21. Pozos surgentes.	43
Tabla 22. Vulnerabilidad.	43

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ciudades estudiadas.....	8
Figura 2. Hidrología superficial.....	10
Figura 3. Pozos estudiados.	11
Figura 4. Características para medir durante el monitoreo de aguas subterráneas (sin bombeo).....	13
Figura 5. SHAC´S estudiados.	22
Figura 6. Evolución del caudal asociado a los DAA Otorgados.....	31
Figura 7. Precipitaciones.	32
Figura 8. Recargas preliminares.	32
Figura 9. Balance Hídrico.	34
Figura 10. Evolución del nivel estático de los pozos de Ovalle.	35
Figura 11. Evolución del nivel estático de los pozos de Chillán.	37
Figura 12. Evolución del nivel estático de los pozos de Osorno.....	38
Figura 13. Zona de influencia pozos EESS.	40

ANÁLISIS DE RIESGO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE CON POZOS EN TRES CIUDADES DE CHILE

RISK ANALYSIS OF DRINKING WATER SUPPLY BY WELLS IN THREE
CHILEAN CITIES

Palabras Claves: agua potable, acuíferos, empresas sanitarias, pozos, aguas subterráneas, riesgos, vulnerabilidad, método BGR, balance hídrico.

RESUMEN:

El objetivo de este estudio es analizar el riesgo del abastecimiento de agua potable mediante pozos en tres ciudades de Chile. Para representar distintas zonas de Chile, se seleccionaron las ciudades de Ovalle, Chillán y Osorno, identificando los pozos que las abastecen respectivamente, analizando los riesgos y vulnerabilidades ante contaminación y escasez hídrica. En cuanto a la disponibilidad hídrica se llevó a cabo un análisis en los niveles del acuífero y un balance hídrico preliminar en los sectores hidrogeológico de aprovechamiento común (SHAC) respectivos. Respecto a los contaminantes que pudiesen afectar los acuíferos, se utilizó el método BGR, oficial de la DGA, para determinar la vulnerabilidad antes ellos, además, se realizó un análisis en la calidad del agua potable que se consume en las ciudades y, por último, se identificó los riesgos según los usos del suelo en las cercanías. Como resultados se obtuvo que los pozos que abastecen a la ciudad de Ovalle presentan una alta vulnerabilidad hacia contaminantes, además, un estrés hídrico muy alto en su respectivo SHAC, lo que se vería reflejado en los niveles estáticos con una baja del 41% en el año 2020 respecto al año 2015. Luego, los pozos que abastecen a la ciudad de Chillán presentan una baja

vulnerabilidad hacia contaminantes, además, un estrés hídrico alto en su respectivo SHAC, lo que se vería reflejado en los niveles estáticos con una baja del 18% en el año 2020 respecto al año 2015. Finalmente, los pozos que abastecen a la ciudad de Osorno presentan una baja vulnerabilidad hacia contaminantes, además, un estrés hídrico bajo en su respectivo SHAC, sin embargo, los niveles estáticos sufrieron una baja del 25% en el año 2020 respecto al año 2015.

RISK ANALYSIS OF DRINKING WATER SUPPLY BY WELLS IN THREE CHILEAN CITIES

Keywords: drinking water, aquifers, water utilities, wells, groundwater, risks, vulnerability, BGR method, water balance.

ABSTRACT:

The objective of this study is to analyze the risk of drinking water supply through water wells in three cities in Chile. To represent different areas of Chile, the cities of Ovalle, Chillán and Osorno were selected, identifying the water wells that supply them, analyzing the risks and vulnerabilities to water pollution and scarcity. Regarding water availability, an analysis of water levels and a preliminary water balance in their aquifers was carried out. Regarding the vulnerability of the aquifers to pollutants, the official DGA BGR method was used. Next, an analysis of drinking water quality was carried out. Finally, risks were identified based on nearby land use. The results showed that the water wells supplying the Ovalle city have a high vulnerability to pollutants, as well as a very high-water stress in their respective aquifer, which would be reflected in the static levels with a 41% drop in 2020 compared to 2015. Then, the water wells that supply the Chillán city have a low vulnerability to pollutants, as well as a high-water stress in their respective aquifer, which would be reflected in the static levels with a drop of 18% in 2020 with respect to 2015. Finally, the water wells supplying the Osorno city have a low vulnerability to pollutants and low-water stress in their respective aquifer, however, static levels suffered a 25% drop in 2020 with respect to 2015.

INTRODUCCIÓN

En Chile, el agua potable es administrada a través de distintas concesionarias sanitarias y más del 40% proviene de fuentes subterráneas. A diciembre de 2020, el sector sanitario urbano, está compuesto por 56 concesionarias, de las cuales 51 se encuentran efectivamente en operación, y atienden en las 16 regiones del país. La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) es el organismo normativo y fiscalizador de las empresas sanitarias, encargándose de regir la Norma Chilena NCh 409, la cual establece las condiciones mínimas para la calidad del agua potable (SISS, 2021b).

El agua subterránea, por su naturaleza y abundancia, constituye un recurso estratégico frente a la previsible disminución de los recursos hídricos superficiales. Sin embargo, los nuevos escenarios de cambio climático introducen algunas incertidumbres de cara al futuro, debido fundamentalmente al aumento de las temperaturas, a la variación y mayor concentración de las precipitaciones, que van a influir tanto en el volumen de los recursos hídricos subterráneos como en su calidad (Pernia, 2009). Por ejemplo, en Chile, el cambio climático ha tenido un efecto significativo en las precipitaciones, generando una disminución que no ha cesado en más de una década. Siendo el período decadal 2010-2019 el más seco desde 1961, alcanzando un promedio de 20.6 % de déficit a nivel nacional (DGAC, 2021). Para proteger los acuíferos de contaminantes se estableció la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas en el Decreto Supremo N°46/2002, la cual tiene por objeto regular la descarga de contaminantes hacia aguas subterráneas,

mediante la fijación de límites máximos permisibles para la descarga de residuos líquidos (SMA, 2021).

Para analizar el riesgo de abastecimiento de agua potable, se seleccionaron tres ciudades de Chile: Ovalle, Chillán y Osorno. Estas ciudades poseen pozos donde las empresas sanitarias respectivas extraen agua subterránea para el consumo humano, y están ubicadas en distintas zonas para realizar comparaciones. Se realizó un estudio respecto al estrés de los acuíferos, complementándolo con una medición en los niveles estáticos de los pozos. Para terminar con lo específico, que serían los riesgos que pudieran afectar su calidad y un análisis de vulnerabilidad con el método oficial de la Dirección General de Aguas (DGA, 2004).

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar el riesgo del abastecimiento de agua potable mediante pozos en tres ciudades de Chile.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar el estrés hídrico asociado a cada uno de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC) presentes en las ciudades estudiadas.
- Analizar la evolución de los niveles estáticos en los pozos de Empresas de Servicios Sanitarios (EESS).
- Análisis de riesgos y vulnerabilidad asociados a los pozos de Empresas de Servicios Sanitarios (EESS).

ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Área de estudio

Con el objetivo de llevar a cabo esta investigación, se seleccionaron tres ciudades, de diferentes regiones de Chile, que fueron escogidas según los siguientes requisitos:

- Corresponder a una comuna con un rango de población entre 100.000 y 200.000 habitantes.
- No ser una ciudad costera.
- Poseer pozos de empresas sanitarias.

Siguiendo estos requisitos, se seleccionaron las siguientes ciudades:

Tabla 1. Ciudades estudiadas.

Ciudad	Región	Superficie (km ²)	Habitantes (Comuna)	Concesionaria
Ovalle	Coquimbo	9	121.269	Aguas del Valle
Chillán	Ñuble	26	184.739	ESSBIO
Osorno	Los Lagos	24	161.460	ESSAL

Fuente: Elaboración propia.

— **Ovalle:** tiene un clima desértico con una temperatura media anual es 17 °C, el mes más caluroso es enero, que registra temperaturas medias de 22°C y una máxima de 29°C. El mes más frío es julio, que anota temperaturas que oscilan entre los 6,5°C y 18,5°C. Respecto a las precipitaciones, el promedio anual es de 155 mm, siendo el mes de junio el más lluvioso (Santibañez, 2017). La comuna de Ovalle presentó el decreto de escasez hídrica en el año 2017.

— **Chillán:** domina el clima templado cálido mediterráneo con estación seca y lluviosa semejante. El mes más caluroso es enero, que registra medias

de 19.7°C y una máxima de 34°C. El mes más frío es julio, con temperaturas que oscilan entre los 4°C y 13°C. Respecto a las precipitaciones, el promedio anual es de 1035 mm, siendo el mes de junio el más lluvioso. (Santibañez, 2017)

— **Osorno:** domina el clima templado mesotermal con régimen de humedad húmedo. El mes más caluroso es enero, que registra temperaturas medias de 16°C y una máxima de 23°C. El mes más frío es julio, con temperaturas que oscilan entre los 3°C y 10°C. Respecto a las precipitaciones, el promedio anual es de 1322 mm, siendo el mes de junio el más lluvioso (Santibañez, 2017). La comuna de Osorno presentó el decreto en mayo del año 2021, por lo que está vigente a la fecha que se realiza este informe.

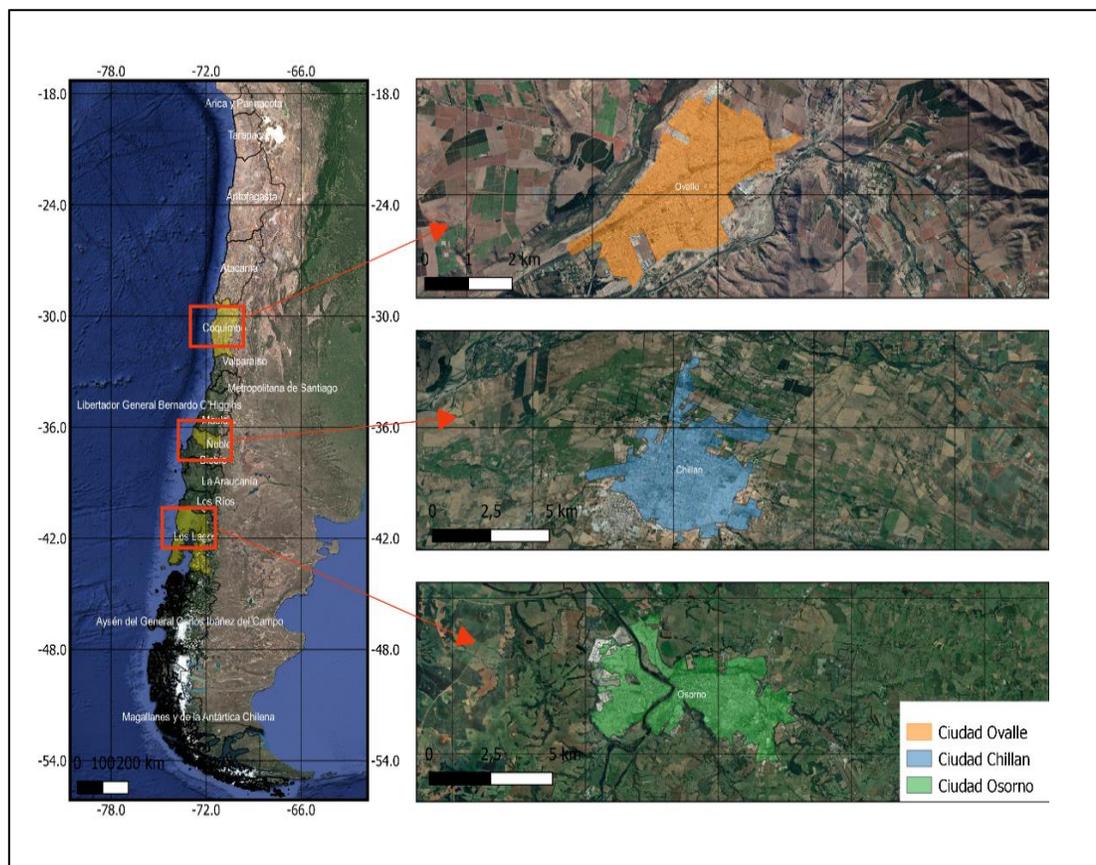


Figura 1. Ciudades estudiadas. Elaboración propia.

3.2 Consideraciones del estudio

El estudio se enfocó en los pozos utilizados por empresas de servicios sanitarios para abastecer de agua potable a la población en distintas ciudades del país, analizando los riesgos y vulnerabilidades ante contaminación y escasez hídrica. Por ello, para complementar este análisis se realizará una comparación de la calidad del agua potable, un análisis en los niveles del acuífero y un balance hídrico preliminar en los sectores hidrogeológico de aprovechamiento común (SHAC) respectivos. Para este estudio es importante señalar:

- Las ciudades son un área urbana de considerable extensión dentro de una comuna, así que, en este informe, se usará el término “la comuna de...” para diferenciar las áreas respectivas de la ciudad con el territorio comunal.
- El agua potable que se consume en las ciudades es una mezcla proveniente de origen subterráneo y superficial, dependiendo de la disponibilidad de agua superficial, que tiene prioridad como fuente.
- El método que se utilizará para analizar la vulnerabilidad es el método BGR-DGA, método oficial propuesto por la DGA para la aplicación del DS 46/2002 (DGA, 2004).

Por lo que, para llevar a cabo esta investigación se debe considerar la ubicación de los pozos de las EEES (Empresas Sanitarias), la oferta y la demanda de los acuíferos respectivos y, los parámetros que se requieren para determinar la vulnerabilidad con el método BGR-DGA.

3.3 Marco teórico

3.3.1 Hidrografía del área de estudio

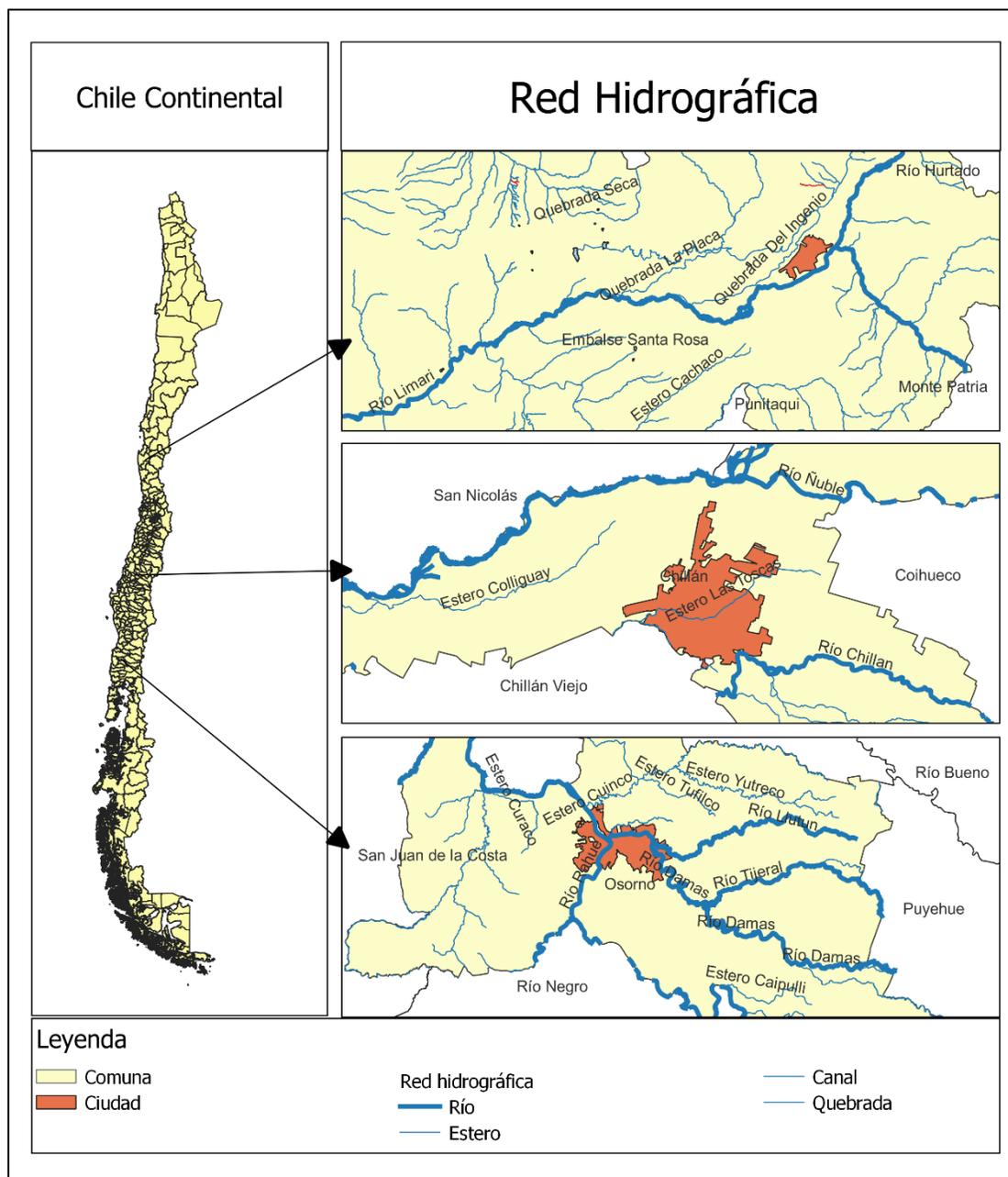


Figura 2. Hidrología superficial. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Pozos

Con las coordenadas obtenidas de los DAA, se logró georreferenciar los pozos de las empresas sanitarias y se determinaron las plantas donde se extrae este recurso.

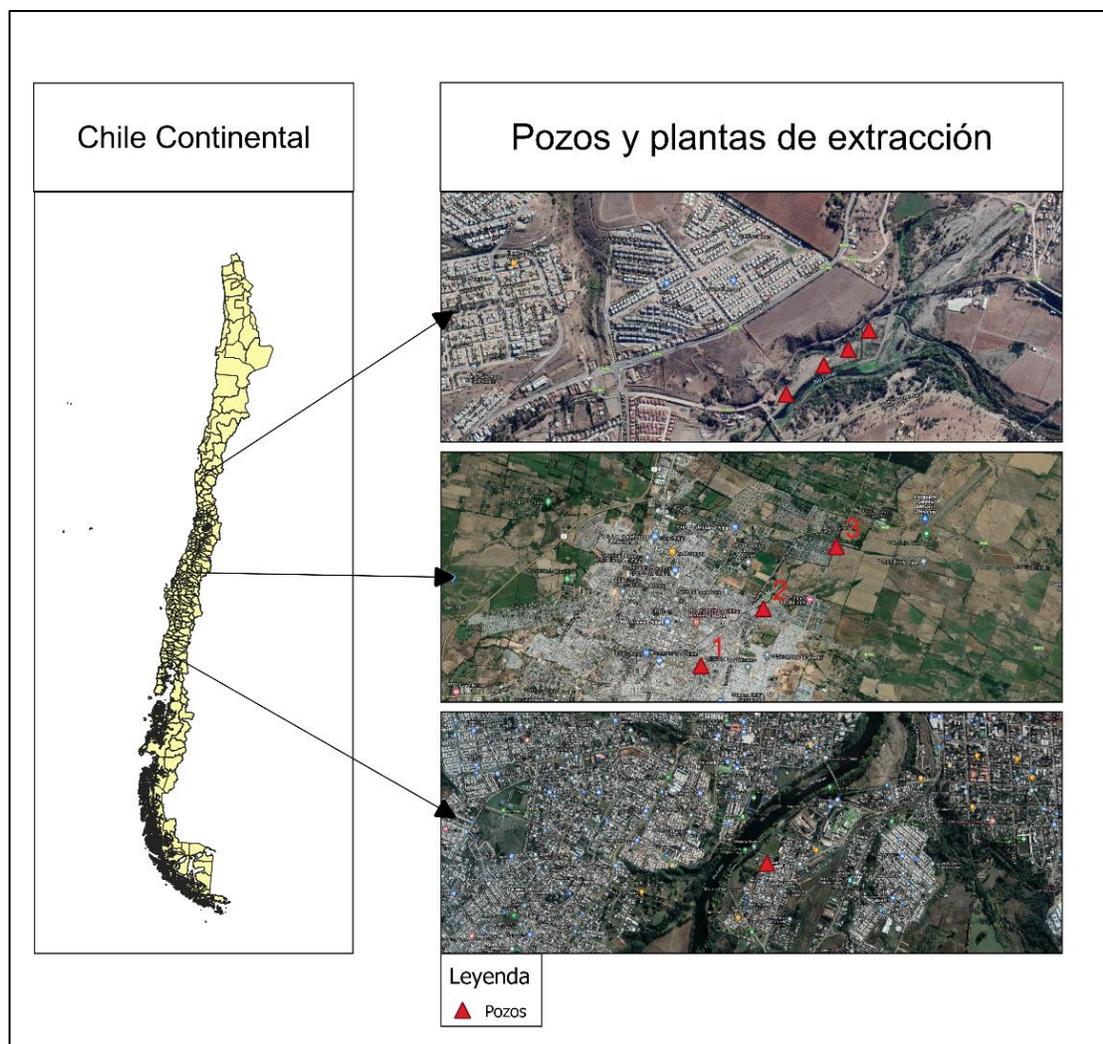


Figura 3. Pozos estudiados. Fuente: Elaboración propia.

Como se logra apreciar en la figura 3, Chillán posee al menos 3 plantas de extracción importantes, las cuales se les denominó Chillán 1 (Sector Oriente), Chillán 2 y Chillán 3 (ambos Sector Nororiental). Ovalle posee 4 pozos importantes situados uno al lado del otro, por lo que se consideró el conjunto

como una planta (Orillas del Río Limarí). Osorno posee una planta principal, llamada ESSAL Ovejería.

Tabla 2. Plantas de extracción estudiadas.

Planta	Coordenadas UTM	Datum
Ovalle	(291907; 6613652)	WGS84 H19S
Chillán 1	(759989; 5943682)	WGS84 H18S
Chillán 2	(761411; 5944942)	WGS84 H18S
Chillán 3	(763020; 5946282)	WGS84 H18S
Osorno	(656330; 5505687)	WGS84 H18S

Fuente: Elaboración propia.

Luego, con los datos otorgados por la DGA, se determinó el número de derechos y el caudal otorgado a los pozos de las Empresas Sanitarias (EE.SS) presentes en las ciudades seleccionadas.

Tabla 3. Derechos otorgados a Empresas Sanitarias estudiadas.

Ciudad	Concesionaria	Nº de derechos otorgados	Dotación total (l/s)
	Aguas del Valle	1	17
Ovalle	ESSAN	1	300
	ECONSSA	1	10
Chillán	ESSBIO	12	583
Osorno	ESSAL	21	1264

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Nivel Estático de los pozos (Ne)

Posición que ocupa el agua subterránea en estado natural. Se expresa mediante la distancia medida desde la superficie del terreno hasta la superficie del agua en el subsuelo. En un pozo, dicha distancia se mide cuando el equipo de bombeo no se encuentra en funcionamiento. (Corporación Autónoma Regional del Cesar, 2009)

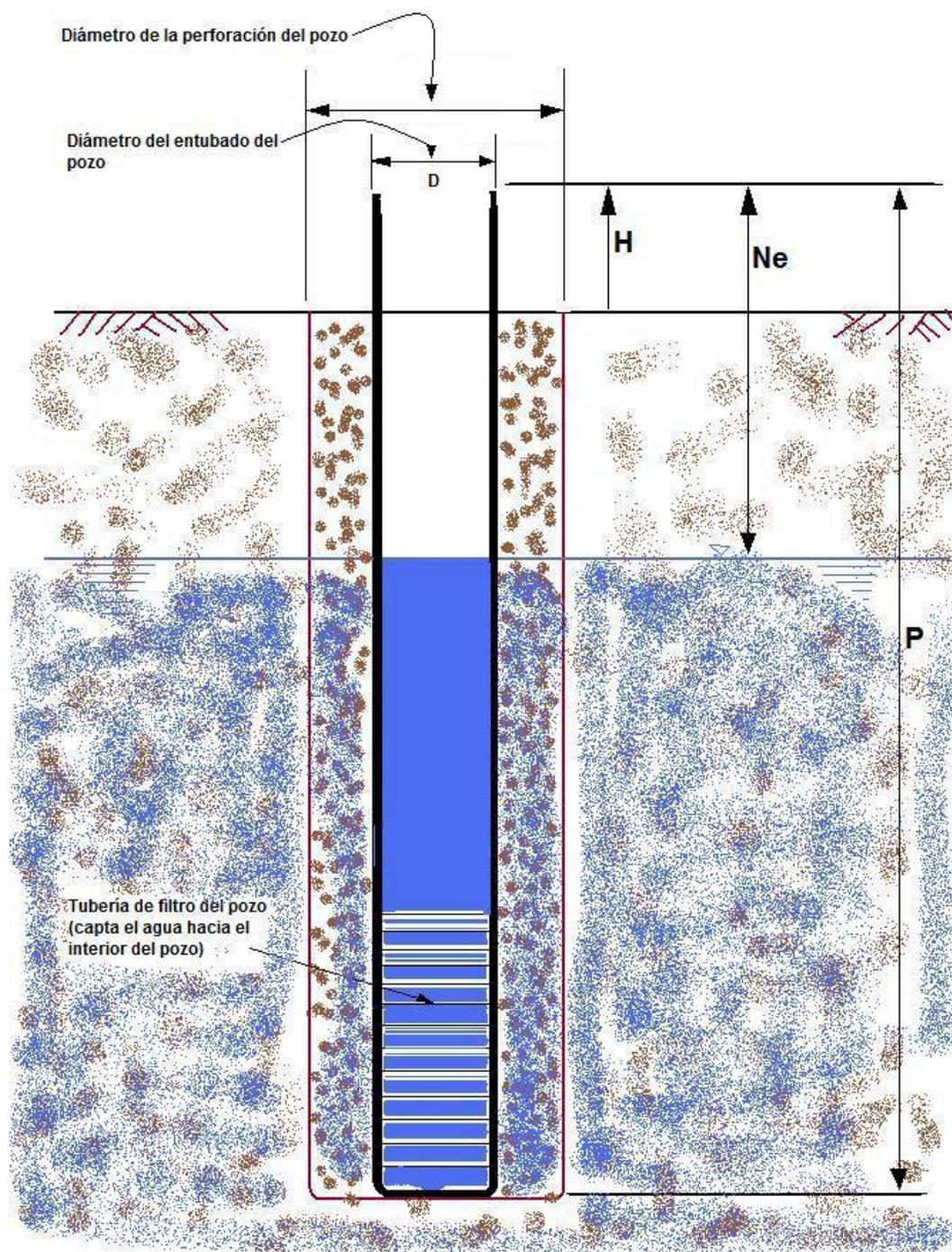


Figura 4. Características para medir durante el monitoreo de aguas subterráneas (sin bombeo). Fuente: Corporación autónoma regional del Cesar, 2009.

El nivel estático indica la distancia entre la superficie del suelo y el acuífero, por lo que nos da información de cambios respecto a este.

3.3.4 Agua Potable

Las fuentes de abastecimiento para la producción de agua potable utilizadas por cada empresa sanitaria dependen de la disponibilidad del recurso en la zona respectiva, de la calidad del agua cruda disponible y de la factibilidad técnica y económica de su explotación (SISS, 2021b).

Tabla 4. Fuentes de Abastecimiento.

Empresa	Capacidad total de producción (L/s)	
	Fuentes subterráneas	Fuentes superficiales
Aguas del Valle	2.850	868
ESSBIO	8.471	5.371
ESSAL	3.453	1.111

Fuente: Informe SISS 2020.

El agua cruda, captada desde las fuentes naturales, puede requerir un tratamiento antes de ser distribuida a la población, a fin de cumplir con todos los requisitos establecidos en la norma de calidad del agua potable (SISS, 2021b).

3.3.5 Calidad de agua

La Superintendencia de Servicios Sanitarios se encarga de fiscalizar las empresas de servicios sanitarios, tomando muestras 43 parámetros de frecuencia mensual y semestral al efluente destinado a los hogares y empresas como agua potable, con el fin de que no se superen los límites de los

parámetros establecidos en la Norma Chilena NCh 409 (INN, 1984). Estas muestras se encuentran disponibles públicamente en su página web institucional (SISS, 2021c) por lo que se dispone de datos suficientes para realizar este estudio.

3.3.6 Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA)

Los DAA se constituyen por un acto de autoridad o por reconocimiento, tienen carácter de derecho real y permiten al titular su uso, goce y disposición a perpetuidad. Los hay de carácter consuntivo y no consuntivo, al igual que poseen características de ejercicio y volumen por unidad de tiempo. La libre circulación de los derechos permite el establecimiento de un mercado de aguas, ya sea para su reasignación (venta), o bien para suplir requerimientos de temporada (arriendo) (Comisión Nacional de Riego, 2021).

3.3.7 Sector Hidrológico de Aprovechamiento Común (SHAC)

Como este estudio se enfoca en las aguas subterráneas, es importante definir qué se entiende por Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC): es acuífero o parte de un acuífero, cuyas características hidrológicas permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión de forma independiente (DGA, 2021c).

3.3.8 Riesgos

Los acuíferos son sistemas dependientes de las condiciones en la superficie, por lo que alguna variación en esas condiciones puede afectar de forma directa a estos sistemas, creando un desequilibrio. Estas variaciones se le denominan estresores, y pueden ser de origen tanto antropogénicos, como natural. En este estudio se considerarán los estresores: oferta hídrica, calidad de agua y los usos de los suelos. Con el fin de determinar los posibles riesgos en los acuíferos seleccionados.

3.3.9 Método BGR-DGA

Este método es de origen alemán y sirve para determinar la vulnerabilidad de acuíferos. Además, es el método oficial de la Dirección General de Aguas para la aplicación del DS 46/2002, el cual tiene como objetivo regular la descarga de contaminantes hacia aguas subterráneas. Combina, mediante un esquema de rating o puntaje, cinco parámetros relevantes que determinan o influyen en la rapidez con la que una determinada sustancia alcanza el acuífero, suponiendo una infiltración desde un sector en la superficie o cercano a ella. (DGA, 2004).

Dichos factores son:

Parámetro 1: Capacidad de Campo Efectiva (Puntaje S)

Capacidad de campo efectiva (CCE) del primer metro de la columna de suelo no saturado ubicada sobre el nivel freático. Es un indicador de la capacidad de que el agua se mueva a través de este, transportando contaminantes. A mayor

capacidad de campo, mayor tiempo le tomará al agua desplazarse a los niveles más bajos del suelo.

Parámetro 2: Tasa de Percolación o Recarga (Factor R)

Tasa de percolación, se debe evaluar tanto la recarga natural como la recarga artificial que percola al acuífero (Factor R). De acuerdo con lo establecido en el manual de la DGA (2004), la recarga total se constituye de dos términos independientes entre sí: Recarga Natural (RN) y la Recarga Artificial (RA).

Parámetro 3: Tipo Litológico (puntaje Ln)

Este parámetro representa la protección que la zona no saturada le entrega al acuífero, retardando el transporte de contaminantes. La zona no saturada corresponde a la parte del suelo que va desde la superficie hasta el nivel freático de un acuífero libre. En esta zona los poros del suelo se encuentran parcialmente llenos de agua, que se mueve verticalmente transportando los contaminantes hacia el agua subterránea. Durante la permanencia de los contaminantes en la zona no saturada, existe la posibilidad de que ocurran procesos bioquímicos que los degraden. Por lo que un mayor tiempo de residencia implica una mayor protección relativa del agua subterránea.

Parámetro 4: Espesor de la Zona no Saturada (Factor E)

Tal como en el caso anterior, este parámetro es un índice del tiempo de residencia del agua en el suelo no saturado. Se debe evaluar la profundidad de la columna de suelo, hasta el límite superior del acuífero.

Parámetro 5: Condiciones Artesianas (puntaje extra A)

Este parámetro representa condiciones extra de protección producidas por la presencia de un acuífero confinado que produzca pozos surgentes (Arumí, 2007).

A cada uno de estos factores se les asocia un puntaje, los cuales, ponderados y sumados entre sí, dan como resultado un valor que se traduce en vulnerabilidad (DGA, 2004).

METODOLOGÍA

El desarrollo de este estudio fue dividido en 3 etapas: 1) Balance hídrico, 2) Evolución en el nivel estático de los pozos y 3) Determinación de los riesgos y vulnerabilidad presentes en los pozos estudiados.

4.1 Balance Hídrico.

Éste estudio se enfocó en estimar el estrés hídrico de los acuíferos respectivos a este proyecto, mediante en un balance preliminar respecto a las recargas anuales que poseen los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC) en donde se emplazan las ciudades o los pozos estudiados, comparándolas con la evolución de la demanda del caudal otorgado por los Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA) en las comunas estudiadas. Por lo tanto:

Entradas = Salidas

Recarga = Demanda (DAA)

4.1.1 Demanda (DAA)

Se extrajeron los datos de la página institucional de la DGA (DGA, 2021a) respecto a los Derechos de aprovechamiento de agua otorgados, seleccionando los correspondientes a una fuente subterránea y pertenecientes a la comuna de las ciudades que se están estudiando. Representado en la siguiente tabla (Tabla 5):

Tabla 5. Formato de los DDA otorgados.

Nombre Solicitante	Comuna	Fuente	Caudal (l/s)	Año	Coordenadas UTM
Aguas del Valle S.A	Ovalle	Subterránea	17,25	2018	291889; 6613648
ESSBIO S.A	Chillán	Subterránea	80	2006	761731; 5945223
ESSAL S.A	Osorno	Subterránea	299	1984	656291; 5505693

Fuente: Elaboración propia.

Luego, con el fin de comparar la evolución respecto a los Derechos de aprovechamiento de agua otorgados, se analizó con la ayuda de Excel el número de entradas, el año de entrada y el caudal total (l/s) aprovechados en cada comuna respectivamente. Para lo anterior se considera un período de estudio entre 1990 hasta el 2020 (30 años).

4.1.2 Recargas

Para estimar las recargas que poseen los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC) respectivos, se utilizará las metodologías presentes en la tabla 5, las cuales son estipuladas por los informes técnicos SDT N°268 (DGA, 2008), SDT N°379 (DGA, 2015) y SDT N°359 (DGA, 2014), oficiales de la Dirección General de Aguas (DGA).

Tabla 6. Estimación preliminar de recargas en los acuíferos.

Ciudad	Metodología	Informe Técnico
Ovalle	$Recarga=Rl+Rd$ $Rl=A*Rl*Pp*Ci*Ce$ $Rd=A*Rd*Pp*Ci$	SDT N°268
Chillán	$Recarga=A*Pp*Ci$	SDT N°379
Osorno	$Recarga=A*Pp*Ci$	DARH N° 208

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

P_p = Precipitaciones (m/año); A = Área (m^2); C_i = Coeficiente de infiltración;

C_e = Coeficiente de escorrentía; R_l = Porción constituida por rocas;

R_d = Porción constituida por depósitos sedimentarios

Para las precipitaciones, se realizó un estudio respecto a los datos históricos otorgados por las estaciones meteorológicas de la tabla 6. Se determinó la evolución de las precipitaciones medias anuales en unidades de mm/año, considerando el período entre los años 1990 y 2020 (30 años).

Tabla 7. Estaciones meteorológicas de las ciudades estudiadas.

Nombre de la estación	Comuna	Código Nacional
Ovalle Escuela Agrícola	Ovalle	300024
General Bernardo O'Higgins, Chillán Ad.	Chillán	360011
Juan Kalt Bode (Fundación Adolfo Matthei)	Osorno	400013

Fuente: Elaboración propia

Paras las áreas, se identificó el sector hidrogeológico de aprovechamiento común (SHAC) respectivo a cada ciudad o pozo estudiado.

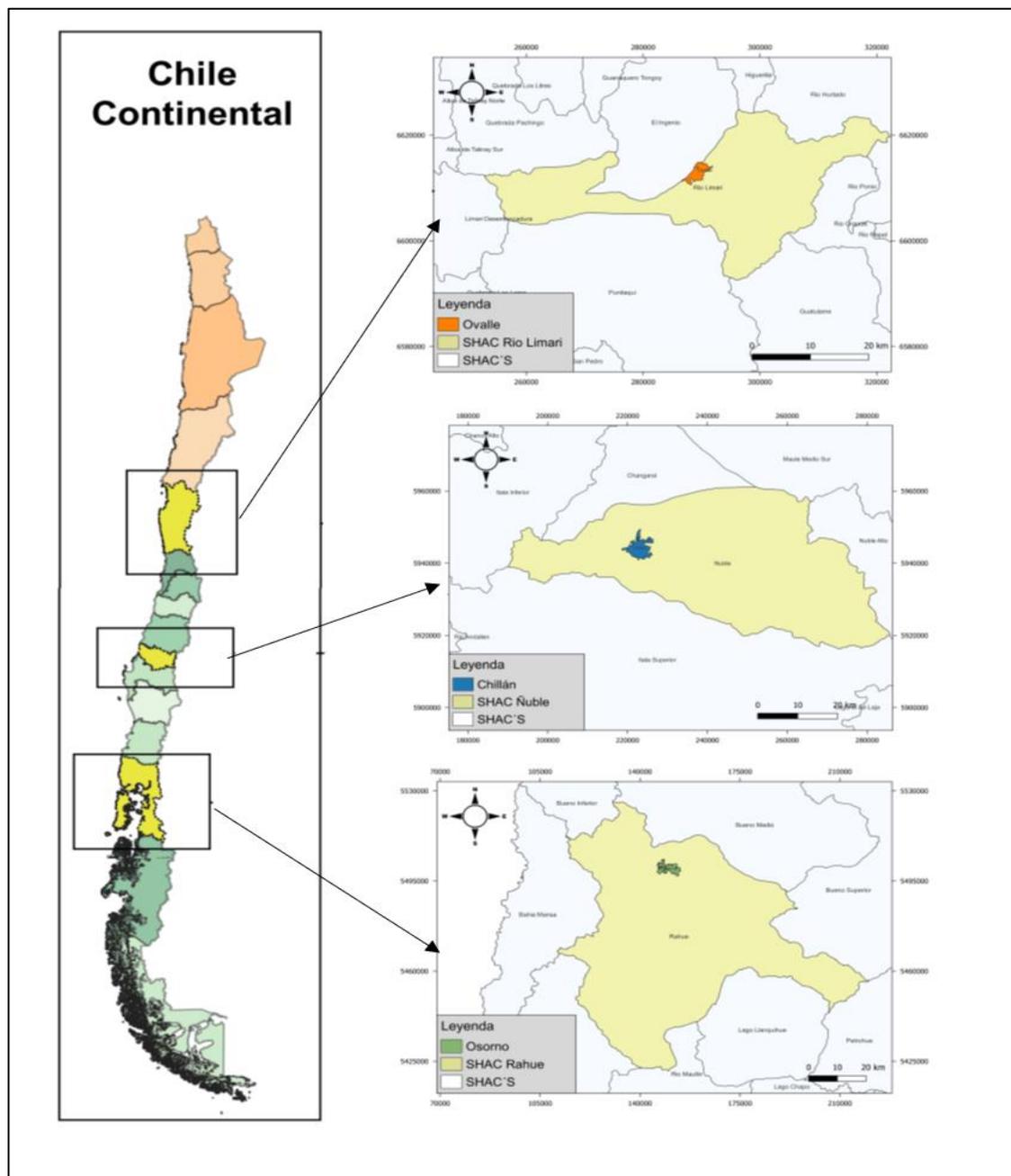


Figura 5. SHAC'S estudiados. Fuente: Elaboración propia.

Esto se llevó a cabo gracias a la capa vectorial shapefile SHAC-junio2021, obtenida en la mapoteca digital de la DGA (DGA, 2021c). Con la ayuda de QGIS, se determinó el área en km².

Tabla 8. Capas vectoriales.

Capa de información	Fuente	Origen
SHAC-junio2021	https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx	Dirección General de Aguas

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los coeficientes de infiltración y escorrentía, se extrajeron de sus respectivos informes técnico. Al igual que en Ovalle, donde se extrajeron las áreas respectivas a las porciones equivalentes a rocas y depósitos sedimentarios.

Tabla 9. Datos para la estimación de recargas.

Ciudad	SHAC	Área (Km ²)	A_{Rd} (Km ²)*	A_{RI} (Km ²)*	Ci*	Ce*
Ovalle	Río Limarí	784,54	482,49	302,05	0,1	0,06
Chillán	Ñuble	2.355	-	-	0,8	-
Osorno	Rahue	5.079	-	-	0,5	-

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Estimación del estrés hídrico

El estrés hídrico se refiere en general a situaciones en las que no se satisface la demanda debido a una combinación de problemas de acceso y disminución en la disponibilidad y/o calidad del agua. Tiende a aumentar como resultado de las altas temperaturas, la demanda creciente de los sectores agrícola, energético e industrial, y puede reflejar mayores extremos en las precipitaciones o vulnerabilidad a las inundaciones, así como condiciones más frecuentes de sequía (FAO, 2018). Por lo que en este estudio se realizó una

clasificación respecto al balance hídrico del año 2020 (más actual), clasificándolo en estrés hídrico bajo, medio, alto y muy alto.

4.2 Niveles Estáticos

A los datos de niveles y producción de los pozos, obtenidos en la página de la DGA, se extrajeron las coordenadas de las sondas en operación en las ciudades estudiadas. Las cuales se utilizaron para georreferenciar e identificar las sondas que estarían midiendo los niveles en los pozos estudiados. Estas se encuentran representadas en la siguiente tabla:

Tabla 10. Sondas en operación.

Ciudad	Codigo de obra	Descripción
Ovalle	204-187	NORIA 1 LOS PEÑONES
	204-190	NORIA 4 LOS PEÑONES
	204-188	NORIA 2 LOS PEÑONES
	204-189	NORIA 3 LOS PEÑONES
Chillán 1	203-070-CAPSUB-08	SONDAJE 183 A
	203-070-CAPSUB-07	SONDAJE 182 A
Chillán 2	203-070-CAPSUB-10	SONDAJE NUEVO NORTE
	203-070-CAPSUB-14	SONDAJE 1-2010
Chillán 3	203-070-CAPSUB-03	SONDAJE 1 NOR ORIENTE
	203-070-CAPSUB-04	SONDAJE 2 NOR ORIENTE
Osorno	203-CSUBS6414	Sondaje Nro 2130
	203-CSUBS6412	Sondaje 481
	203-CSUBS649	SONDAJE 482
	203-30225	SONDAJE 1168
	203-30228	SONDAJE 2083

Fuente: Dirección General de Aguas.

Luego de identificar las sondas, se analizaron los datos medidos, específicamente el nivel estático mensual. Comparando los periodos 2015 y 2020, respecto a la superficie.

4.3 Riesgos y vulnerabilidad

4.3.1 Calidad de agua

A los datos extraídos de la calidad del agua que se consume, en la página de la SISS (SISS, 2021c), se les realizó un tratamiento, con la ayuda de las herramientas Excel. Esto con el objetivo de analizar las tendencias y comportamientos que poseen los parámetros de calidad de agua de las muestras. Además de verificar el estado de los parámetros respecto a los límites estipulados en la NCh 409 (INN, 1984). Considerando un periodo de estudio de 10 años (2011-2020).

4.3.2 Uso de suelos

Con las herramientas de SIG, QGis, Google Earth Pro junto a la capa tipo vectorial shapefile (shp): Catastro uso suelo y vegetación, obtenida en la página del IDE (IDE, 2021), se analizó los cambios en el uso de suelo.

Tabla 11. Capa vectorial.

Capa de información	Fuente	Origen
Catastro uso suelo y vegetación	https://ide.cl/index.php/flora-y-fauna/item/1513-catastros-de-uso-de-suelo-y-vegetacion	Corporación Nacional Forestal

Fuente: Elaboración propia.

Luego, se determinó una la zona de influencia significativa, realizando un buffer de 500 metros respecto a las plantas de extracción, con el fin de determinar y clasificar los riesgos presentes a su al rededor.

Como este estudio se trata de pozos, se clasificó los riesgos en proporción a posibles infiltraciones de contaminantes respecto a los usos de suelo, considerando factores incidentes tanto de origen natural como antropogénicos.

Se asignó los ríos como un riesgo bajo, puesto que, aunque estos puedan arrastrar contaminantes, su superficie suele tener una buena permeabilidad. Luego, a la agricultura se le asignó un riesgo medio, producto del uso de fertilizantes y plaguicidas. Por último, a las bencineras, se le asignó un riesgo alto, debido a posibles derrames hacia la superficie.

4.3.3 Método BGR-DGA

Para aplicar este método se utilizó la metodología oficial estipulada en el Manual de la DGA (DGA, 2004). Considerando la emisión de un contaminante a nivel de la superficie en las tres ciudades estudiadas.

Considerando los alcances y limitaciones de este proyecto de habilitación profesional, se utilizó un reconocimiento en base a imágenes de Google para determinar la textura de los suelos donde están emplazados los pozos estudiados. El método Thornthwaite para determinar las recargas de los acuíferos en el sector donde están emplazados los pozos estudiados. La litología del suelo, extraída de estudios y de información entregada por la página oficial del SERNAGEOMIN (SERNAGEOMIN, 2021). Por último, el nivel

piezométrico, se estimó a partir de información extraída de niveles y pozos, presente en la página oficial de la DGA.

Con esta información se evaluó cinco parámetros, a los cuales se le asignó un puntaje de acuerdo con tablas de referencia publicadas en el Manual de la DGA. La suma de los puntajes entrega el índice de vulnerabilidad que se clasifica en los siguientes rangos: Alta, media y baja. Dichos parámetros son:

Parámetro 1: Capacidad de Campo Efectiva (Puntaje S)

La capacidad de campo efectiva se determinó siguiendo la siguiente ecuación.

$$CCE = CCEU * PS$$

Donde:

CCE: Capacidad de Campo Efectiva [mm]

CCEU: Capacidad de campo efectiva unitaria del suelo [%]

PS: Profundidad del suelo [mm]

La Capacidad de campo efectiva unitaria del suelo se determinó evaluando las texturas de los suelos en el área estudiada, dicha información se obtuvo a partir de informes técnicos oficiales, tales como el SDT N° 268. (DGA, 2008), para Ovalle, el el informe SDT N° 391 (DGA, 2016) para Chillán y el SDT N° 417 (DGA, 2018) para Osorno.

Parámetro 2: Tasa de Percolación o Recarga (Factor R)

Se determinó la recarga natural mediante el método Thornwise, utilizando los datos de precipitaciones y evapotranspiración obtenidos mediante el Atlas Agroclimático de Chile (Santibañez, 2017), luego se identificó mediante los

usos de suelo agricultura cercana (<100m), con el fin de identificar recargas artificiales.

Parámetro 3: Tipo Litológico (puntaje Ln)

La información litológica correspondiente a la zona de estudio se obtuvo a partir del mapa geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2021).

Parámetro 4: Espesor de la Zona no Saturada (Factor E)

Este parámetro hace referencia a la distancia que debe atravesar el contaminante desde la superficie del suelo (en este caso), hasta el acuífero. Esta distancia se determinó con los niveles estáticos obtenidos mediante sondajes pertenecientes a empresas sanitarias, cercanos a los pozos estudiados.

Parámetro 5: Condiciones Artesianas (puntaje extra-A)

Las condiciones o pozos artesianos y surgentes se determinaron investigando en informes técnicos oficiales respectivos. Particularmente en Ovalle, se investigó en el informe SDT N° 268 (DGA, 2008). En Chillán, el informe SDT N° 391 (DGA, 2016) .Y, en Osorno, se investigó en el informe S.D.T. N° 435 (DGA, 2021)

Determinación de la Efectividad de Protección Generalizada

Es un índice que refleja las condiciones naturales que dificultan o retardan el ingreso de contaminantes al acuífero. Este índice es inversamente proporcional a la vulnerabilidad del sistema y se calcula con las fórmulas de la siguiente tabla:

Tabla 12. Puntajes ponderados para el método BGR.

Puntaje	Descripción	Fórmula
P1	Cobertura de Suelo	$P1 = S * R$
P2	Cubierta Litológica en la Zona no Saturada	$P2 = R \times (L1E1 + L2E2 + \dots + LmEm) + A$
Pt	Cobertura del Suelo más cubierta Litológica	$Pt = P1 + P2$

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la Vulnerabilidad

La vulnerabilidad de un acuífero es inversamente proporcional a la Efectividad de Protección Generalizada, esta relación se presenta en la tabla 13 (propia del método BGR), en la cual además se presenta el tiempo de residencia aproximado en el suelo y subsuelo para cada categoría de vulnerabilidad.

Tabla 13. Clases de Efectividad Generalizada de Protección y Vulnerabilidad asociada.

Pt , número total de puntos	Efectividad generalizada de protección	Vulnerabilidad asociada, estimada, del acuífero ante emisiones	Tiempo de residencia aproximado en el suelo y subsuelo sobre el acuífero
≥ 4000	Muy alta	Baja	>25 años
2000 – 3999	Alta		10-25 años
1000 – 1999	Moderada	Media	3-10 años
500 – 999	Baja	Alta	Varios meses a 3 años
≤ 499	Muy baja		Unos pocos días a 1 año

Fuente: Manual BGR, DGA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Balance Hídrico.

5.1.1 Demanda Hídrica

El análisis de los Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA) otorgados (Tabla A1, Anexos) señaló que actualmente existen diferencias importantes en el aprovechamiento del recurso subterráneo según cada comuna. Como se logra apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 14. Caudal máximo otorgado por DAA.

Comuna	DAA Otorgados	Caudal al año 2020 (m ³ /año)
Ovalle	178*	30.779.136
Chillán	715	220.752.000
Osorno	533	215.266.944

Fuente: Elaboración propia.

(*) Pozos con coordenadas y dentro del SHAC Río Limarí.

Cabe destacar que para este estudio se consideró el caudal otorgado como demanda y no el caudal que realmente se utiliza por los titulares de estos derechos, debido a la falta de información en algunos sectores.

Respecto a la evolución del caudal otorgados en los derechos, la comuna de Osorno y Chillán han presentado fuertes alzas en la explotación de este recurso en comparación de la comuna de Ovalle. Esta condición se explica por la condición de aridez de la Región de Coquimbo. Como se logra apreciar en la siguiente figura:

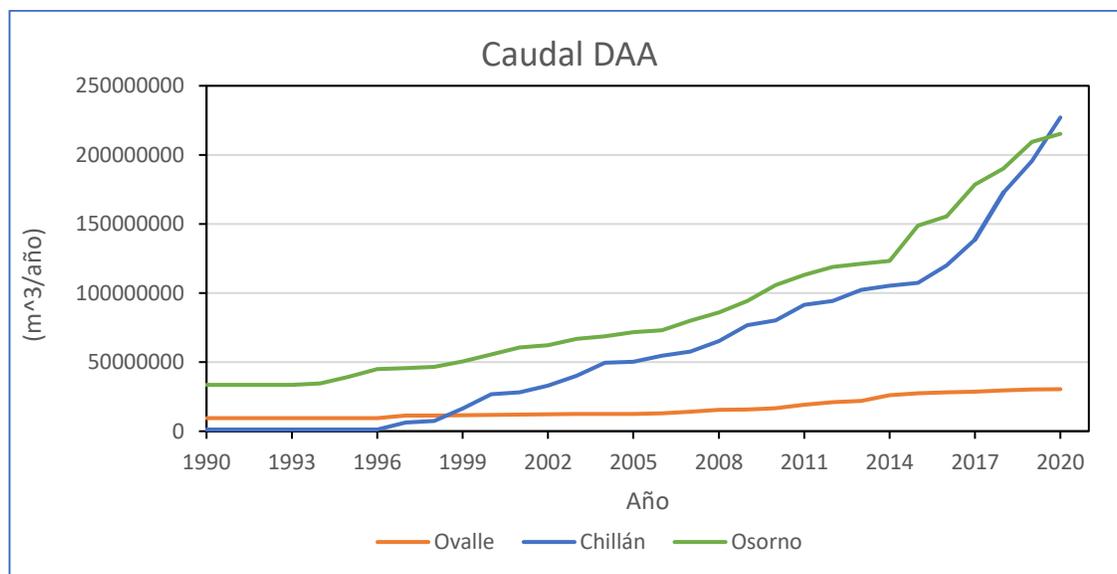


Figura 6. Evolución del caudal asociado a los DAA Otorgados. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Precipitaciones

El análisis de los datos de las precipitaciones (Tabla A2, Anexos) arrojó que la ciudad de Ovalle presenta una significativa diferencia negativa respecto a sus precipitaciones comparadas con las otras dos ciudades estudiadas, debido a que esta comuna se encuentra en la zona norte chico de Chile, zona con escasas precipitaciones. Al contrario de las otras dos ciudades, Chillán y Osorno, las cuales pertenecen a las zonas centro sur y sur respectivamente, zonas que presentan mayores precipitaciones en el año, aunque en la última década han disminuido producto de las variaciones climáticas. Como se logra apreciar en la siguiente figura:

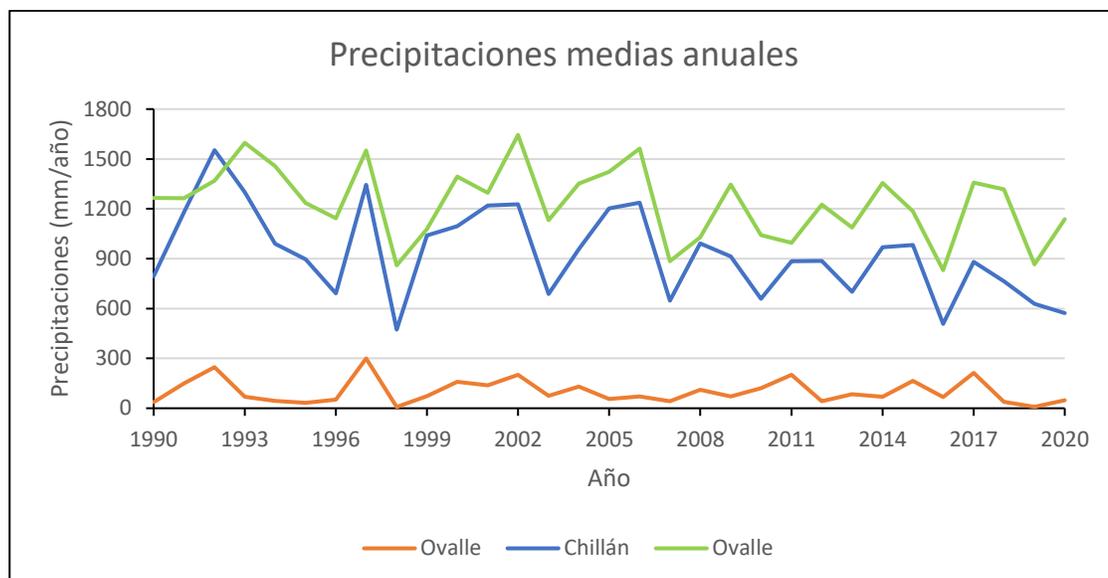


Figura 7. Precipitaciones. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 Recargas preliminares

Con los datos de las precipitaciones, del área de cada SHAC y los datos extraídos de los informes técnicos, se obtuvo las recargas preliminares (Tabla A3, Anexos). Como se logra apreciar en la siguiente figura:

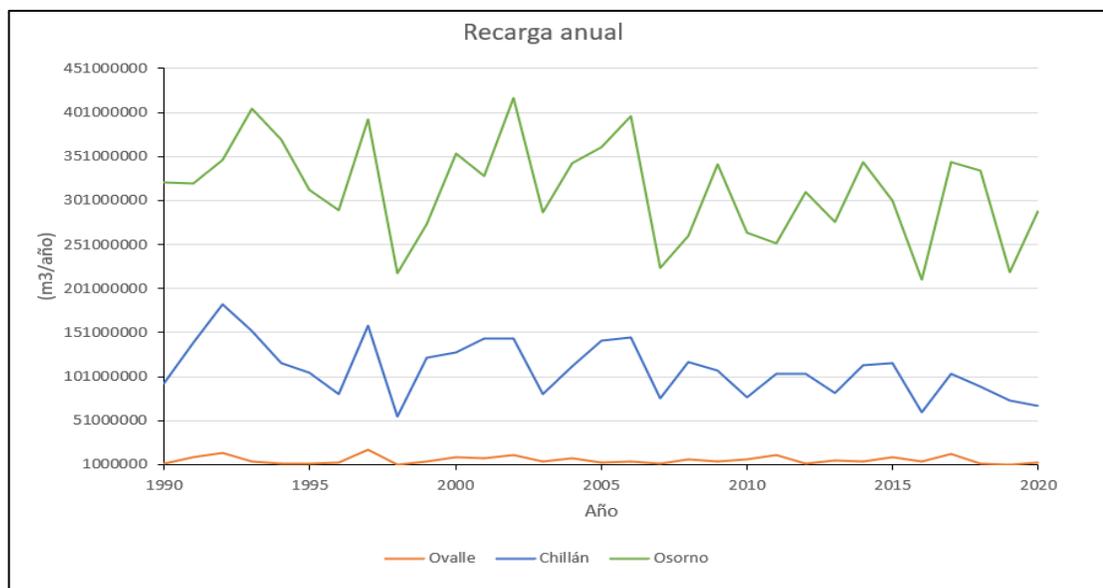


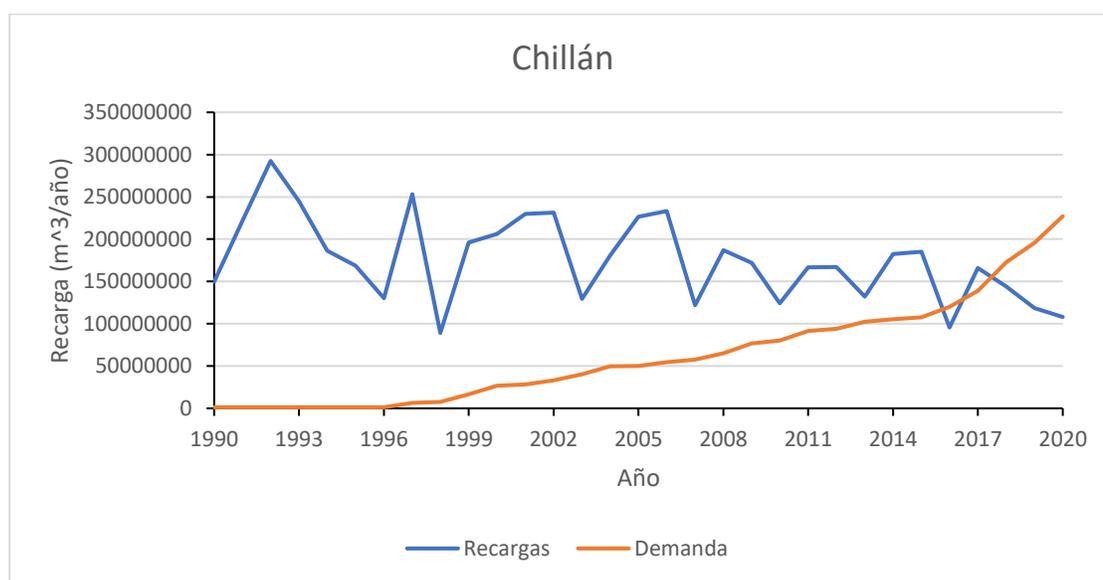
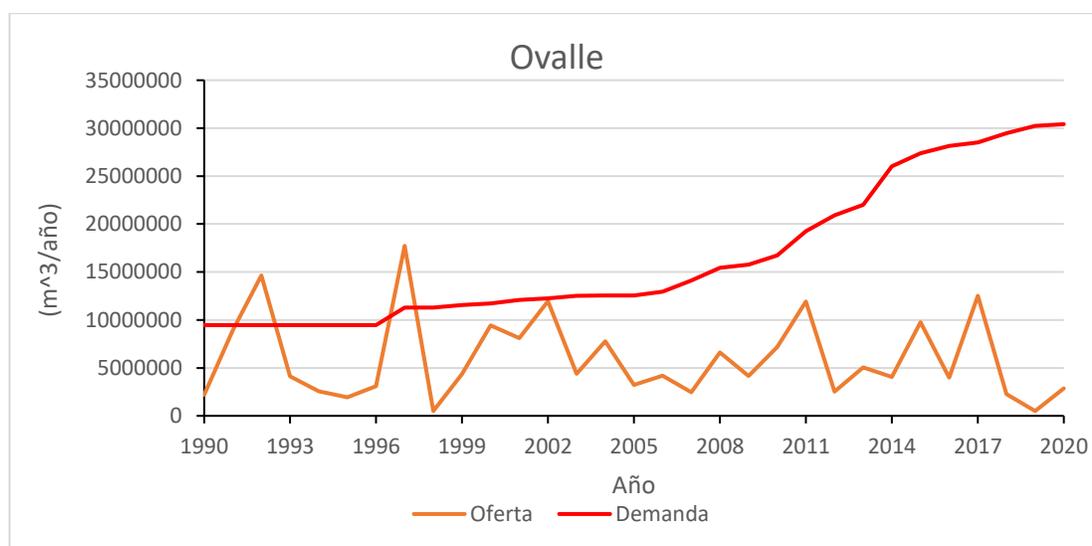
Figura 8. Recargas preliminares. Fuente: Elaboración propia

Como se logra apreciar en el gráfico anterior, existen significativas variaciones en cuanto a las recargas de los SHAC'S estudiados, esto debido a la dependencia de las precipitaciones y el área que presentan.

5.1.4 Balance hídrico

$$\text{Recarga} = \text{Demanda (DAA)}$$

Se obtuvieron los siguientes resultados:



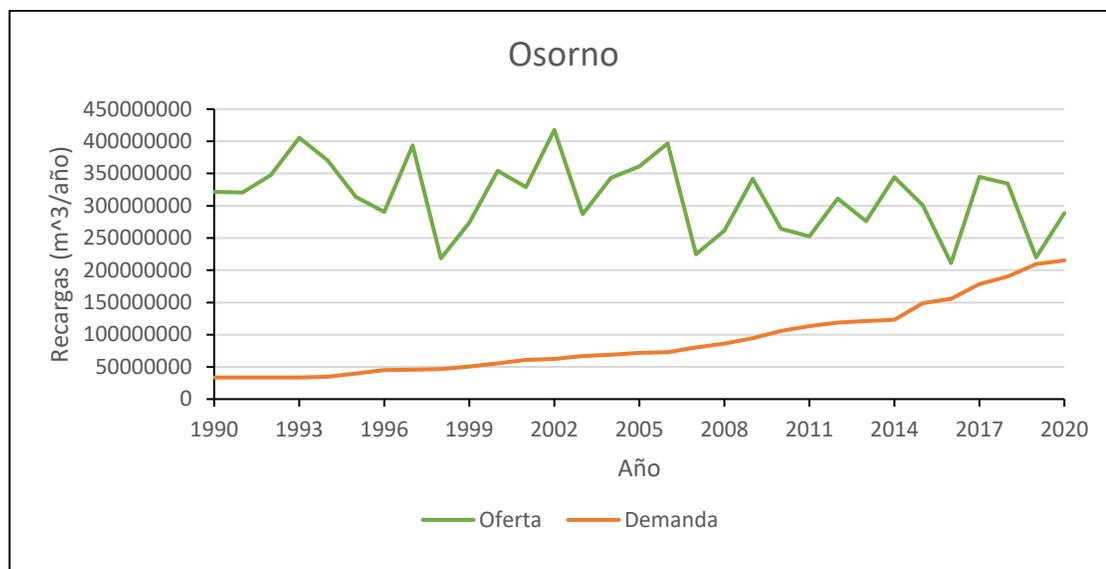


Figura 9. Balance Hídrico. Fuente: Elaboración propia

5.1.5 Estimación del estrés hídrico

Tabla 15. Niveles de Estrés Hídrico.

Ciudad	SHAC	Estrés Hídrico
Ovalle	Río Limarí	Muy alto
Chillán	Ñuble	Alto
Osorno	Rahue	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar, que las recargas estimadas en este informe serían recargas preliminares, las cuales no son exactas al cien por ciento. Además, para la demanda, se consideró un caudal máximo y constante proveniente de los pozos registrados, y solo se consideró la demanda de las comunas estudiadas.

5.2 Nivel Estático

Se extrajeron las mediciones en metros de los niveles estáticos correspondientes a los pozos o plantas de este estudio (Tabla A4, Anexos), luego se multiplicaron por -1 para representar la profundidad respecto a la superficie en los años 2015 y 2020.

5.2.1 Ovalle

En el caso de Ovalle, producto de la información disponible, se consideró el nivel estático del año 2016 y 2020. Como se logra apreciar en la figura 10, se observa una clara baja respecto al nivel estático, indicando una disminución en el nivel freático. En términos anuales, el nivel estático del año 2020 tuvo una disminución de 1,9 metros respecto del nivel estático del año 2016.

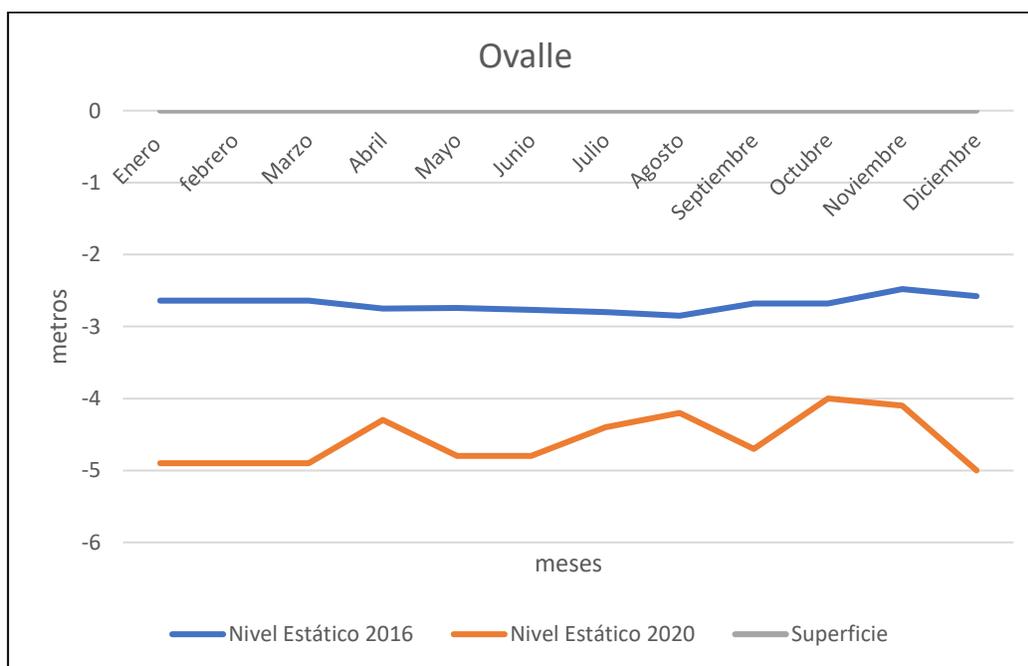
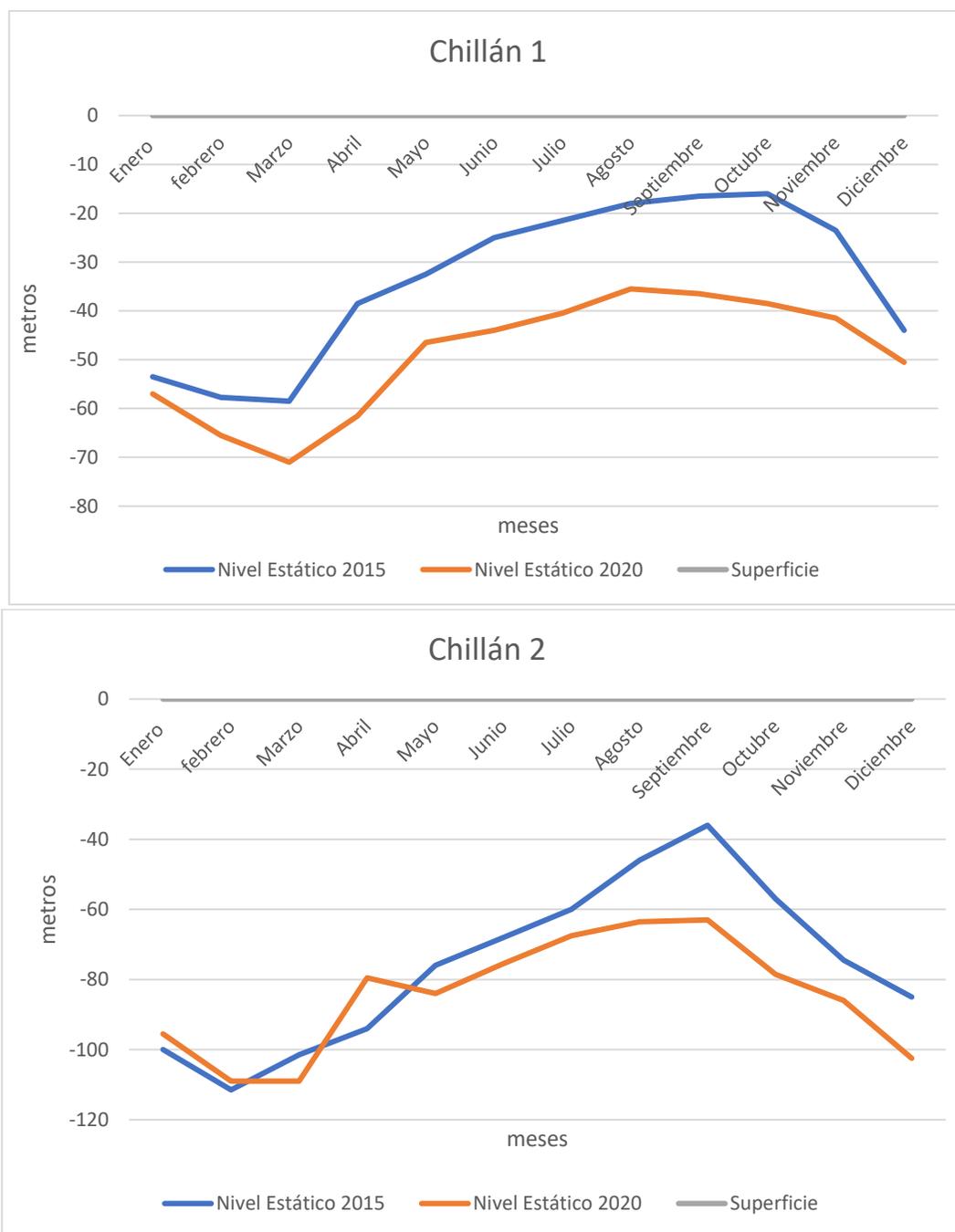


Figura 10. Evolución del nivel estático de los pozos de Ovalle. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Chillán

En Chillán, como se logra apreciar en la figura 11, se determinó que, los pozos de las tres plantas estudiadas presentaban una disminución clara en el nivel estático del año 2020 en comparación al nivel estático del año 2015.



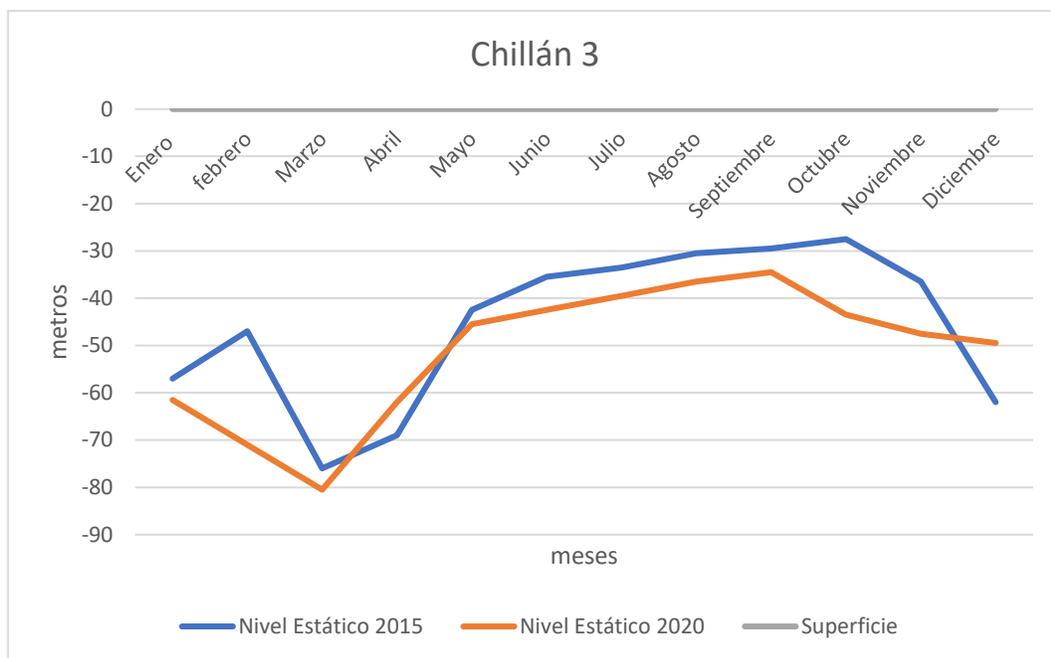


Figura 11. Evolución del nivel estático de los pozos de Chillán. Fuente: Elaboración propia

Aun cuando las tres plantas se encontraban ubicadas en la misma ciudad y a una distancia cercana, se encontraron diferencias respecto a los niveles medidos, como se logra apreciar en la figura 10, siendo la planta Chillán 1 la que presenta una mayor diferencia en comparación a las otras 2, con más de 16 metros de diferencia si se comparan los promedios anuales, siendo casi el doble de la diferencia de la planta Chillán 2, la cual presenta casi 9 metros de diferencia. En cuanto a Chillán 3, la diferencia es menor que las anteriores, con solo 5,6 metros.

5.2.3 Osorno

Respecto a Osorno, al igual que en las otras dos ciudades, se observa una clara baja respecto al nivel estático, indicando una disminución en el nivel

freático. En términos anuales, el nivel estático del año 2020 tuvo una disminución de 5,8 metros respecto del nivel estático del año 2015.

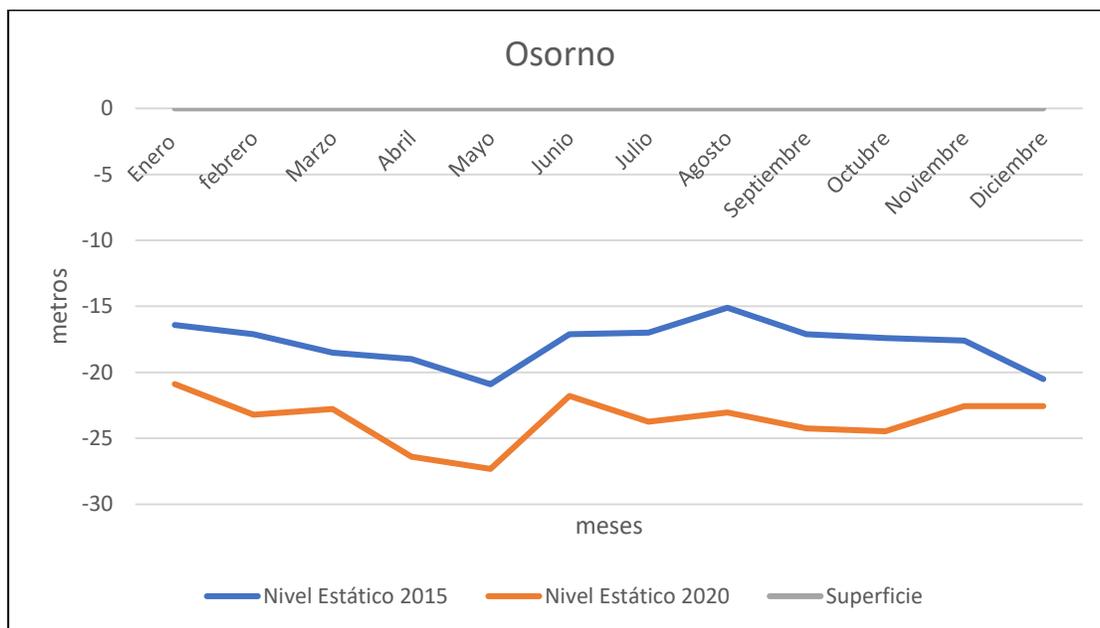


Figura 12. Evolución del nivel estático de los pozos de Osorno. Fuente: Elaboración propia

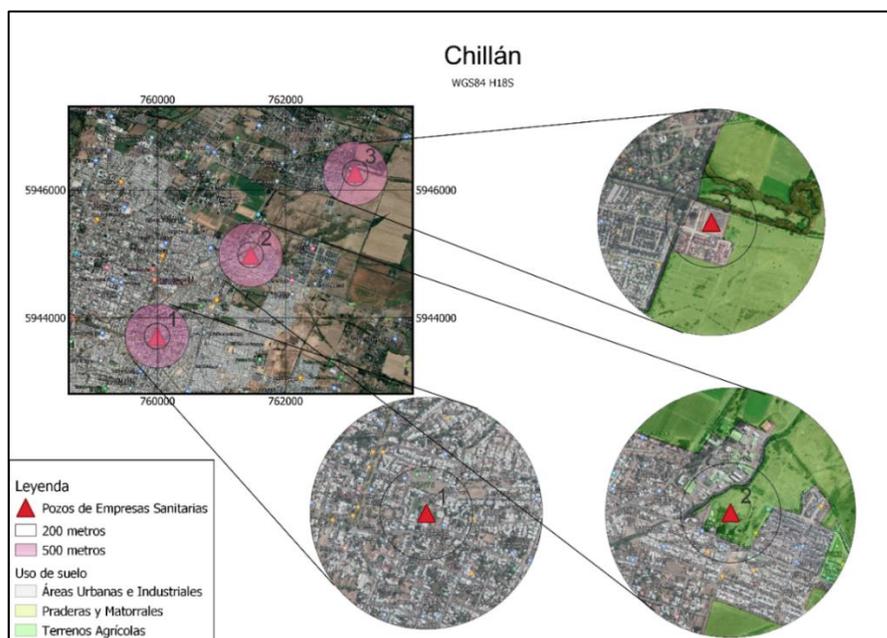
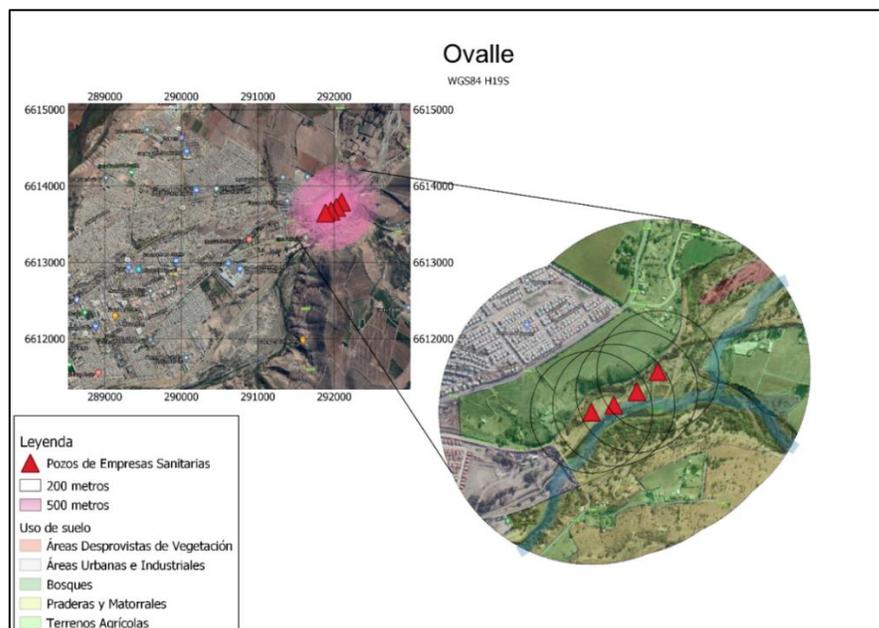
5.3 Riesgos y Vulnerabilidad

5.3.1 Calidad de agua

El análisis indicó que las tres ciudades estudiadas en términos de calidad presentan una muy buena calidad de agua potable, debido a que, dentro de los 10 años de datos de muestreo estudiados, los 43 parámetros en general estuvieron dentro de los límites que estipula la NCh 409. Esto no quiere decir que las aguas sean semejantes entre las ciudades estudiadas, puesto que existen diferencias debido al origen y los distintos procesos de tratamiento que atraviesa el líquido.

5.3.2 Uso de suelo

Con las coordenadas obtenidas de los Derechos de aprovechamiento de aguas (DAA), se logró georreferenciar los pozos de las empresas sanitarias. Luego, se le realizó el buffer de 500 metros respecto a los pozos, como se puede apreciar en la siguiente figura:



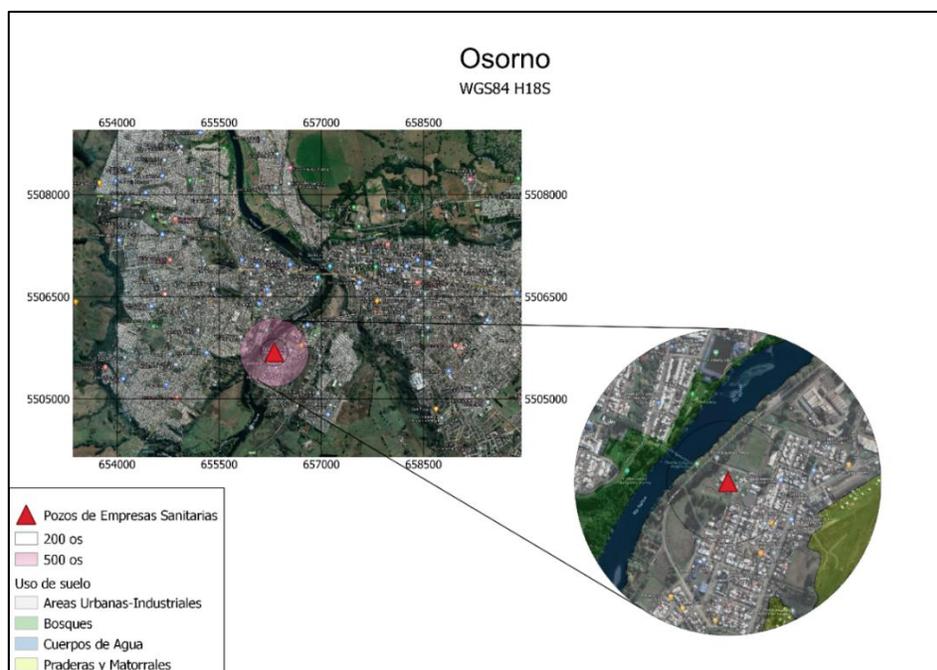


Figura 13. Zona de influencia pozos EESS. Fuente: Elaboración propia

Luego se determinó los riesgos presentes a 500 metros desde la ubicación de estas plantas, como se logra apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 16. Riesgos asociados a los pozos estudiados.

Pozos de EESS	Riesgos		
	Bajo	Medio	Alto
Ovalle	Río Limarí	-	-
Chillán 1	-	-	Copec de Av. Collín Copec Av. Argentina
Chillán 2	-	Agrícolas	-
Chillán 3	-	Agrícolas	-
Osorno	Río Rahue	-	-

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3 Método BGR-DGA

Parámetro 1: Capacidad de Campo Efectiva (Puntaje S)

Considerando una profundidad del suelo (PS) de 1 metro (1000 mm), se obtuvieron las siguientes capacidades de campo efectivas respectivas a cada planta de los pozos estudiados.

Tabla 17. Capacidad de Campo.

Pozos de EESS	CC (%)	CCE (mm)	S
Ovalle	14	140	250
Chillán 1	23	230	500
Chillán 2	23	230	500
Chillán 3	23	230	500
Osorno	30	300	750

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro 2: Tasa de Percolación o Recarga (Factor R)

Recarga artificial: Se determinó que no se producían recargas de tipo artificial.

Por lo tanto:

$$RT = RN$$

Recarga natural

Se estimó el valor de recarga utilizando el método de balance hídrico de Thorthwaite, donde se estimaron las siguientes recargas:

Tabla 18. Recargas naturales.

Pozos de EESS	Recarga (mm/año)	R
Ovalle	0	1,5
Chillán 1	210	1
Chillán 2	210	1
Chillán 3	210	1
Osorno	360	0,75

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro 3: Tipo Litológico (puntaje Ln)

A partir del mapa geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2021), se obtuvieron las siguientes litologías.

Tabla 19. Litología.

Pozos de EESS	Tipo	Ln
Ovalle	Grava arenosa	10
Chillán 1	Franco areno fino (50%) y Grava (50%)	72,5
Chillán 2	Franco areno fino (50%) y Grava (50%)	72,5
Chillán 3	Franco areno fino (50%) y Grava (50%)	72,5
Osorno	Limo arenoso con Grava	200

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro 4: Espesor de la Zona no Saturada (Factor E)

El espesor de la zona no saturada se calculó a partir de los niveles estáticos medidos por sondajes cercanos a los pozos estudiados. Se consideró el promedio de los niveles medidos en el año 2020, dando los siguientes espesores:

Tabla 20. Nivel estático.

Pozos de EESS	E
Ovalle	4,5
Chillán 1	49
Chillán 2	84
Chillán 3	51,1
Osorno	23,5

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro 5: Condiciones Artesianas (puntaje extra-A)

Luego de revisar los informes técnicos, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 21. Pozos surgentes.

Pozos de EESS	Descripción	A
Ovalle	Acuífero Libre	0
Chillán 1	Pozos Surgentes	1500
Chillán 2	Pozos Surgentes	1500
Chillán 3	Pozos Surgentes	1500
Osorno	Acuífero a nivel del río Rahue	0

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la Vulnerabilidad

Luego de obtener los parámetros, se calculó la Efectividad de Protección Generalizada, con las ecuaciones estipuladas en la tabla 12. Con este valor se determinó la vulnerabilidad, comparándolo con la tabla 13, propia del manual BGR (DGA, 2004). Los resultados son representados en la siguiente tabla:

Tabla 22. Vulnerabilidad.

Pozos de EESS	P1	P2	Pt	Vulnerabilidad
Ovalle	375	67,5	442,5	Alta
Chillán 1	500	5052,5	5552,5	Baja
Chillán 2	500	7590	8090	Baja
Chillán 3	500	5204,75	5704,75	Baja
Osorno	562,5	3525	4087,5	Baja

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se estimó que, el SHAC Rahue, asociado a la ciudad de Osorno, producto de altas precipitaciones, presenta un bajo estrés hídrico, contrario al caso del SHAC Río Limarí, asociado a la ciudad de Ovalle, que producto a casi nulas precipitaciones en la zona donde se ubica (Norte Chico), presenta un estrés muy alto. En cuanto al SHAC Ñuble, asociado a la ciudad de Chillán, presenta un estrés alto, y se logra apreciar una fuerte disminución en términos de recarga la última década, esto a la par que aumentan en gran cantidad los Derechos de Aprovechamiento de Agua otorgados.

El análisis de la evolución de los niveles estáticos arrojó que existe una disminución en el nivel freático del año 2020 en comparación al del año 2015, al menos en la zona donde se ubican los pozos de este estudio. Las bajas se podrían asociar a factores incidentes tanto naturales, producto de la disminución en las precipitaciones en la última década, como antropogénicos, producto del aumento en el número de pozos en el tiempo.

El análisis de riesgos y vulnerabilidad arrojó que las tres ciudades presentaban una muy buena calidad del agua potable. Además, indicó que todos los pozos de este estudio presentaban diversos riesgos a su alrededor en un radio de 500 metros. En términos de vulnerabilidad, el análisis BGR-DGA dio como resultado que los pozos de la ciudad de Ovalle presentan una alta

vulnerabilidad, en comparación a los pozos estudiados de las ciudades de Chillán y Osorno, ya que ambas presentan una baja vulnerabilidad. Los principales factores que incidieron en estos resultados fueron la profundidad del nivel freático y la concentración de materia orgánica en los suelos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arumí, J.L. 2007. Estudio de vulnerabilidad de aguas subterráneas Planta Masisa. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola. Departamento de Recursos Hídricos. Chillán, Chile.
2. Comisión Nacional de Riego. 2021. Derechos de aprovechamiento de aguas [en línea]. Comisión Nacional de Riego, Chile. <<https://www.cnr.gob.cl/agricultores/infraestructura/gestion/derechos-de-aprovechamiento-de-aguas/>>. [Consulta: 16 noviembre 2021].
3. Corporación Autónoma Regional del Cesar. 2009. Guía para el monitoreo de aguas subterráneas. Corpocesar. Cesar, Colombia.
4. Decreto N°203. Aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas. Diario Oficial de la República de Chile. 07 marzo 2014. Santiago, Chile.
5. DGA (Chile). 2004. Manual para la aplicación del concepto de vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46 de 2002. Dirección General de Aguas. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Santiago, Chile.
6. DGA (Chile). 2008. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del Río Limarí. Informe técnico. SDT N°268. Dirección General de Aguas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago, Chile.

7. DGA (Chile). 2014. Estimación preliminar de las recargas de agua subterránea y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. Informe técnico. DARH SDT N°359. Dirección General de Aguas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago, Chile
8. DGA (Chile). 2015. Delimitación del acuífero del Río Ñuble bajo y determinación de la recarga. Informe técnico. SDT N°379. Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile.
9. DGA (Chile). 2016. Sistematización de información hidrogeológica para un futuro plan de gestión de recursos hídricos en cuencas de la Región del Biobío. Informe técnico. SDT N° 391. Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile.
10. DGA (Chile). 2018. Sectorización y determinación de oferta hídrica del acuífero del Río Bueno. Informe técnico. SDT N°417. Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile.
11. DGA (Chile). 2021a. Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA [en línea]. Dirección General de Aguas, Chile. <https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx>. [Consulta: 22 octubre 2021].
12. DGA (Chile). 2021b. Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Los Lagos. Informe técnico. SDT N°435. Dirección

- General de Aguas. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Santiago, Chile.
13. DGA (Chile). 2021c. Mapoteca digital [en línea]. Dirección General de Aguas, Chile.
<<https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>>. [Consulta: 27 octubre 2021].
 14. DGAC (Chile). 2021. Reporte anual de la evolución del clima en Chile 2020. Dirección General de Aeronáutica Civil. Santiago, Chile.
 15. FAO (Italia). 2018. Anticiparse a los problemas hídricos puede aliviar la presión migratoria [en línea]. FAO, Italia.
<<https://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/1109667/>>. [Consulta: 15 diciembre 2021].
 16. Flores, C., M. Aliaga. 2020. Diagnóstico del estado hidrogeológico de la Cuenca del Limarí. Informe técnico. SDT N°427. Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile.
 17. IDE (Chile). 2021. Información territorial [en línea]. IDE, Chile.
<<https://www.ide.cl/index.php/informacion-territorial/descargar-informacion-territorial>>. [Consulta: 26 octubre 2021].
 18. INN (Chile). 1984. Agua potable. NCh409/1.Of.2005. Santiago, Chile.
 19. Pernía, J.M., J.M. Fornés. 2009. Cambio climático y agua subterránea. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra 17(2): 172-178.
 20. Santibáñez, F. 2017. Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo IV: Regiones del Biobío y de La Araucanía.

Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. FIA. Santiago, Chile.

21. SERNAGEOMIN (Chile). 2021. Portal GEOMIN [en línea]. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile. <<https://portalgeominbeta.sernageomin.cl/>>. [Consulta: 26 octubre 2021].
22. SISS (Chile). 2021a. Calidad del agua potable [en línea]. Superintendencia de Servicios Sanitarios, Chile. <<https://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6405.html>>. [Consulta: 18 octubre 2021].
23. SISS (Chile). 2021b. Informe de gestión del sector sanitario 2020. Superintendencia de Servicios Sanitarios. Santiago, Chile.
24. SISS (Chile). 2021c. SISS Superintendencia de Servicios Sanitarios [en línea]. SISS, Chile. <<https://siss.gob.cl>>. [Consulta: 15 noviembre 2021].
25. SMA (Chile). 2021. Normas de emisión [en línea]. Superintendencia del Medio Ambiente, Chile. <<https://portal.sma.gob.cl/index.php/portal-regulados/instructivos-y-guias/normas-de-emision/#:~:text=El%20decreto%20Supremo%20N>>. [Consulta: 11 noviembre 2021].

ANEXOS.

Tabla A1. Caudal otorgado por los DAA.

Año	Ovalle (m ³ /año)	Chillán (m ³ /año)	Osorno (m ³ /año)
1990	9460800	1223596,8	33547996,8
1991	9460800	1223596,8	33547996,8
1992	9460800	1223596,8	33547996,8
1993	9460800	1223596,8	33547996,8
1994	9460800	1223596,8	34651756,8
1995	9460800	1223596,8	39539836,8
1996	9460800	1223596,8	44938800
1997	11274120	6379732,8	45569520
1998	11274120	7382577,6	46566057,6
1999	11542176	16464567,2	50508057,6
2000	11731392	26786300	55642118,4
2001	12094056	28205420	60732028,8
2002	12267504	33025697,6	62141688
2003	12519792	40158194,7	66799555,2
2004	12551328	49632870,5	68691715,2
2005	12551328	50210925,4	71794258,4
2006	12961296	54672638,7	72983165,6
2007	14096592	57526646,7	79958928,8
2008	15452640	65128399,5	85888642,9
2009	15768000	76809333,9	94328622,6
2010	16736605,7	80259372,3	105783486
2011	19248222,9	91426585,2	113020998
2012	20916252	94186300,6	118785779
2013	22002341	102379325	121152871
2014	26010442,3	105329833	123227940
2015	27390449,5	107489734	148778934
2016	28130112	120129993	155468508
2017	28516428	138729926	178440907
2018	29486160	172638064	189995697
2019	30227256	195675112	209483368
2020	30416472	227076895	215235535

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2. Precipitaciones anuales.

Año	Ovalle (mm/año)	Chillán (mm/año)	Osorno (mm/año)
1990	37	794,5	1265,8
1991	150,2	1178,5	1262,9
1992	247,4	1552,7	1368,3
1993	69,8	1299,8	1596,1
1994	43,3	989,6	1457,9
1995	32,5	895,6	1234,7
1996	52,4	691,8	1143,8
1997	299,7	1343,2	1550,2
1998	8,6	473,1	859
1999	73,8	1040,2	1077,5
2000	159,3	1095,2	1394,2
2001	137,2	1219,5	1295,8
2002	202,1	1227,8	1644,5
2003	74	687,3	1130,9
2004	131,2	957,9	1351,9
2005	54,8	1203	1422,7
2006	70,8	1237,7	1562,6
2007	41,7	646,6	885,4
2008	112	992,3	1028,1
2009	70,4	913,7	1345,6
2010	121,2	659,3	1041,3
2011	201,6	884,7	994,7
2012	42,8	886,5	1225
2013	85,2	700,4	1088,2
2014	68,5	968,9	1356,1
2015	165	982	1185,4
2016	67,2	508	830,7
2017	211,8	881,4	1358
2018	38,1	764,7	1316,4
2019	8,5	628,4	865
2020	48,4	572,5	1136,6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A3. Recargas preliminares por año.

Año	Ovalle (m ³ /año)	Chillán (m ³ /año)	Osorno (m ³ /año)
1990	2188712,8	93552375	321449910
1991	8884990,9	138768375	320713455
1992	14634799	182830425	347479785
1993	4128977,1	153051450	405329595
1994	2561385,5	116525400	370233705
1995	1922518	105456900	313552065
1996	3099690,6	81459450	290468010
1997	17728574	158161800	393673290
1998	508727,84	55707525	218143050
1999	4365594,7	122483550	273631125
2000	9423295,9	128959800	354057090
2001	8115983,7	143596125	329068410
2002	11955104	144573450	417620775
2003	4377425,6	80929575	287192055
2004	7761057,3	112792725	343315005
2005	3241661,1	141653250	361294665
2006	4188131,5	145739175	396822270
2007	2466738,5	76137150	224847330
2008	6625292,8	116843325	261085995
2009	4164469,8	107588175	341715120
2010	7169513,3	77632575	264438135
2011	11925527	104173425	252604065
2012	2531808,3	104385375	311088750
2013	5039954,9	82472100	276348390
2014	4052076,4	114087975	344381595
2015	9760476	115630500	301032330
2016	3975175,7	59817000	210956265
2017	12528902	103784850	344864100
2018	2253782,6	90043425	334299780
2019	502812,4	73994100	219666750
2020	2863073	67411875	288639570

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A4. Niveles estáticos anuales.

Ovalle	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Enero	-	2,64	2,39	2,32	4,5	4,9
Febrero	-	2,64	2,4	3,34	4,5	4,9
Marzo	-	2,64	2,71	3,34	4,5	4,9
Abril	-	2,75	2,71	3,37	4,5	4,3
Mayo	-	2,74	2,71	3,37	4,9	4,8
Junio	-	4,33	2,58	3,37	4,9	4,8
Julio	-	2,8	1,6	3,32	5	4,4
Agosto	-	2,85	2,6	5,1	5	4,2
Septiembre	-	2,68	2,69	5,1	5,2	4,7
Octubre	-	2,68	2,4	5,1	4,8	4
Noviembre	-	2,48	2,4	5,1	4,8	4,1
Diciembre	-	2,58	2,12	5,1	5,5	5
Chillán 1	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Enero	53,5	61	61	37	53	57
Febrero	57,75	70	55	56	53	65,5
Marzo	58,5	63	54	41	59	71
Abril	38,5	38	46	45	45	61,5
Mayo	32,5	37	31	33	42	46,5
Junio	25	27	27	31	36	44
Julio	21,5	22	25	26	32	40,5
Agosto	18	18	22	24	27	35,5
Septiembre	16,5	18	22	24	27	36,5
Octubre	16	21	17	21	29	38,5
Noviembre	23,5	24	30	22	31	41,5
Diciembre	44	34	28	37	40	50,5
Chillán 2	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Enero	100	109	61	102	95	95,5
Febrero	111,5	108	55	103	109	109
Marzo	101,5	109	54	97	88	109
Abril	94	106	46	85	95	79,5
Mayo	76	74	31	70	72	84
Junio	68	46	27	68	69	75,5
Julio	60	40	25	69	60	67,5
Agosto	46	36	22	62	51	63,5
Septiembre	36	41	22	49	55	63

Octubre	57	52	17	54	62	78,5
Noviembre	74,5	65	30	63	72	86
Diciembre	85	74	28	78	81	102,5
Chillán 3	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Enero	57	68	63	42	48	61,5
Febrero	47	69	65	61	52	71
Marzo	76	61	60	59	50	80,5
Abril	69	45	51	38	50	62
Mayo	42,5	42	40	36	41	45,5
Junio	35,5	39	35	34	36	42,5
Julio	33,5	35	32	33	32	39,5
Agosto	30,5	31	33	28	32	36,5
Septiembre	29,5	34	28	29	33	34,5
Octubre	27,5	38	28	29	30	43,5
Noviembre	36,5	50	32	37	46	47,5
Diciembre	62	54	44	39	50	49,5
Osorno	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Enero	16,4	24,5	17,2	24,0	16,7	20,9
Febrero	17,1	25,6	18,9	25,2	18,4	23,2
Marzo	18,5	25,1	17,3	23,6	17,7	22,8
Abril	19	25,5	18,3	20,8	17,6	26,4
Mayo	20,9	25,7	16,1	23,2	18,0	27,3
Junio	17,1	19,0	16,3	22,1	17,5	21,8
Julio	17	21,1	12,9	16,4	16,7	23,8
Agosto	15,1	15,5	13,1	15,5	17,4	23,1
Septiembre	17,1	14,5	12,8	16,4	19,5	24,3
Octubre	17,4	15,2	17,3	15,6	19,4	24,5
Noviembre	17,6	15,7	21,1	15,0	19,2	22,6
Diciembre	20,5	15,6	20,9	16,7	19,3	22,6

Fuente: Elaboración propia.