



Gobierno  
de Chile

**GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

# **INVESTIGACIÓN DE ACUÍFEROS DE GRAN VOLUMEN Y BAJO NIVEL DE RECARGA EN LA ZONA NORTE**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR:**

HÍDRICA CONSULTORES SPA

**S.I.T. N° 418**

**Santiago, Agosto 2017**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas  
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación  
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspectora Fiscal  
Ingeniera Agrícola Pamela García Serrano

### HÍDRICA CONSULTORES SPA

Jefe de Proyecto  
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

#### Profesionales

Ingeniero Civil Julio Faúndes S.  
Ingeniero Civil Felipe Orellana M.  
Geólogo Paolo Bevacqua  
Ingeniero Civil Juan Carlos Parra  
Ingeniero Civil Sergio Duarte M.  
Ingeniera Agrónoma Irene Bernaus L.  
Ingeniero Civil Darío Vargas G.  
Cartógrafo Salomón Vielma P.

---

# CONTENIDO

---

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	GENERAL	1
1.2	OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS	1
CAPÍTULO 2	REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	2
CAPÍTULO 3	TRABAJOS DE TERRENO	3
3.1	CALICATAS	3
3.2	SONDAJE	3
3.3	GEOFÍSICA	5
CAPÍTULO 4	CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE ACUÍFEROS-GVBR	7
4.1	SELECCIÓN DE ACUÍFEROS	7
4.2	IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS	7
4.3	PRIORIZACIÓN	8
4.4	PESOS ASIGNADOS A CADA CRITERIO	8
CAPÍTULO 5	IDENTIFICACIÓN DE ACUÍFEROS-GVBR	9
CAPÍTULO 6	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SUSTENTABILIDAD	10
6.1	BASES CONCEPTUALES	10
6.2	GENERALIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA SUSTENTABILIDAD	11
CAPÍTULO 7	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SUSTENTABILIDAD EN PAMPA DEL TAMARUGAL	14
7.1	MODELO CONCEPTUAL	14
	Unidades Hidrogeológicas	14
	Geometría del Acuífero	15
	Flujos Subterráneos	15
7.2	MODELO NUMÉRICO	18

7.3	APLICACIÓN A LA METODOLOGÍA	22
b)	Verificación de Restricciones en Condiciones Naturales (CNP)	22
c)	Verificación de Sustentabilidad de Flujo en Situación Actual (CAT)	23
d)	Verificación de Restricciones en Condición Actual (CAT)	25
e)	Verificación de Sustentabilidad de Flujo en Modelo de Previsión o Pronóstico (CFT)	25
f)	Verificación de Sustentabilidad de Flujo en Escenarios (CFT)	26
h)	Determinación de Explotación que Cumpla Restricciones	29
i)	Verificación de Sustentabilidad de Flujo Modelo CFT que cumple Restricciones	29
j)	Comparación Cálculo de Volumen de Explotación según Criterio DGA Actual y la Metodología Propuesta.	30
k)	Brechas	32
CAPÍTULO 8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
A.	CRITERIOS Y DEFINICIÓN DE ACUIFEROS-GVBR	35
B.	TRABAJOS DE TERRENO	35
C.	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR SUSTENTABILIDAD	36
D.	MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL	37
E.	APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE SUSTENTABILIDAD	40
F.	COMENTARIOS GENERALES	43

---

## CUADROS

---

Cuadro 3-1	Ubicación Sondaje .....	3
Cuadro 4-1	Resumen de Criterios Utilizados .....	8
Cuadro 4-2	Priorización de Criterios .....	8
Cuadro 4-3	Ponderación en Criterios .....	8
Cuadro 7-1	Balance Hídrico Flujos Modelo Permanente (CNP) (l/s) .....	20
Cuadro 7-2	Balance Hídrico Flujos Medios Modelo Transiente (CAT) .....	21
Cuadro 7-3	Balance Hídrico Año 2016 Modelo Transiente (CAT) .....	21
Cuadro 7-4	Restricciones Identificadas en Pampa del Tamarugal .....	22
Cuadro 7-5	Volumen Modelado de Desembalse Acuífero Pampa del Tamarugal (Mm <sup>3</sup> ) ...	31
Cuadro 7-6	Resumen Volumen Extraído en Pampa del Tamarugal en Estudios (Mm <sup>3</sup> ) .....	32

---

## FIGURAS

---

Figura 3-1	Campaña de Terreno - Distribución de Calicatas y Ubicación Sondaje.....	4
Figura 3-2	Distribución de Estaciones TEM y Gravimétricas .....	6
Figura 5-1	Jerarquía por Peso – Ajuste Logarítmico de Tendencia .....	9
Figura 6-1	Diagrama de Flujo para Determinación de Explotación Sustentable.....	13
Figura 7-1	Unidades Hidrogeológicas Identificadas en la Pampa del Tamarugal .....	16
Figura 7-2	Conceptualización de Condiciones de Borde .....	17
Figura 7-3	Resultados Gráficos del Modelo Numérico.....	20
Figura 7-4	Profundidad Nivel Freático en Modelo CNP – Plantaciones y Salar .....	23
Figura 7-5	Variación de Almacenamiento y Bombeo en Periodo 1960-2016 .....	24
Figura 7-6	Estaciones de Monitoreo Niveles Freáticos y Sectores Propuestos para Nuevos Piezómetros .....	34

---

# CAPÍTULO 1      INTRODUCCIÓN

---

## 1.1    GENERAL

El desarrollo y aplicación de una metodología para establecer la sustentabilidad de acuíferos es en sí complejo, no solo desde el punto de vista técnico, sino que más bien por los diferentes intereses involucrados, que en muchos casos son contrapuestos. En efecto, las condiciones que deben ser consideradas involucran aspectos hidrogeológicos, ambientales, sociales, desarrollo económico y de cambio climático.

Asimismo, el estudio consideró la aplicación de la propuesta metodológica a la Pampa del Tamarugal, la cuenca endorreica más grande de Chile. Este sistema hídrico se caracteriza por tener un gran volumen del almacenamiento subterráneo el cual es recargado en zonas muy localizadas durante algunos meses del año.

## 1.2    OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

El objetivo general del estudio fue la definición e identificación de los acuíferos de gran volumen y bajo nivel de recarga en la zona norte de Chile (en adelante *acuíferos-GVBR*). Además, se consideró una investigación sobre los mecanismos de recarga y descarga en la Pampa del Tamarugal. Bajo este objetivo general, se tienen además los siguientes:

- Definir en detalle el concepto "acuíferos de gran volumen embalsado y bajo nivel de recarga" e identificar la presencia de estos sistemas en el norte del país.
- Establecer una metodología de análisis para evaluar/determinar el volumen a extraer, bajo condiciones que garanticen la sustentabilidad del acuífero en el tiempo.
- Adicionalmente, abordar la modelación numérica o analítica preliminar para la Pampa del Tamarugal, con la cual aplicar la nueva metodología de sustentabilidad.

---

## **CAPÍTULO 2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES**

---

La recopilación y revisión de antecedentes se enfocó principalmente en los siguientes aspectos:

- Información sobre criterios utilizados para la definición de acuíferos de gran volumen y bajo nivel de recarga.
- Antecedentes metodológicos relacionados con la sustentabilidad de acuíferos.
- Información asociada a la Pampa del Tamarugal para caracterizar la hidrogeología y funcionamiento hidrológico.
- Información hidrogeológica sobre acuíferos desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Coquimbo para la determinación de los acuíferos de gran volumen y bajo nivel de recarga

La información obtenida se refiere a dos tópicos: uno metodológico referente al desarrollo del criterio para la definición de acuíferos-GVBR y otro asociado a los aspectos hidrogeológicos y de usos del recurso hídrico. La revisión de antecedentes quedó plasmada mediante fichas resúmenes de cada documento.

Adicionalmente, se recopiló información asociada a niveles de pozos de la Red de Medición de Niveles de la DGA y derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas registrados en el CPA de la DGA.



---

## CAPÍTULO 3 TRABAJOS DE TERRENO

---

Los trabajos de terreno consideraron la ejecución de 50 calicatas de una profundidad de 3 metros, perforación de un sondaje de 100 metros lineales de profundidad, y una campaña geofísica con medición de 270 estaciones TEM distribuidas en 9 perfiles, en donde en 3 adicionalmente se realizaron mediciones de gravimetría

### 3.1 CALICATAS

Gran parte de la recarga al acuífero de la Pampa del Tamarugal proviene de las quebradas afluentes, flujos que se incorporan al acuífero de manera subsuperficial y/o subterránea, o a través de la infiltración en la zona de los abanicos fluviales. Esto último ocurre en casos de crecidas cuando el caudal de las quebradas responde a eventos de alta precipitación (especialmente en el invierno altiplánico). Con la finalidad de caracterizar el volumen aportado al acuífero a través de este medio, se construyeron 50 calicatas de una profundidad de 3 metros distribuidas en la zona de abanicos fluviales de las principales quebradas afluentes a la pampa, sobre las cuales se realizaron ensayos de infiltración in-situ por medio del método del doble anillo. La Figura 3-1 presenta su distribución de manera gráfica de acuerdo a la agrupación dada.

### 3.2 SONDAJE

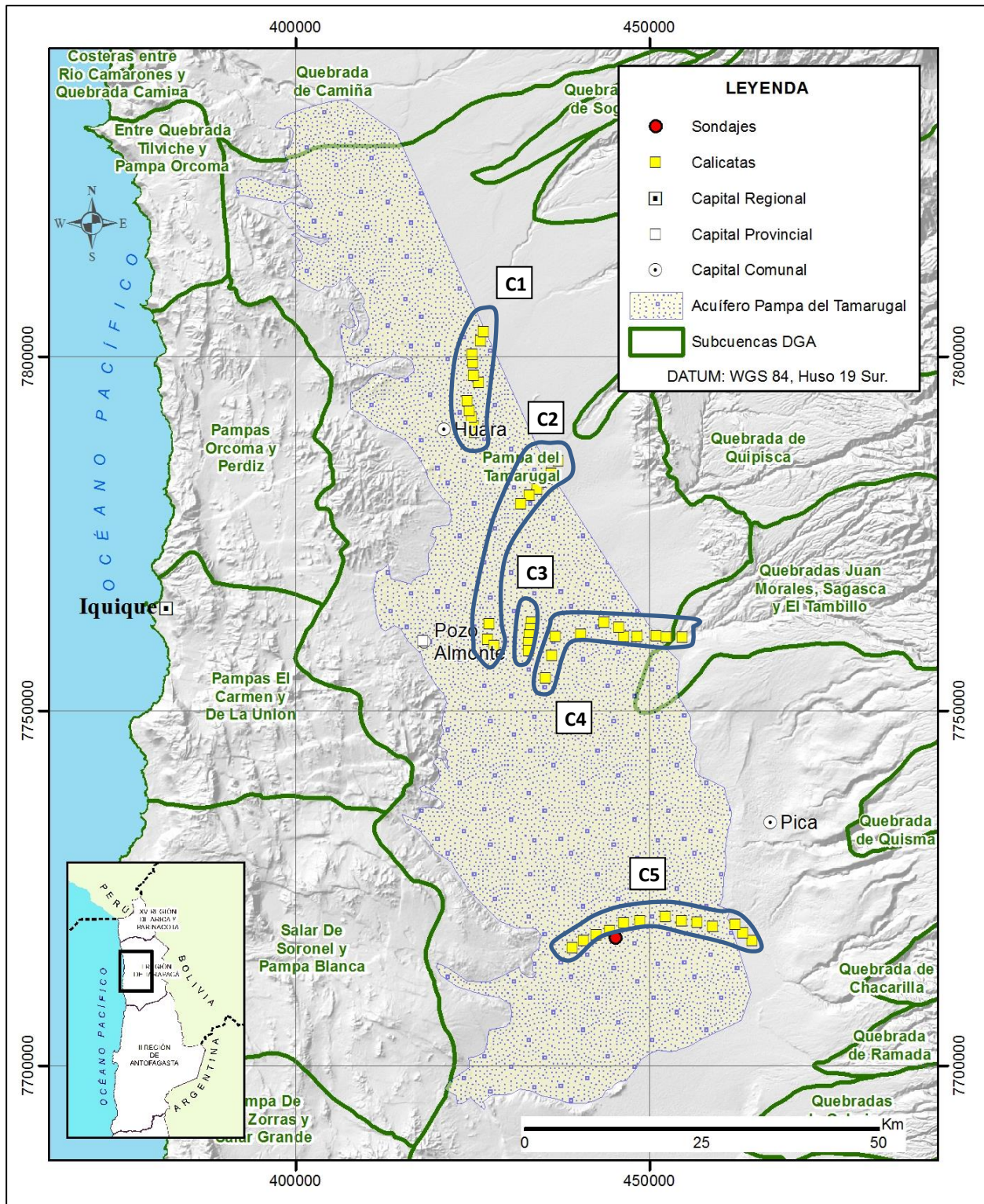
La campaña en terreno consideró la perforación de un sondaje de 100 metros de profundidad en diámetro HQ en el sector de la quebrada Chacarillas. Las coordenadas del sondaje corresponden a las que presenta el Cuadro 3-1 y presentadas de manera gráfica en la Figura 3-1. Además, se realizaron pruebas de infiltración del tipo Lefranc. Una vez finalizada la perforación del sondaje, fue habilitado como piezómetro de monitoreo.

**Cuadro 3-1 Ubicación Sondaje**

Código	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Cota (m s.n.m.)
SD-01	7.718.981	443.541	991

Nota: Datum WGS84 Huso 19S.

Fuente: Elaboración propia.



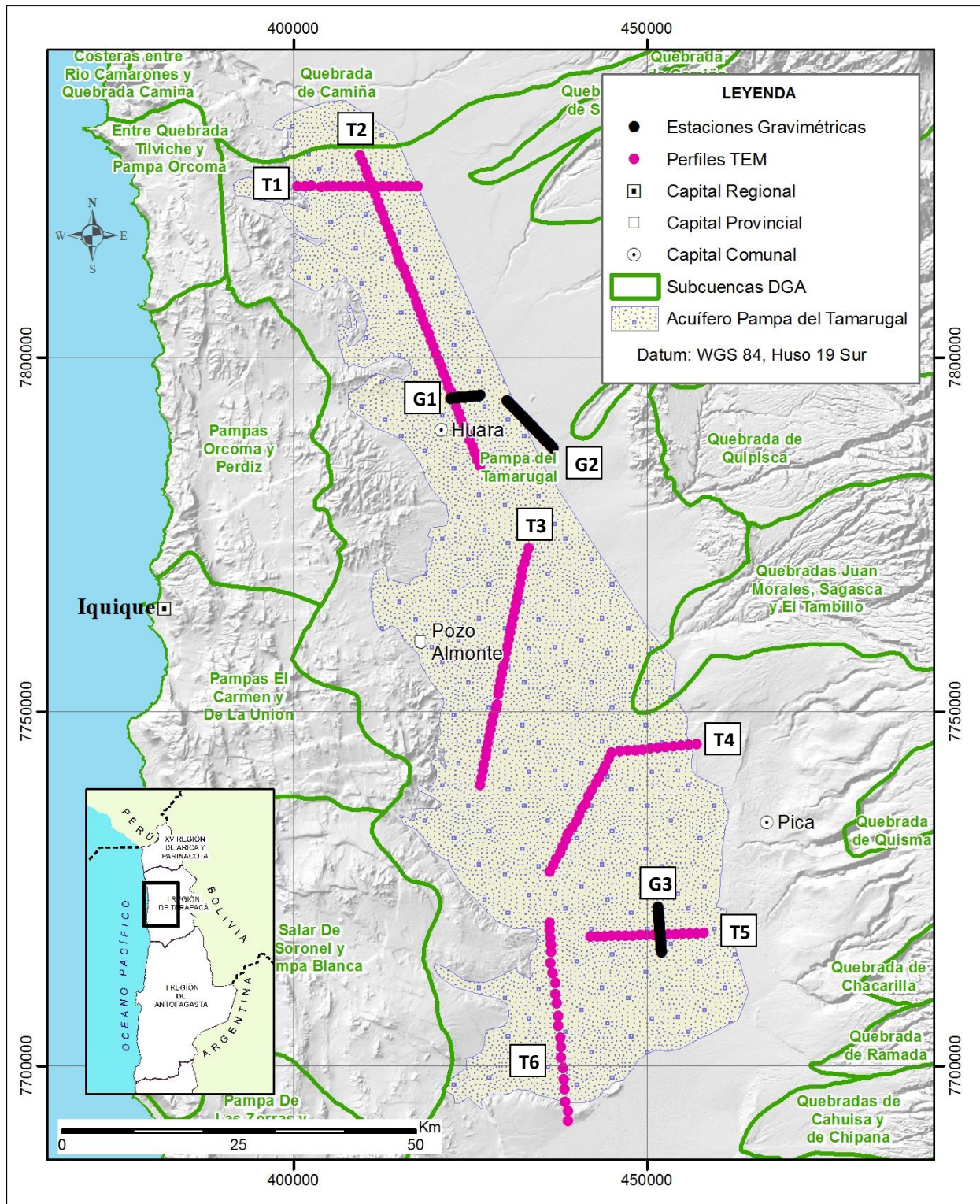
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-1 Campaña de Terreno - Distribución de Calicatas y Ubicación Sondaje**

### **3.3 GEOFÍSICA**

Se realizó un estudio geofísico en la cuenca de la Pampa del Tamarugal para determinar las unidades hidrogeológicas mediante Transiente Electromagnético (TEM), y la profundidad que alcanza el basamento, mediante gravimetría. Se midieron 270 estaciones TEM distribuidas en 9 perfiles, con espaciamiento de 1.000 metros en 6 de ellos y de 200 en los restantes. En estos últimos, adicionalmente se realizaron mediciones de gravimetría. La distribución de los perfiles se realizó tomando en consideración los antecedentes revisados y las zonas que pudieran señalarse con mayor incertidumbre para la construcción del modelo numérico. Su distribución espacial se indica en la Figura 3-2.





Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-2 Distribución de Estaciones TEM y Gravimétricas**

---

## **CAPÍTULO 4 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE ACUÍFEROS-GVBR**

---

Se estudiaron los acuíferos ubicados en el norte de Chile, sobre los que se aplicó la metodología de identificación de acuíferos-GVBR como se detalla en los acápite siguientes.

### **4.1 SELECCIÓN DE ACUÍFEROS**

Se generó un listado de los acuíferos ubicados entre la XV y IV región de Chile, considerando como información base la clasificación de acuíferos definida por la DGA en los documentos DGA (2016) y DGA (2016b), obteniéndose como resultado un listado de 65 acuíferos.

De acuerdo a Rojas, L. (2015), en el norte de Chile las zonificaciones con mayor aptitud para albergar aguas subterráneas se obtuvieron para pendientes bajo un 15%. Por lo tanto, se consideró la información topográfica de Chile de la base de datos del USGS (2016). A partir de ella se generaron modelos de elevación digital de las pendientes de la superficie que permitieran una mejor definición de la extensión del acuífero. Adicionalmente, se complementó con la información geológica de SERNAGEOMIN (2003). Luego, para la estimación de la recarga y volumen de los acuíferos, se consideraron informes emitidos para y por la DGA en los últimos 10 años en distintas cuencas de la zona Norte de Chile.

### **4.2 IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS**

A partir de la revisión y análisis de antecedentes que caracterizan los acuíferos de la zona norte de Chile, así como referencias internacionales que dan cuenta de rangos de magnitud para diversas variables hidrogeológicas en acuíferos, se desarrolló una metodología para identificar los acuíferos-GVBR a partir de criterios de comparación.

Se definieron cuatro criterios para la identificación de acuíferos-GVBR, los cuales se relacionan directamente con el objetivo planteado que se presentan en el Cuadro 4-1.

**Cuadro 4-1 Resumen de Criterios Utilizados**

Criterio	Descripción	Unidad
C1: Volumen de Almacenamiento en Acuíferos	Volumen de almacenamiento estimado máximo de agua en acuíferos	Mm <sup>3</sup>
C2: Recarga de Acuíferos	Recarga media anual que ingresa a acuíferos	l/s/año
C3: Tiempo de Residencia	Tiempo de renovación en acuíferos: Volumen Almacenado/Recarga	Año
C4: Tasa de Renovación Media Anual	Relación entre Recarga y Volumen Almacenado	%

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 PRIORIZACIÓN

Una vez identificados los criterios, se definió la priorización aplicada en cada uno. Así, se pueden establecer preferencias entre los elementos en una escala de intensidades entre el total de los acuíferos comparados. Los niveles de priorización utilizados corresponden a un Nivel 1 de prioridad máxima y Nivel 3 de prioridad menor, como muestra el Cuadro 4-2.

**Cuadro 4-2 Priorización de Criterios**

Criterio	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Criterio 1 (Mm <sup>3</sup> )	> 34.000	16.800 - 34.000	< 16.800
Criterio 2 (l/s/año)	< 1.800	1800 - 3.800	> 3.800
Criterio 3 (años)	> 1.000	200 - 1.000	< 200
Criterio 4 (%)	< 0,1	0,1 - 1	> 1

Fuente: Elaboración propia.

### 4.4 PESOS ASIGNADOS A CADA CRITERIO

El objetivo principal del proceso de decisión es identificar acuíferos de gran volumen, que sean recargados en bajas magnitudes. Mediante la ponderación asignada se considera que, si bien un acuífero puede obtener una alta prioridad al considerar el criterio del tiempo de residencia, esto puede deberse a que la recarga determinada es de baja magnitud sobre un acuífero de pequeño tamaño. Así, el peso asignado al criterio 1 considerará este factor, ayudando a no otorgar una alta prioridad en este acuífero.

En el Cuadro 4-3 se presentan los pesos asignados a cada uno de los criterios definidos.

**Cuadro 4-3 Ponderación en Criterios**

Criterio	Peso (%)	(Peso) / (Peso Mayor)
C1: Volumen de Acuíferos	50	1,0
C2: Recarga de Acuíferos	10	0,2
C3: Tiempo de Residencia: Volumen Almacenado/Recarga	30	0,6
C4: Relación entre Recarga y Volumen Almacenado	10	0,2

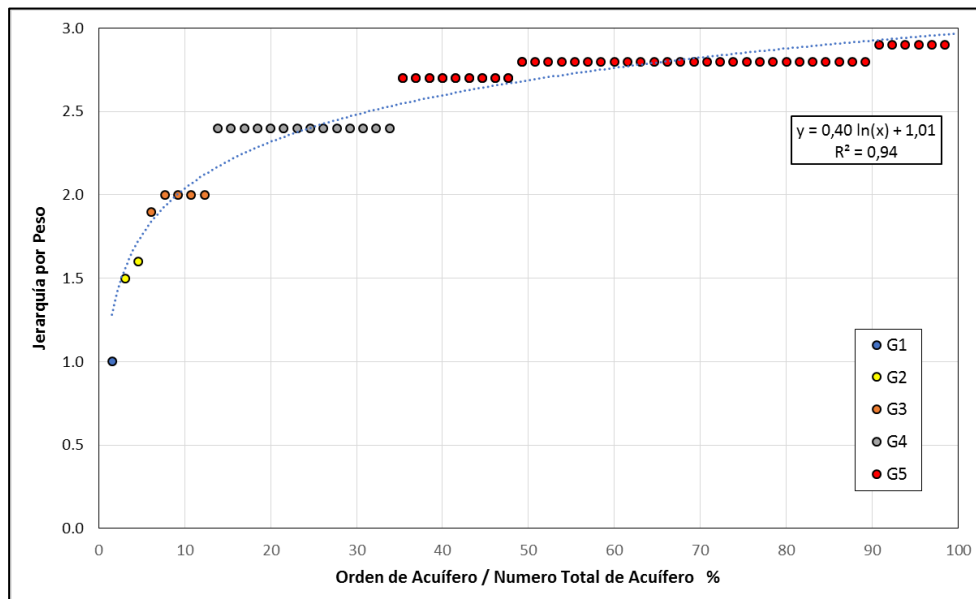
Fuente: Elaboración propia.

---

## CAPÍTULO 5 IDENTIFICACIÓN DE ACUÍFEROS-GVBR

---

A partir de la jerarquización descrita en el capítulo anterior, ésta se aplicó a los acuíferos catastrados y sus resultados se presentan en la Figura 5-1. Se identifican cinco grupos de acuerdo a su jerarquía. El grupo 1 corresponde a la Pampa del Tamarugal con prioridad máxima de 1; el grupo 2 se ubica próximo con una priorización que bordea un valor de 1,5 (río Loa y Salar de Atacama); el grupo 3 corresponde a jerarquías cercanas a 2 (prioridad media); el grupo 4 corresponde a jerarquías entre 2 y 2,5; y el grupo 5 corresponde a jerarquías entre 2,5 y 3 (prioridad menor). La distribución de la jerarquía por peso se ajusta logarítmicamente en los acuíferos.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5-1 Jerarquía por Peso – Ajuste Logarítmico de Tendencia**

De esta manera, se observa claramente una diferencia de la Pampa del Tamarugal con respecto al resto, ubicándose con una priorización máxima. En efecto, ésta se encuentra alejada en medio orden de magnitud del grupo que la subyace, que, para efectos del estudio y delineamientos del objetivo del proceso de decisión considerado, se cataloga como acuífero de gran volumen y bajo nivel de recarga.

---

# CAPÍTULO 6 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SUSTENTABILIDAD

---

La metodología para definir y cuantificar la explotación sustentable de un acuífero, tuvo en cuenta la experiencia internacional y el cumplimiento de las relaciones físicas o hidrogeológicas que determinan la dinámica de las aguas subterráneas.

## 6.1 BASES CONCEPTUALES

Cualquier metodología para determinar la explotación sustentable debería considerar:

- El cumplimiento de las relaciones que determinan la dinámica de las aguas subterráneas, a fin de eliminar ambigüedades y obtener cifras cuantitativas y confiables.
- La explotación sustentable debería garantizar que el sistema de aguas subterráneas alcanzará un nuevo estado de equilibrio en el tiempo.
- Uso de modelos numéricos, que permiten desagregar espacial y temporalmente el sistema acuífero, generando resultados más precisos.
- Restricciones para determinar la sustentabilidad.

El siguiente ejemplo ilustra, en un caso sencillo, el concepto de explotación sustentable de una cuenca.

En condiciones naturales de largo plazo, sin explotación, habrá un flujo de entrada y un flujo de salida y un balance en estado de equilibrio. Cuando aumenta la explotación, el flujo de salida puede disminuir debido a la "captura", o tal vez más apropiadamente a su "intercepción" (por ejemplo, la disminución de la evapotranspiración). También, en un momento dado, la entrada puede incrementarse por la incorporación de agua adicional al sistema debido a la inducción (por ejemplo, infiltración de ríos o lagos). Cabe indicar que el flujo inducido de entrada puede ocurrir antes de la intercepción del flujo de salida, o viceversa, dependiendo de la posición del área de extracción en relación con las entradas y salidas, o también pueden ocurrir simultáneamente. Ambos o alguno de estos procesos continuarán por un período de tiempo dado hasta que, para una tasa de extracción dada, el nuevo flujo total de salida (que ahora incluye el bombeo) se equilibre con el nuevo flujo de entrada total. El tiempo necesario para



alcanzar el equilibrio dependerá de la magnitud de la tasa de extracción, las características del acuífero y las distancias hasta los bordes donde se producen las recargas.

Asimismo, otros alcances relevantes son:

- No existe una simple y única definición para determinar un manejo sustentable.
- La recarga natural de un sistema de aguas subterráneas no es equivalente a la explotación sustentable del mismo.
- Es necesario la utilización de modelos numéricos para el análisis de sustentabilidad de sistemas subterráneos, permitiendo la determinación de la recarga inducida y flujo de salida residual del sistema.
- A raíz de lo anterior, es importante contar con información que permita la implementación de un modelo numérico del acuífero evaluado.
- Las variaciones del clima a largo plazo (cambio climático) producirán incertidumbre en la determinación de la explotación sustentable del sistema subterráneo.

## 6.2 GENERALIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA SUSTENTABILIDAD

Para la elaboración de una metodología general de estimación de sustentabilidad, se debe comenzar con la ecuación de balance másico como es descrita en la Ecuación 6-1.

$$\sum_1^n I_i - \sum_1^n O_i - P = \frac{\Delta S}{t} \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Con  $P = \sum_1^m P_i$

Sujeto a: Restricciones a variables naturales de entrada y de salida, niveles, otras.

Donde:

- $P$  es la suma de todas las extracciones existentes y que se requiere determinar en condiciones sustentables.
- $I_i$  son las entradas que se hayan identificado para un determinado acuífero.
- $O_i$  corresponde a las posibles salidas naturales que presente el sistema acuífero.

Mediante el uso de un modelo numérico es posible incorporar las entradas y salidas descritas y analizar de manera independiente cada una de las variables identificadas como críticas y/o que son objeto de restricción para el manejo sustentable. En este sentido, se debe analizar meticulosamente si para las condiciones de explotación actuales en un acuífero, ésta se

satisface mediante la captura e intercepción de flujo, sin utilizar el almacenamiento del acuífero en el largo plazo, y si a su vez se cumplen las restricciones ecológicas implementadas.

Según lo planteado, pueden darse una serie de casos en los que, dependiendo del tipo de restricciones ecológicas y caudales de explotación, se pueda lograr una explotación aparentemente sustentable en la cuenca (flujo explotado interceptado y capturado de acuífero), pero que no satisfaga las restricciones ecológicas. O que en efecto se satisfagan las restricciones medioambientales, pero en que el caudal explotado corresponda al minado parcial del almacenamiento, y, por ende, no sea sustentable.

Para la aplicación de la metodología antes descrita, se propone el diagrama de flujo presentado en la Figura 6-1, el cual contempla:

- Generación de Modelo Numérico en Condiciones Naturales.
- Verificación de Cumplimiento de Restricciones en Condiciones Naturales.
- Generación de Modelo Numérico en Situación Actual.
- Generación de Modelo Numérico Predictivo.
- Verificación de Sustentabilidad en Situación Actual.
- Verificación de Cumplimiento de Restricciones en Situación Actual para Sistema en Equilibrio y Previsión a Futuro.
- Verificación de Cumplimiento de Restricciones en Situación Actual para Sistema con Niveles Descendentes.
- Verificación de Sustentabilidad y Restricciones en Modelo Predictivo.

Con este procedimiento metodológico se pueden realizar, entre otras cosas:

- Verificación de sustentabilidad de flujo en situación actual. Es decir, se identificará si la explotación actual del sistema acuífero es capaz de sustentarse mediante la captura e intercepción de flujo desde el sistema acuífero, sin considerar las restricciones ecológicas.
- Verificación de sustentabilidad del sistema con restricciones ecológicas para situación actual.
- Determinación de explotación sustentable máxima que satisface restricciones ecológicas. Es decir, se determinará el incremento/disminución de caudal que debiese adoptarse, de manera tal que en el horizonte de evaluación esta explotación sea sustentable, sujeta a satisfacer las restricciones ecológicas.
- Determinación de explotación no sustentable con minado parcial, satisfaciendo las restricciones ecológicas en el horizonte de evaluación.



---

# CAPÍTULO 7 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SUSTENTABILIDAD EN PAMPA DEL TAMARUGAL

---

A continuación se describe la metodología aplicada para determinar la sustentabilidad.

## 7.1 MODELO CONCEPTUAL

La delimitación del dominio quedó principalmente dada por:

- Oeste, limitado por la cordillera de la Costa.
- Este, ajustado discretamente a partir de las delimitaciones establecidas en los estudios de SERNAGEOMIN (2016) y principalmente PRAMAR (2008), de acuerdo a la implementación de las condiciones de borde.
- Norte, limitado a lo presentado en SERNAGEOMIN (2016), la interpretación de la dirección principal de flujo (línea de corriente), y la interpretación del basamento de los trabajos de terreno.
- Sur, conexión con acuífero de salar Sur Viejo, de acuerdo a lo establecido por PRAMAR (2008), SERNAGEOMIN (2016), y complementado con isofreáticas al año 2016.

### Unidades Hidrogeológicas

De acuerdo a la información revisada, en SERNAGEOMIN (2016) y presentada en la Figura 7-1, se definieron 10 unidades hidrogeológicas (UH) en la cuenca de la Pampa del Tamarugal, a partir de sus propiedades y características para transmitir agua.

Los trabajos geofísicos, permitieron definir 5 unidades geoléctricas-hidrogeológicas. Estas unidades fueron factibles de ser correlacionadas con un grado importante de probabilidad, con medios geológicos e hidrogeológicos y contenidos de agua. Se observa que las primeras dos conforman el denominado relleno sedimentario, compuesto por los depósitos no saturados y aquellos medios por donde se produce el flujo subterráneo; el cual se ubica por sobre el basamento. Esto se condice con lo indicado en SERNAGEOMIN (2016), donde se

determina como relleno a las UH A1, A2, A3, B1 y C3, las cuales se ubican por sobre las UH C1, C2, C4, C5 y D1, definidas como basamento rocoso. Es decir, se identifica una sola gran unidad sedimentaria acuífera, por sobre el basamento rocoso.

### **Geometría del Acuífero**

La elevación del basamento se generó a partir de SERNAGEOMIN (2016), la cual corresponde a la diferencia entre el modelo de elevación digital de terreno y el espesor del relleno modelado. Esta información fue contrastada con la recopilada de prospecciones geofísicas TEM, Nano TEM y gravimétricas revisadas en los antecedentes y campaña geofísica. La superficie de terreno se generó a partir del modelo de elevación digital (DEM) de la misión de Radar SRTM, de 1 arcosegundo. En particular, el uso de este modelo permite identificar de manera precisa la cota de la elevación de terreno, sin considerar la cubierta vegetal.

### **Flujos Subterráneos**

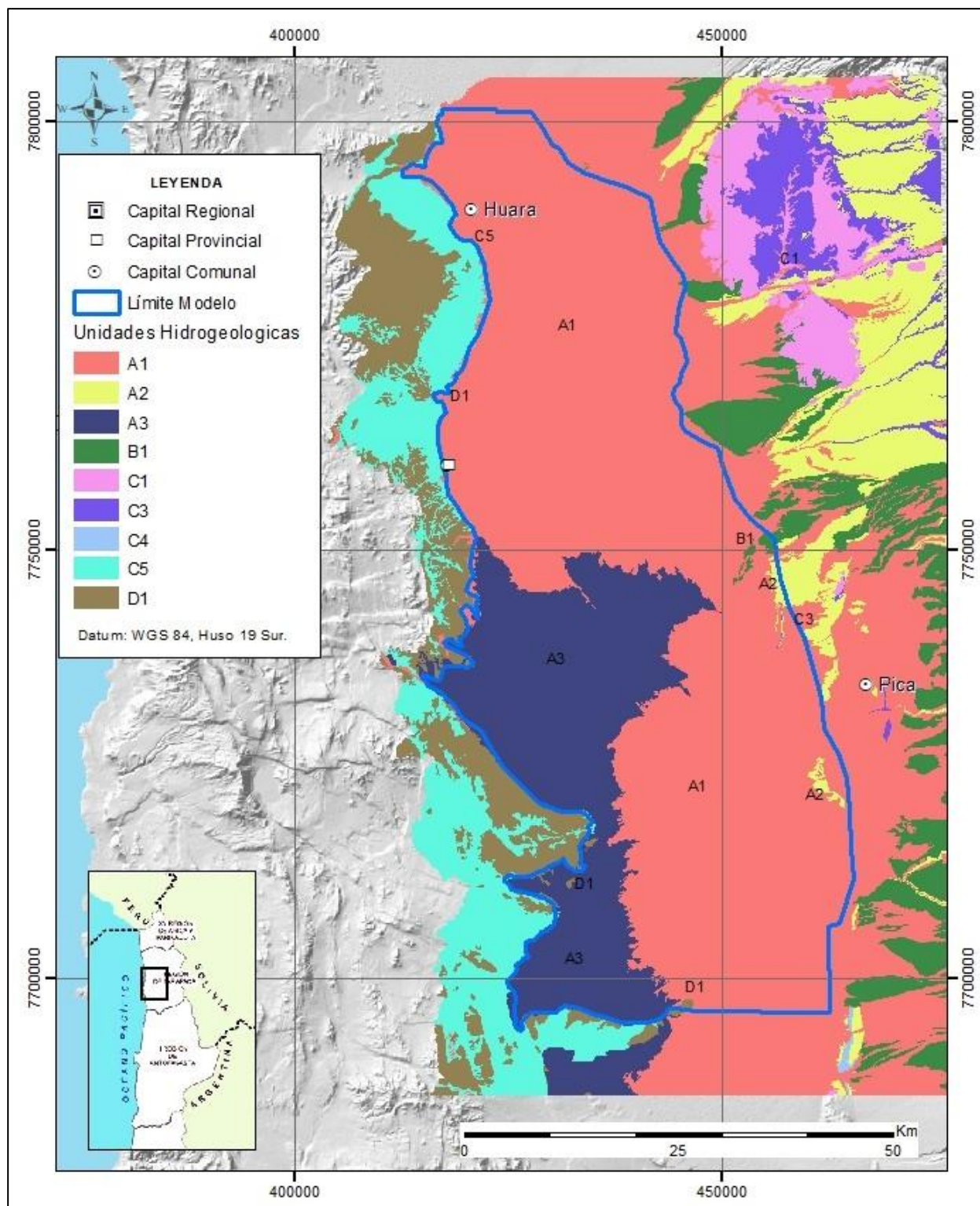
El modelo conceptual considera las siguientes entradas y salidas de flujo.

- Recarga por Acuíferos desde Parte Alta o Pre-Andina
- Recarga por Crecidas Fluviales Extremas
- Descarga Subterránea hacia Acuífero Sur Viejo
- Evaporación desde Salares
- Evapotranspiración
- Explotación por Bombeo

### **Definición y Determinación de las Condiciones de Borde del Modelo de Flujo**

En la Figura 7-2 se presenta un diagrama esquemático de la conceptualización de las condiciones de borde del modelo de flujo detalladas a continuación.

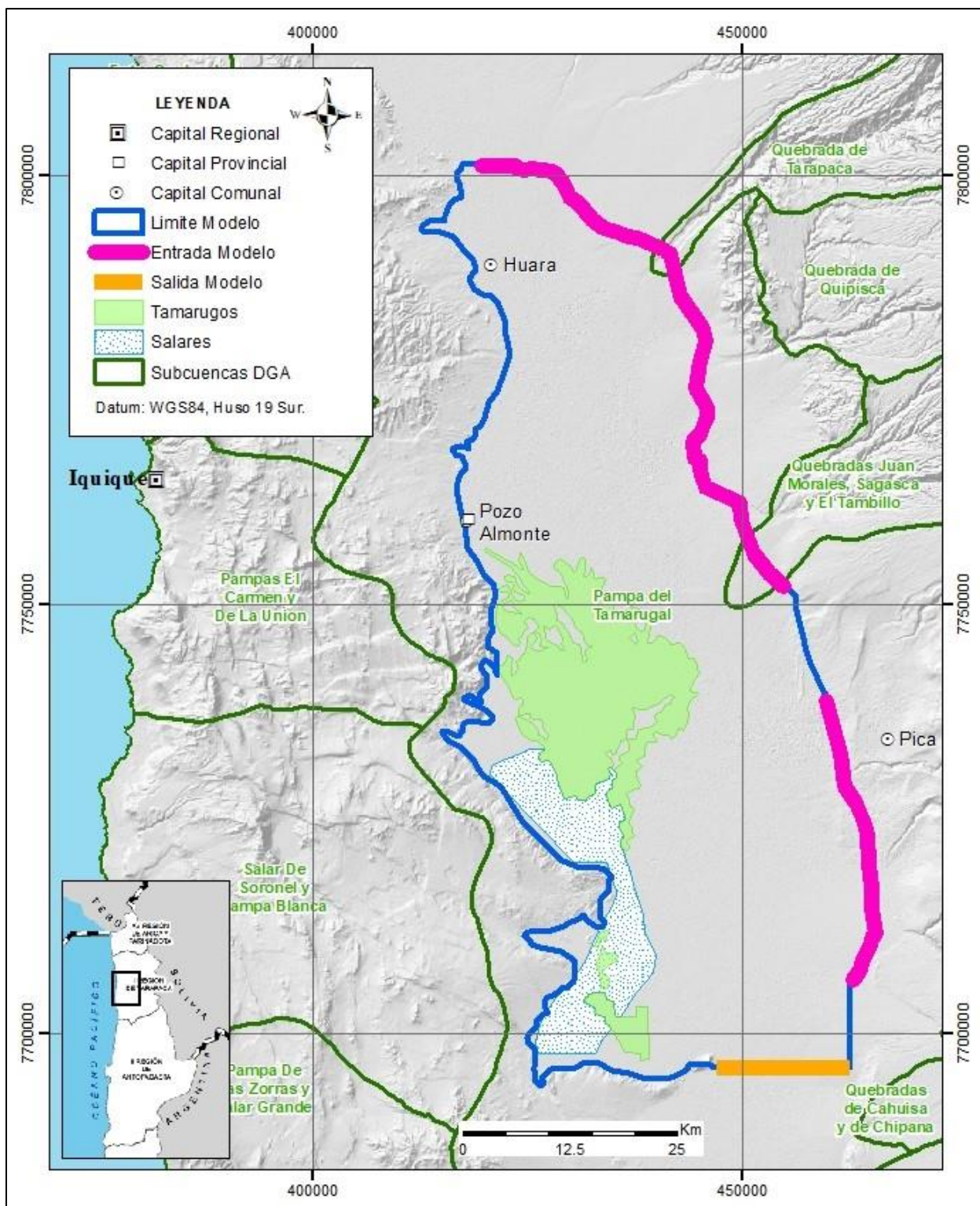
- Límites impermeables: se establecieron de acuerdo al contacto roca-relleno. Esto comprende los contornos oeste, este y suroriente.
- Condición de borde de nivel conocido: se establecieron en el extremo suroriente, en la sección de salida del flujo subterráneo, como descarga hacia el salar Sur Viejo.
- Pozos de inyección: implementados en el sector este y norte del modelo, para representar el flujo subterráneo que ingresa desde las quebradas tributarias.
- Evapotranspiración: se estableció en los sectores donde se ubican las reservas de tamarugos y algarrobos.
- Evaporación: se estableció en los sectores donde se ubican los salares de Pintados y Bellavista.



Fuente: Elaboración propia desde SERNAGEOMIN (2016).

**Figura 7-1 Unidades Hidrogeológicas Identificadas en la Pampa del Tamarugal**





Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-2 Conceptualización de Condiciones de Borde**

## **7.2 MODELO NUMÉRICO**

Se utilizó el software Visual MODFLOW v2010.1, el cual entrega como principales resultados la evolución de los niveles de agua subterránea y caudales subterráneos pasantes en secciones de control, entre otros. De acuerdo a los lineamientos establecidos, el modelo se implementó en régimen permanente (CNP) y transiente (CAT) considerando un período de modelación definido entre los años 1960 y 2016, en los cuales se realizó el proceso de calibración.

Adicionalmente se implementó en régimen impermanente (CFT) en el periodo 2017-2066, para dar cuenta de los niveles y flujos en una situación futura. En los siguientes puntos se resume la construcción del modelo numérico.

### **Discretización Horizontal y Vertical**

La geometría del modelo quedó caracterizada por celdas de tamaño 500 x 500 m, las cuales se refinaron en los sectores de salares y plantaciones de tamarugos y algarrobos a un tamaño de 250 x 250 m. Se consideró un único estrato vertical, conforme a la homogeneidad observada en el sistema acuífero tanto en antecedentes como por los resultados de la campaña geofísica. La superficie de terreno corresponde a información del modelo de elevación digital de terreno (DEM). En lo que respecta al basamento, se complementó la información de SERNAGEOMIN (2016) con la información generada en terreno.

### **Discretización Temporal**

Se ha considerado una discretización temporal a nivel anual, que es suficiente para analizar las variaciones temporales de los diferentes flujos y niveles, teniendo como fin la sustentabilidad del acuífero.

### **Parámetros Hidrogeológicos**

Se consideró preliminarmente la distribución de unidades hidrogeológicas identificadas en el modelo conceptual y de permeabilidades descritas en PRAMAR (2008). Luego, se complementó con valores puntuales de permeabilidad y coeficientes de almacenamiento obtenidos en la recopilación de antecedentes, información de pruebas de bombeo efectuadas para la solicitud de derechos de agua subterránea y valores adoptados en los modelos numéricos hidrogeológicos realizados por SERNAGEOMIN (2016) y PRAMAR (2008).

### **Condiciones de Borde**

Las condiciones de borde del modelo representan niveles o flujos de entrada y salida en las fronteras del modelo. A continuación, se realiza una breve descripción de las consideradas en el sistema:



- **Nivel Conocido Límite Sur**

Se utilizó para caracterizar el flujo descargado hacia el salar Sur Viejo, en el límite suroriente del modelo. Se consideró una carga hidráulica tal que se generasen los flujos identificados en el modelo conceptual. De esta manera, se consignó un nivel conocido de 952,5 m s.n.m. en el extremo oriente y de 950 m s.n.m en el extremo poniente.

- **Evapotranspiración**

Se utilizó el módulo ETS de Visual MODFLOW para caracterizar el flujo evaporado desde la superficie de los salares y desde las plantaciones de tamarugos y algarrobos. De acuerdo a lo planteado en el modelo conceptual, se incorporaron las curvas de evapotranspiración por tramos, conforme a la profundidad del nivel freático para los salares y plantaciones vegetales. Es importante mencionar que se ha incorporado dependiente del nivel freático del sistema y no como un valor constante de descarga. Esta definición se diferencia de otros modelos numéricos desarrollados en la Pampa del Tamarugal tales como PRAMAR (2008), que lo representa mediante recargas negativas, y SERNAGEOMIN (2016), considerando un pozo de bombeo.

- **Recarga Superficial**

Es la recarga asociada a eventos de precipitación extrema, que pueden generar recarga en los abanicos fluviales. De acuerdo a lo consignado en el modelo conceptual, este flujo es apreciable para una crecida de 100 años de periodo de retorno.

**Recarga Subterránea desde Borde Este**

La recarga que ingresa como flujo lateral subterráneo al sistema acuífero desde el Este, se implementó en el modelo mediante pozos de inyección distribuidos en las quebradas.

- **Pozos de Explotación**

Se incorporó al modelo la explotación histórica en el acuífero para el periodo 1960-2016.

- **Niveles Freáticos**

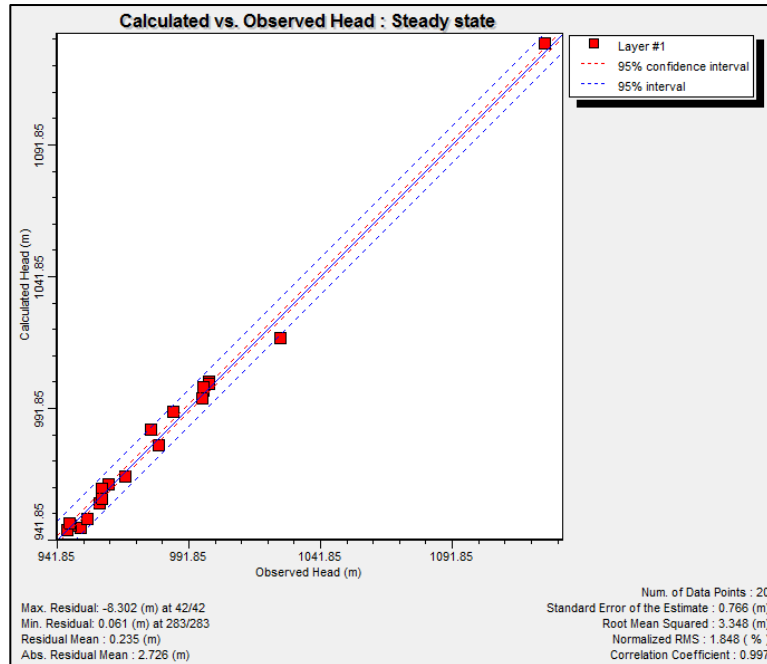
Para el ajuste del modelo numérico se consideraron pozos que representan los niveles de la situación estacionaria (CNP, a década de 1960); y series de pozos históricas registradas hasta 2016 (CAT). Los pozos de observación implementados en el modelo CAT son parte del monitoreo DGA en la zona de estudio. La información ha sido complementada mediante los registros que posee la DGA regional para los pozos denominados JICA y corregida de acuerdo a los resultados del levantamiento topográfico presentado en CIDERH (2013).

**Calibración Permanente del Modelo Numérico (CNP)**

El proceso de ajuste tuvo como objetivo lograr la mayor aproximación entre los niveles freáticos observados y modelados, modificando determinados parámetros y propiedades del modelo dentro de márgenes físicamente posibles.

### Resultados del Ajuste del Modelo (CNP)

Los resultados del proceso de ajuste se presentan en la Figura 7-3, correspondiente a la comparación de series observadas y calculadas. La calibración se considera adecuada, por cuanto cumple con los criterios de cierre recomendados por fuentes como la Guía de Modelación Subterránea del SEA, con un RMS normalizado de 1,85%, inferior al 5%.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-3 Resultados Gráficos del Modelo Numérico**

### Balance Hídrico del Modelo Estacionario (CNP)

El balance hídrico del sistema para el modelo CNP es presentado en el Cuadro 7-1, observándose un error de cierre menor al 1%.

**Cuadro 7-1 Balance Hídrico Flujos Modelo Permanente (CNP) (l/s)**

ENTRADAS			761	0,1%
Recarga Subterránea de Quebradas	761			
Aroma y otras	163			
Tarapacá	294			
Quipisca y J. Morales	106			
Quisma y otras	30			
Chacarilla	167			
SALIDAS				
Evaporación Salares	483			
Evapotranspiración	185			
Descarga Salar Sur Viejo	94			
		762		

Fuente: Elaboración propia

### Calibración Transiente del Modelo Numérico (CAT)

La calibración del modelo CAT se realizó operando el modelo entre los años 1960 y 2016, tomando como condición inicial el modelo calibrado en régimen permanente (CNP). El proceso de calibración consistió en modificar, principalmente, el valor del coeficiente de almacenamiento, dentro de los rangos establecidos en el modelo conceptual, buscando ajustarse a los niveles registrados en la red de pozos en el dominio del modelo. El balance hídrico resultante de la calibración del sistema con los valores promedios del periodo 1960-2016 se observan en el Cuadro 7-2.

**Cuadro 7-2 Balance Hídrico Flujos Medios Modelo Transiente (CAT)**

ENTRADAS (l/s)			ERROR
Recarga subterránea de quebradas	801	801	
SALIDAS (l/s)			0,1%
Evaporación salares	381	1.802	
Evapotranspiración	272		
Descarga salar Sur Viejo	86		
Pozos de bombeo	1.063		
VARIACIÓN ALMACENAMIENTO (l/s)			
Desembalse	998	998	

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los valores presentados en el Cuadro 7-2, se observa una disminución en los flujos de la recarga subterránea y salidas naturales. Lo anterior se explica respectivamente por la baja en las precipitaciones y la disminución de los niveles freáticos, debido al aumento de la explotación subterránea, que han provocado la disminución de la superficie de tamarugos y salares. El balance final, estima un caudal de desembalse cercano al doble del promedio histórico, lo cual refleja la explotación por sobre las capacidades de recarga y captación o captura de las salidas naturales del sistema. Adicionalmente se presenta el balance hídrico del año 2016.

**Cuadro 7-3 Balance Hídrico Año 2016 Modelo Transiente (CAT)**

ENTRADAS (l/s)			ERROR
Recarga Subterránea de Quebradas	711	2.986	
Almacenamiento	2.275		
SALIDAS			0,0%
Evaporación salares	261	2.986	
Evapotranspiración	179		
Descarga salar Sur Viejo	71		
Pozos de bombeo	2.452		
Almacenamiento	23		
VARIACIÓN ALMACENAMIENTO (l/s)			
Desembalse	2.252	2.252	

Fuente: Elaboración propia

### 7.3 APLICACIÓN A LA METODOLOGÍA

La implementación de la metodología de sustentabilidad consideró las actividades que se detallan a continuación.

#### a) Restricciones Identificadas en la Pampa del Tamarugal

La consulta por medio de entrevistas a oficinas gubernamentales, junto a la revisión de antecedentes, permitió identificar las restricciones presentadas en el Cuadro 7-4.

**Cuadro 7-4 Restricciones Identificadas en Pampa del Tamarugal**

Restricción	Verificación en Modelo	Modelo Aplicado
Servicios Ecosistémicos	-Profundidad de nivel freático inferior a 20 metros en Plantaciones Forestales -Profundidad de nivel freático inferior a 8 metros en Salares	CNP – CAT – CFT
Variación de Niveles	-Profundidad de nivel freático aumente sobre 5 metros con respecto a situación 2016 en sector de producción	CFT
Variabilidad de Precipitaciones	-Implementación de series de recarga con variabilidad climática en escenario	CFT

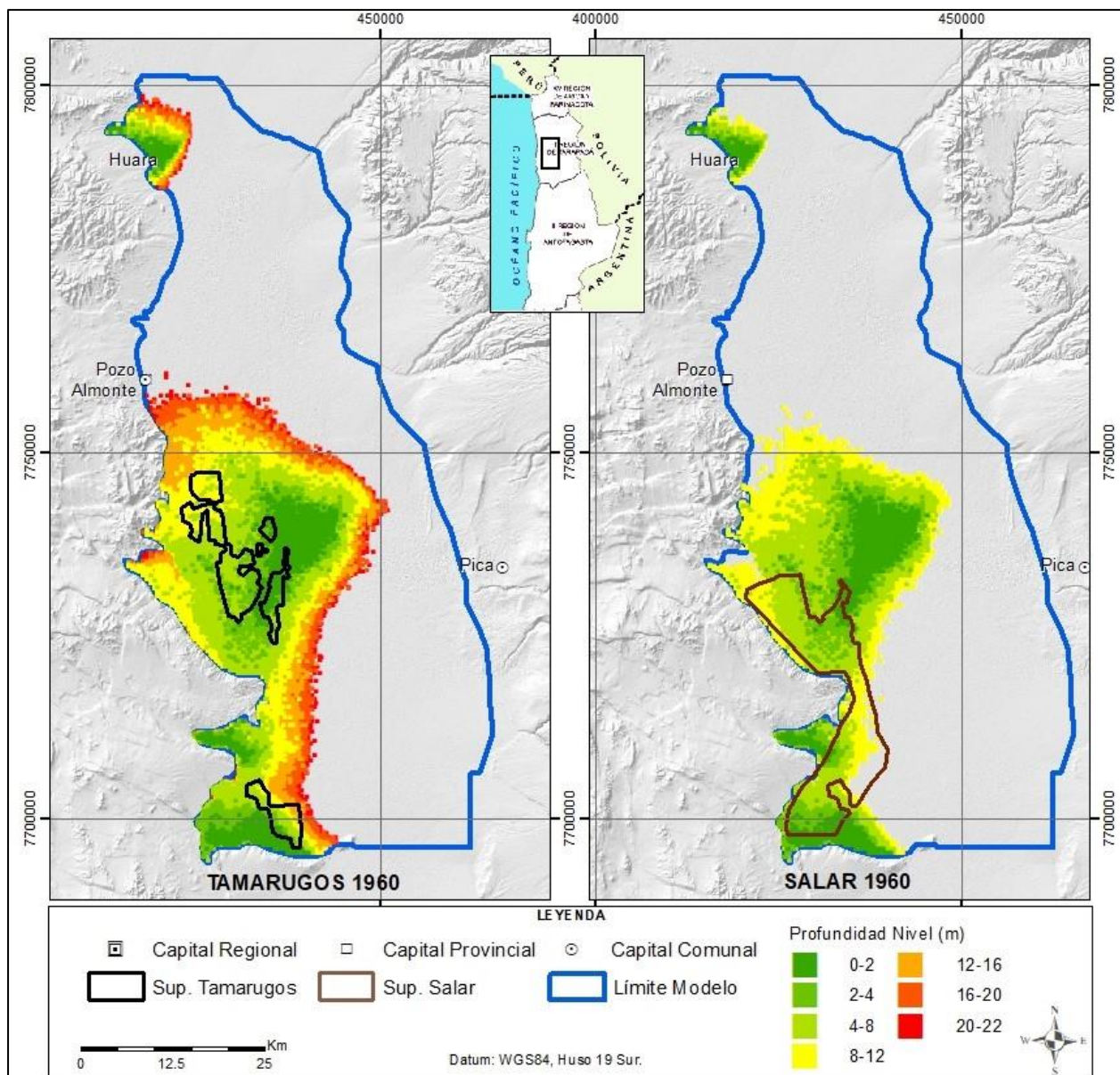
Fuente: Elaboración propia

#### b) Verificación de Restricciones en Condiciones Naturales (CNP)

Desarrollado el modelo numérico de flujo en régimen estacionario, se debe comprobar el cumplimiento de las restricciones en el modelo CNP. Para dar cuenta de la profundidad al nivel freático en sector de plantaciones y salares, se generaron bandas de profundidad en el sector de análisis, exportados de la malla numérica del modelo. A modo de ejemplo se presentan los resultados del modelo CNP en la Figura 7-4.

Se observa que, para la disposición de las plantaciones en la década de 1960 y dadas las condiciones naturales del sistema, el sector presenta profundidades al nivel freático someras, que en toda su extensión son inferiores a los 20 metros definidos como restricción ambiental.

A su vez, se aprecia que en la mayor parte del sector en que se ubican los salares, la profundidad se encuentra inferior a los 8 metros establecidos como restricción. Existe un tramo en el cual la profundidad se ubicaría por sobre el límite, ubicado en la conexión entre los salares de Bellavista y Pintados, conforme a la delimitación definida por la DGA en su base SIG. Se ha establecido como restricción esa profundidad límite, dado que no se conoce con exactitud la delimitación real de los salares desde hace más de 50 años.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-4 Profundidad Nivel Freático en Modelo CNP – Plantaciones y Salar**

De esta manera, una vez verificadas las restricciones en la situación en equilibrio del sistema, bajo condiciones de pre-desarrollo, se procede con la evaluación de los modelos CAT y CFT.

### c) Verificación de Sustentabilidad de Flujo en Situación Actual (CAT)

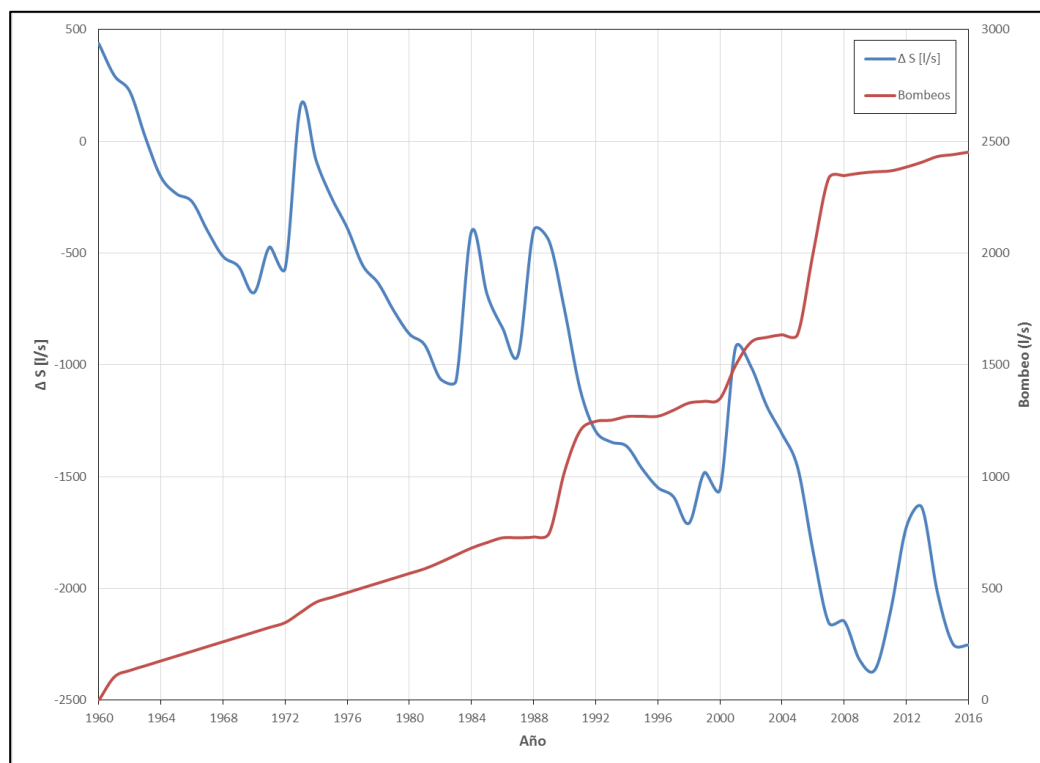
Una vez que se desarrolló el modelo numérico de flujo para el periodo 1960-2016 (CAT), desde la situación histórica en equilibrio hasta la condición actual, se verificó la sustentabilidad actual de flujo conforme a la implementación de stress en el sistema dado por la explotación

de los pozos. Es decir, se comprobó si el sistema actual es capaz de sustentar el caudal de explotación mediante flujos de captura e intercepción.

La evolución de los niveles freáticos en el periodo 1960-2016 se observa, en términos generales con tendencia al descenso en prácticamente todos los sectores y en particular cerca de áreas con gran explotación, cercano al poblado de La Tirana y en el sector de Canchones.

Lo anterior se complementa con la Figura 7-5, en la cual se presenta la variación de almacenamiento y la tasa de bombeo para el periodo 1960-2016. Se observa de manera manifiesta el uso del almacenamiento a medida que se somete a mayor explotación el acuífero. En este sentido, los mayores usos del almacenamiento se dan en los periodos de incremento en el régimen de extracción, llegando en la actualidad a hacer un uso equivalente de aproximadamente 2.400 l/s.

De esta manera, de acuerdo a lo establecido en la metodología, el sistema en la actualidad no presenta equilibrio. También puede corresponder a un escenario en el cual el sistema se encuentre en vías de ser sustentable y que aún no se ha estabilizado, o que exista un minado de sus recursos.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-5 Variación de Almacenamiento y Bombeo en Periodo 1960-2016**

#### **d) Verificación de Restricciones en Condición Actual (CAT)**

Una vez verificada la condición de sustentabilidad de flujo, se verificó el cumplimiento de las restricciones en el modelo CAT, de manera tal de comprobar si éstas se cumplen en la situación actual de desarrollo del sistema.

La superficie en la que se disponen las plantaciones es mayor a la catastrada para la década de 1960 debido a que se han realizado actividades de replantaciones, en particular en las décadas de 1960 y 1980, de acuerdo a lo consignado en el modelo conceptual.

Como se observa, el margen septentrional de las plantaciones es sensible respecto a la profundidad del nivel freático, sin embargo, en términos generales se cumple la restricción del servicio ecosistémico, pues se presentan profundidades al nivel freático inferiores a los 20 metros.

De igual forma, se aprecia que la superficie cubierta por salares presenta profundidades mayores del nivel freático en relación a la situación histórica, alcanzando depresiones superiores a los 8 metros establecidos como límite de la restricción ecosistémica en algunos sectores. Sin embargo, tomando en consideración que la delimitación de salar definida por la DGA no es del todo exacta, y que los salares Pintados y Bellavista se encuentran en los límites norte y sur de ésta, se considera que se cumple la restricción del servicio ecosistémico, pues en general, se presentan profundidades al nivel freático inferiores a los 8 metros.

Conforme a los resultados, en la situación actual, modelo CAT, se cumplen las restricciones asociadas a los servicios ecosistémicos. No obstante, se debe tener en cuenta que de acuerdo al stress al que se ha sometido el sistema durante los años, el descenso de los niveles ha provocado una constante disminución de la evapotranspiración, que podría reducir su área de plantación.

#### **e) Verificación de Sustentabilidad de Flujo en Modelo de Previsión o Pronóstico (CFT)**

Para dar cuenta de posibles regímenes de explotación en el sistema, con variabilidad de las precipitaciones y en relación al cumplimiento de restricciones, se definieron 4 escenarios futuros, los cuales se detallan a continuación. Se consideró un horizonte de evaluación de 50 años para verificar la sustentabilidad de flujo del sistema y el cumplimiento de las restricciones.

##### Definición de Escenarios:

- **E1:** Bombeo constante proyectado a 2066, considerando factor de uso para derechos otorgados. Corresponde al escenario de simulación futura, en el cual la explotación actual

del sistema (CAT-2016) se mantiene por un periodo de 50 años sin sufrir cambios. Este caudal de explotación corresponde a los derechos otorgados aplicando factores de uso.

- **E2:** Bombeo constante proyectado a 2066 sin considerar factor de uso para derechos otorgados. Corresponde al escenario de simulación futura, donde la explotación del sistema se incrementa desde el primer año al total de derechos otorgados, sin aplicar factores de uso.
- **E3:** E1 con proyección de incremento de explotación para agua potable. Corresponde al escenario de simulación futura idéntico a E1, pero considerando un incremento en la explotación de sanitarias, proyectándose con un crecimiento anual de un 1,5% en el periodo de modelación de acuerdo a lo estipulado en DGA (2017).
- **E4:** E1 con modificación de la recarga subterránea por efectos de variabilidad de las precipitaciones. Corresponde al escenario de simulación futura similar a E1, pero considerando una disminución en la recarga subterránea asociada a la variabilidad futura de las precipitaciones en la alta cordillera

En lo que respecta a la implementación de la recarga futura en los escenarios, se consideró la repetición de las series de flujos subterráneos afluentes generadas para cada quebrada. En particular, para el Escenario 4, en la repetición de la serie se consideró el mismo factor de reducción utilizado para la generación del periodo 2006-2016, de manera de dar cuenta del efecto de la disminución de la recarga identificada en el estudio DGA (2016d).

#### **f) Verificación de Sustentabilidad de Flujo en Escenarios (CFT)**

El análisis de los resultados de los escenarios determinados se presenta a continuación.

- **Escenario 1**

Presenta la situación en que la utilización actual de los derechos subterráneos se extiende de manera constante a lo largo del periodo de evaluación. El balance hídrico evidencia un claro desembalse del acuífero por la necesidad de sustentar la demanda que es superior a la oferta natural del sistema.

Se observa que dada la gran explotación a la que está expuesta el sistema, más de dos veces la recarga natural del acuífero, el almacenamiento es utilizado en todo el periodo 2017-2066 para satisfacer esta demanda. Esto se refleja en que los niveles freáticos en el periodo de pronóstico manifiestan una tendencia al descenso. De esta manera, el sistema evaluado al año 2066 no se encuentra en un equilibrio sustentable de flujo.

- **Escenario 2**

Presenta la explotación total de los derechos subterráneos otorgados de manera constante a lo largo del periodo de evaluación. Este escenario presenta una situación



crítica debido a la explotación máxima en base a los derechos otorgados. Dada la excesiva extracción a la que se expone el sistema, más de cuatro veces la recarga natural del acuífero, el almacenamiento es utilizado en todo el periodo 2017-2066 para satisfacerla. Esto se refleja en que los niveles freáticos en el periodo de pronóstico manifiestan una tendencia al descenso, mayor a lo observado para el Escenario 1.

Conforme a lo anterior, el sistema evaluado al año 2066 no se encuentra en un equilibrio sustentable de flujo. Ya que en el horizonte total de modelación, sobre 100 años, no se ha encontrado un equilibrio, es probable que el sistema se encuentre en un escenario de absoluto minado de sus recursos almacenados.

- **Escenario 3**

Presenta un aumento de la demanda de agua potable a lo largo del periodo de evaluación. El balance hídrico representa la fragilidad del sistema frente a la demanda de explotación, donde la imposibilidad de capturar e interceptar desde las salidas naturales un caudal que pueda hacer frente a la demanda, implica un desembalse del acuífero.

En general, e igual que en los casos anteriores, los niveles descienden en el horizonte de evaluación. Se aprecia que dada la gran explotación que se implementa, junto a su incremento en el periodo de modelación, el almacenamiento es utilizado en todo el horizonte de evaluación. Así, el sistema evaluado al año 2066 no se encuentra en un equilibrio sustentable de flujo. Conforme a esto y ya que en el horizonte total de modelación sobre 100 años no hay un equilibrio, es muy probable que el sistema se encuentre minando sus recursos.

- **Escenario 4**

Presenta la demanda actual del sistema de manera constante en el periodo de evaluación, sin embargo, se ha modificado el caudal de recarga proveniente desde las quebradas debido a una disminución de las precipitaciones.

Por medio de este escenario es posible dimensionar que la disminución del principal aporte natural al acuífero no presenta mayores variaciones respecto a lo verificado en los escenarios 1 y 3. Es decir, es posible reafirmar la dependencia del sistema a la explotación subterránea, la cual es producida por la amplia diferencia respecto a la oferta natural y su capacidad de intercepción o captura de flujos.

La evolución de los niveles freáticos en el periodo de pronóstico tiende a descender. Esto se complementa con la variación del almacenamiento. Se aprecia que, al igual que en el

Escenario 1, dada la explotación a la que está expuesta el sistema, el almacenamiento satisface gran parte de la demanda de la extracción.

El sistema evaluado al año 2066 no se encuentra en un equilibrio sustentable de flujo. Conforme a esto y ya que en el horizonte total de modelación, sobre 100 años, no se ha encontrado un equilibrio, es probable que el sistema se encuentre en un escenario de minado de sus recursos hídricos.

#### **g) Verificación de Cumplimiento de Restricciones en Modelo de Pronóstico (CFT)**

En el siguiente punto se verifica el cumplimiento de las restricciones en los 4 escenarios implementados como modelos de pronósticos (modelos CTF), en el horizonte de evaluación de 50 años. Para llevar a cabo lo anterior, se exportaron los resultados de la malla de modelación en el sector de las plantaciones y salares, de manera de generar bandas de profundidad que den cuenta del efecto del descenso de los niveles de forma espacial, como se presentó en la Figura 7-4 para el modelo CNP. Así, se verificó en cada escenario el cumplimiento de la restricción de servicios ecosistémicos.

##### **• Verificación de Cumplimiento Restricciones en Escenario 1 (Modelo CFT-E1)**

Se aprecia que no cumple la restricción del servicio ecosistémico, verificándose profundidades mayores a 20 metros para tamarugos y de 8 metros para los salares.

Se aprecia que en los sectores de Canchones, La Tirana y pozos ECONSA, los niveles descienden por sobre los 10 metros, respecto de la situación actual, lo cual podría afectar las actividades productivas y sistema de abastecimiento. De esta manera, no se cumple la restricción de variación de niveles freáticos.

##### **• Verificación de Cumplimiento Restricciones en Escenario 2 (Modelo CFT-E2)**

Se aprecia que no cumple la restricción del servicio ecosistémico de tamarugos, ya que prácticamente no hay profundidades inferiores a 20 metros y una ínfima fracción de los salares se encuentra con profundidad al nivel freático inferior a los 8 metros.

En cuanto a niveles en zonas de producción, se aprecia que los sectores de Canchones, La Tirana y pozos ECONSA, descienden por sobre los 15 metros respecto de la situación actual. De esta manera, no se cumple la restricción de variación de niveles freáticos.}

##### **• Verificación de Cumplimiento Restricciones en Escenario 3 (Modelo CFT-E3)**

Se aprecia que no cumple la restricción del servicio ecosistémico, verificándose profundidades mayores a 20 metros para tamarugos y de 8 metros para los salares.

Respecta a las zonas de producción, se observa que en los sectores de Canchones, La Tirana y pozos ECONSA, los niveles descienden por sobre los 12 metros, respecto de la situación actual. De esta manera, no se cumple la restricción de variación de niveles freáticos.

- **Verificación de Cumplimiento Restricciones en Escenario 4 (Modelo CFT-E4)**

Se aprecia que no cumple la restricción del servicio ecosistémico, verificándose profundidades mayores a 20 metros para tamarugos y de 8 metros para los salares.

En lo que respecta la restricción de niveles en sectores de producción, se aprecia que los sectores de Canchones, La Tirana y pozos ECONSA, descienden por sobre los 15 metros, respecto de la situación actual. De esta manera, no se cumple la restricción de variación de niveles freáticos.

#### **h) Determinación de Explotación que Cumpla Restricciones**

A partir de lo expuesto en los puntos anteriores, se verificó que ningún modelo CFT cumple las restricciones establecidas para la Pampa del Tamarugal. De esta manera, conforme a la metodología, se procedió a determinar un caudal de explotación tal que se cumplan las restricciones establecidas. Como resultado final, se eligieron dos casos: bombeo máximo ponderado por un 25% (25%E2), y bombeo máximo ponderado por un 10% (10%E2).

Las franjas de profundidad muestran que, teniendo en consideración la condición de la plantación y salares en el año 2016, se cumplen las restricciones de servicios ecosistémicos.

Los niveles en sectores de producción, en ningún caso evidencian descensos por sobre 5 metros, inclusive, en el modelo CFT-10%E2 presenta un incremento en sus niveles freáticos. El máximo descenso se observa para el modelo CFT-25%E2, con 2 metros en el horizonte de evaluación para el sector de los pozos ECONSA. De esta manera, se cumplen las restricciones de servicios ecosistémicos y niveles freáticos en sectores de producción para los modelos CFT-25%E2 y CFT-10%E2.

#### **i) Verificación de Sustentabilidad de Flujo Modelo CFT que cumple Restricciones**

La sustentabilidad de flujo es analizada para cada modelo CFT que cumple restricciones, por medio de la implementación de pozos de observación y sus balances hídricos.

- **Modelo CFT-25%E2**

Se aprecia la considerable disminución de la tendencia de descenso en el horizonte de evaluación, en donde el pozo que registra un mayor descenso corresponde a 4 metros al norte de los tamarugos.

Se observa que a pesar de que la explotación es un 25% de la contemplada en el modelo CFT-E2, de todas maneras el almacenamiento sigue siendo sustento de la demanda, pero en una proporción mucho más reducida, lo que es consecuente con la somera disminución de los niveles en el sistema.

Se observa que, en promedio, en el horizonte de evaluación se utilizan 551 l/s de desembalse para mantener las demandas del acuífero. De esta manera, el sistema evaluado al año 2066 no se encuentra en un equilibrio sustentable de flujo. Conforme a esto, es probable que el sistema se encuentre en un escenario de manejo no sustentable de flujo, con minado parcial de sus recursos hídricos, pero que cumple las restricciones en el horizonte de evaluación.

- **Modelo CFT-10%E2**

Se aprecia la evidente disminución de la tendencia de descenso en el horizonte de evaluación, en donde el pozo que registra un mayor descenso corresponde a 2,4 metros al norte de los tamarugos.

Se observa que la explotación de un 10% de los derechos permite al almacenamiento acumular y entregar agua al sistema en el horizonte de evaluación. Así, en promedio, el almacenamiento es en parte sustento de la demanda, en una fracción muy reducida, lo que es consecuente con la estabilidad de los niveles freáticos

En promedio, en el horizonte de evaluación se utilizan 101 l/s de desembalse para mantener las demandas del acuífero, manteniendo los niveles freáticos en una condición estable. Así, el sistema evaluado al año 2066 se encontraría en un equilibrio sustentable de flujo. Conforme a esto es probable que el sistema se encuentre en un escenario de manejo sustentable de flujo y que cumple las restricciones en el horizonte de evaluación.

**j) Comparación Cálculo de Volumen de Explotación según Criterio DGA Actual y la Metodología Propuesta.**

En los acápite anteriores, se ha desglosado la metodología de sustentabilidad apoyada en la implementación de modelos numéricos para dar cuenta de la dinámica de aguas subterráneas. A partir de ésta, se puede desprender que desde la situación en régimen natural del sistema (año 1960), hasta una situación proyectada de 50 años desde el año 2016, se ha utilizado el almacenamiento del acuífero para cubrir la demanda existente por sobre la oferta, o actuando como regulación del sistema a lo largo de este periodo de 107 años.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo CAT, que representa la situación del sistema en el periodo 1960-2016, no se encuentra en equilibrio al año 2016, con un descenso constante de los niveles. Sin embargo, sí cumple las restricciones impuestas durante el periodo

de evaluación, lo cual permite el análisis del volumen desembalsado en un sistema en desequilibrio que satisface las restricciones ecosistémicas.

De igual manera, el modelo CFT-25%E2, en el cual se bombea un 25% de los derechos otorgados al año 2016, cumple las restricciones de servicios ecosistémicos, pero no la sustentabilidad de flujo en el horizonte de evaluación (2017-2066). Es decir, permite al sistema bombear un caudal tal que se cumplan las restricciones ecosistémicas sin que el sistema alcance un equilibrio y pudiese encontrarse minando sus recursos. Para efectos de análisis, se considera los resultados expuestos en este escenario.

Es importante mencionar que los derechos de explotación subterránea incorporados corresponden a los ubicados dentro del dominio de modelación, totalizando 3.422 l/s. De acuerdo a lo expuesto, los resultados asociados al desembalse del acuífero de la Pampa del Tamarugal, asociado al periodo 1960-2067, se resumen en el Cuadro 7-5.

**Cuadro 7-5 Volumen Modelado de Desembalse Acuífero Pampa del Tamarugal (Mm<sup>3</sup>)**

<b>Caso</b>	<b>CAT 1960-2016</b>	<b>CFT 2017-2066</b>	<b>TOTAL</b>
CAT + CFT-25%E2	1.911	1.354	3.265

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el estudio DGA (2011) realizó una actualización de la oferta del acuífero subterráneo de la Pampa de Tamarugal. Según el criterio actual de la DGA, se considera como sustentable extraer adicionalmente el 5% del volumen almacenado en el acuífero en un plazo de 50 años. De esa forma se estimó un valor final del volumen susceptible de ser explotado de 1.378 Mm<sup>3</sup>. Para llevar a cabo dicho análisis, se consideró como principal antecedente técnico el estudio DGA (1995), complementado con nueva información de los límites del acuífero. El área de estudio considerada en ese documento incluye el sistema acuífero ubicado al norte de Huara, septentrional al aporte de la quebrada Aroma, hasta aproximadamente la delimitación definida por la quebrada de Camiña. Es decir, considera una mayor extensión en relación a la delimitación realizada en el presente estudio, que estima como delimitación norte la subdivisión del escurrimiento subterráneo que efectivamente se produce, identificada al norte de Huara y complementada con los trabajos geofísicos de terreno.

En lo que respecta al cálculo del volumen de explotación desglosado en el documento DGA (2011), es importante destacar dos puntos. En primer lugar, el estudio DGA (1995) determina un volumen susceptible de explotar sólo considerando la situación del acuífero al año 1995, es decir, cuando este ya estaba en explotación, habiendo sido extraído un volumen entre los años 1960 y 1995. De esta manera, la proyección realizada del potencial volumen de

explotación a 50 años es desde 1995. Adicionalmente, es importante destacar que en el estudio DGA (2011) se adiciona un volumen complementario al acuífero. En resumen, se estimó un volumen susceptible de ser explotado de 1.378 Mm<sup>3</sup>, desde el año 2011 al año 2061, calculado a partir de un estado dinámico de las aguas subterráneas.

Adicionalmente, según se indica en dicho documento, la demanda actualizada al año 2011 para la Pampa del Tamarugal es de 131 Mm<sup>3</sup> al año (4.142 l/s), equivalentes a 6.531 Mm<sup>3</sup> en un horizonte de 50 años. De acuerdo a esto, el volumen determinado como sustentable por la DGA para ser explotado se agotaría en aproximadamente 10 años, a partir del año 2011. Es decir, la demanda comprometida es excesivamente superior a la oferta definida como sustentable para el acuífero por la DGA. Conforme a los antecedentes expuestos, en el Cuadro 7-6, se comparan los volúmenes de explotación determinados por ambas metodologías (DGA (2011) y la del presente informe).

**Cuadro 7-6 Resumen Volumen Extraído en Pampa del Tamarugal en Estudios (Mm<sup>3</sup>)**

Estudio	Caso	Horizonte de Evaluación			Total	Demanda 2011 - 2061
		1960 - 2016	2011 - 2061	2017 - 2066		
Hídrica Consultores	CAT + CFT-25%E2	1.911	-	1.354	3.265	5.427
DGA (2011)	Actualización	-	1.378	-	1.378	6.531

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que la nueva metodología considera que el volumen a extraer en el horizonte de evaluación cumple con las restricciones de servicios ecosistémicos, y considera lo extraído antes del año 2016. Además, esta nueva metodología considera la espacialidad de la explotación. Con esta nueva metodología se pueden definir nuevos escenarios para los cuales se analicen distintas ubicación para la explotación, y tal que los servicios ecosistémicos se cumplan. Una posible redistribución de la explotación debiera evitar la cercanía a las zonas sensibles del sistema, representadas por las restricciones ecosistémicas y debiera buscar la intercepción de los flujos de salida. Así, una distribución específica debiera ser planteada en futuros estudios dependiendo de la disposición y alcance práctico de realizar estas modificaciones.

#### **k) Brechas**

Durante el proceso de generación e implementación de la metodología propuesta, se identificaron debilidades y rangos de incertidumbre en la información con la cual caracterizar el sistema hídrico del acuífero Pampa del Tamarugal. Las principales brechas identificadas que impiden alcanzar un mayor ajuste o detalle en la caracterización de la pampa se detallan a continuación:

- **Monitoreo de Niveles**

La red de monitoreo de niveles freáticos que posee la DGA en el acuífero de la pampa presenta sectores en los cuales no existe la información necesaria para una calibración con mayor detalle del modelo numérico. La Figura 7-6 presenta los pozos de monitoreo suspendidos y vigentes junto a los sondajes habilitados para piezómetros en las quebradas de Tarapacá (DGA (2014)) y Chacarillas. Se estima que el sector desde la quebrada de Tarapacá hacia el norte junto al sector sur-este por la quebrada de Chacarillas, debieran ser considerados en futuros estudios para la implementación de nuevos piezómetros. El sondaje habilitado dentro de las actividades del presente estudio, es un aporte al monitoreo del sector de la quebrada Chacarillas, sin embargo, se recomienda explorar a más de 100 metros de profundidad.

- **Delimitación Superficie Salares y Tamarugos**

Los salares y tamarugos han sido definidos como las principales restricciones ecosistémicas de la pampa. La dinámica de flujos asociada a cada uno de ellos, por medio de los caudales de evaporación y evapotranspiración, depende directamente de la superficie representada en el modelo. Por lo tanto, una correcta definición de la superficie abarcada por ambos elementos es importante en la determinación de la sustentabilidad del sistema acuífero.

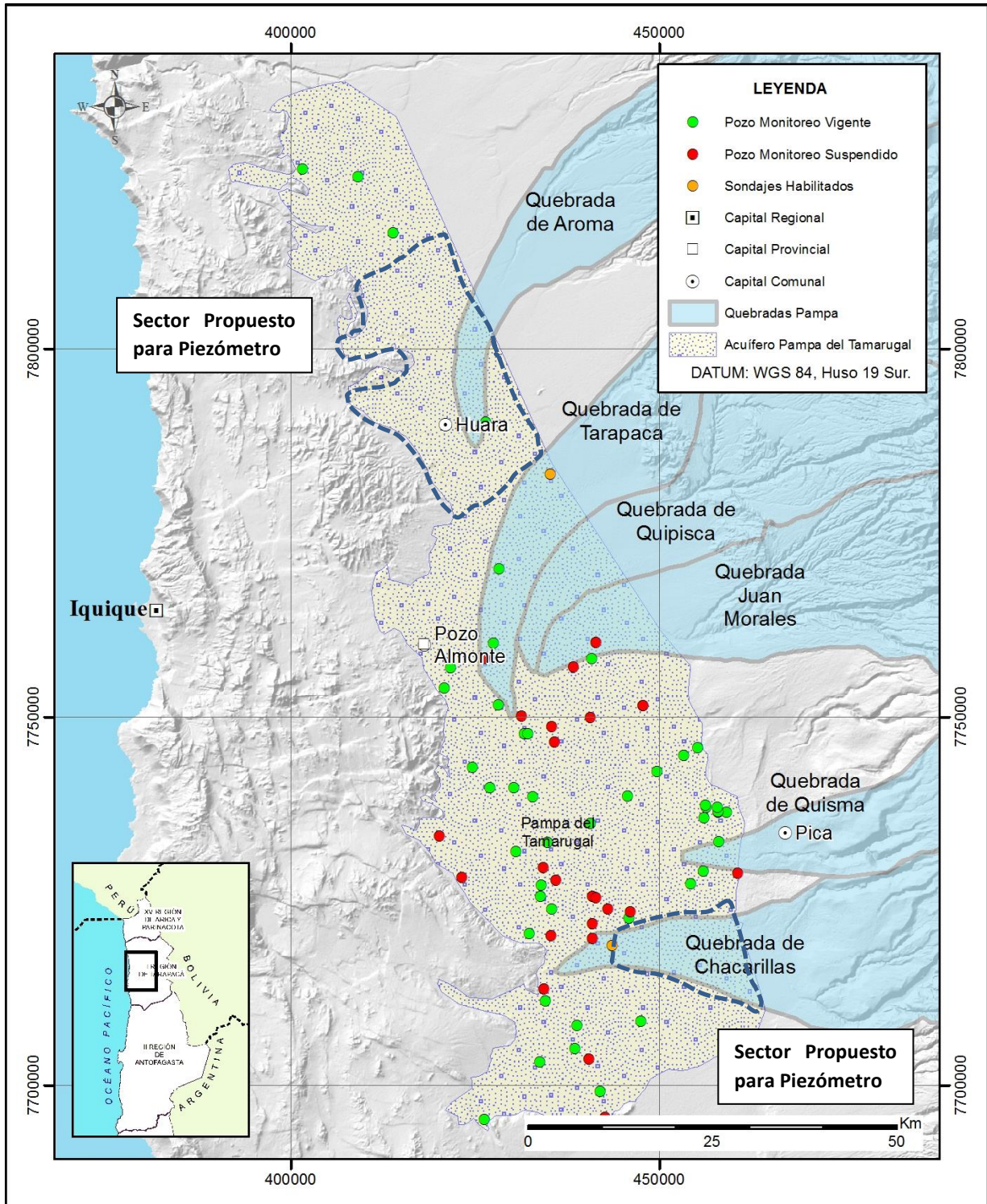
La delimitación existente en DGA (2016) presenta una superficie mayor a la que actualmente es posible observar mediante imágenes satelitales. De esta manera, se propone como actividades a desarrollar dentro de los futuros trabajos de la DGA, un levantamiento para la actualización de la delimitación de los sectores de plantaciones y salares.

A su vez, la actualización de dichas superficies, debiera ser complementada con un nuevo estudio de los procesos evapotranspirativos y de evaporación.

- **Caudales de Explotación**

Los caudales de explotación utilizados en el presente trabajo provienen de una estimación realizada por la oficina regional de la DGA. Sin perjuicio de aquello, se recomienda realizar un catastro de pozos que actualice la información de dicha infraestructura de bombeo y además, identificar explotaciones ilegales.

La actualización de la información también se refiere a la empresa Aguas del Altiplano, que corresponde al mayor usuario del acuífero y representa el abastecimiento de la población cercana.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-6 Estaciones de Monitoreo Niveles Freáticos y Sectores Propuestos para Nuevos Piezómetros**



---

## CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

A partir de la información revisada y generada en el presente informe, se desglosan las siguientes conclusiones y comentarios.

### A. CRITERIOS Y DEFINICIÓN DE ACUIFEROS-GVBR

- Se revisó una extensa base de antecedentes elaborados por y para la DGA, junto a estudios desarrollados tanto por instituciones públicas y privadas, universidades y personas naturales.
- Se identificaron 65 acuíferos entre la XV y IV región de Chile, a los cuales se asoció una base de datos con parámetros característicos de los acuíferos.
- Mediante la aplicación de la metodología multicriterio se identificó al acuífero de la Pampa del Tamarugal como el único acuífero-GVBR.
- Es importante destacar que, de acuerdo a la información revisada, no hay una metodología estándar para la identificación del concepto de acuíferos de gran volumen y baja recarga. En particular, los estudios hacen referencia a las características físicas de acuíferos de gran volumen. Sobre esta información, se creó una metodología multicriterio, a partir de la cual se estableció un ranking de priorización de acuíferos con distintas jerarquías.

### B. TRABAJOS DE TERRENO

- Se realizaron 50 calicatas de 3 metros de profundidad, con maquinaria del tipo retroexcavadora, distribuidas en las quebrada Aroma, Tarapacá, Quipisca, Tambillo y Chacarillas. En cada una se realizaron perfiles estratigráficos, ensayos de infiltración doble anillo y muestras de suelo para análisis de laboratorio. Estos trabajos sirvieron para incorporar franjas de infiltración en el modelo conceptual, y así determinar la recarga al sistema acuífero por efecto de en eventos de crecidas extremas que se depositan sobre los conos de deyección en la pampa.
- Se realizó la perforación de un sondaje de 100 metros lineales en el sector de la quebrada Chacarillas, mediante un equipo de perforación diamantina en un diámetro HQ. En éste

se ejecutaron pruebas Lefranc y se extrajeron muestras para su análisis granulométrico. Mediante su ejecución, se obtuvo un perfil litológico que sirvió para la caracterización de las unidades geológicas-hidrogeológicas en el sector, y como data de permeabilidad asociada a la unidad definida. Adicionalmente, el sondaje fue habilitado como piezómetro de manera que sea incorporado a la red de monitoreo de la DGA.

- Se realizó un estudio geofísico, mediante la técnica de Transiente Electromagnético (TEM) y gravimetría. Para esto, se realizaron 270 estaciones TEM distribuidas en 9 perfiles definidos a partir de la información recopilada. Asimismo, se realizaron 3 perfiles gravimétricos, concordantes con perfiles TEM. Mediante la interpretación hidrogeológica de los trabajos geofísicos, se definieron 5 unidades geológicas-hidrogeológicas. Esta información se comparó con la data del estudio SERNAGEOMIN (2016), donde también se definieron unidades hidrogeológicas, habiendo correspondencia entre ellas. En síntesis, el acuífero de la pampa, para la escala de trabajo de este estudio, es una sola gran unidad sedimentaria acuífera, limitada inferiormente por un basamento rocoso pre-Terciario. También se logró corroborar la divisoria del escurrimiento subterráneo que ocurre en el sector norte del sistema.

### **C. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR SUSTENTABILIDAD**

- Al aumentar la explotación artificial en un sistema acuífero el flujo natural de salida disminuye debido a la intercepción que genera la explotación. Asimismo, puede incrementarse el flujo de entrada al sistema debido a la inducción que produce la extracción.
- Es posible determinar distintos escenarios de explotación sustentable, inferiores al máximo, que requerirían menos captura o inducción de flujo de entrada y flujo de intercepción que la que el sistema de aguas subterráneas potencialmente puede proporcionar.
- A partir de las condiciones que determinen el estado de un sistema acuífero, existen diferentes restricciones para la aplicación de la metodología, que pueden ser: requerimientos medio ambientales, ecológicos, de calidad de aguas, entre otros.
- Se desarrolló una metodología para determinar la sustentabilidad de sistemas subterráneos, basada en relaciones físicas que determinen la dinámica de flujo. Para esto, se plantea la implementación de modelos numéricos que permiten desagregar espacial y temporalmente el sistema acuífero.

- En términos generales, la aplicación de la metodología propone la verificación de la sustentabilidad de flujo, junto con el cumplimiento de las restricciones que se establezcan en un sistema acuífero.
- La metodología propuesta busca determinar un caudal de explotación tal que se satisfagan las condiciones de sustentabilidad y al mismo tiempo las restricciones ecosistémicas.
- Es importante destacar que de acuerdo a lo planteado en el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de los Recursos Hídricos (DGA, 2008b), la constitución de derechos de aprovechamiento, contempla como límite máximo la recarga del acuífero, más un 5% del volumen embalsado en 50 años. De acuerdo a la metodología expuesta en el presente estudio, que considera la intercepción y captura de flujo para satisfacer la explotación sustentable, el límite máximo de derechos podría superar el 5% mencionado, siempre que se cumplan las condiciones de flujo sustentable y satisfacción de restricciones.

#### **D. MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL**

- En base a la información geológica, hidrológica e hidrogeológica recopilada y generada en terreno, se logró desarrollar un modelo conceptual de la Pampa del Tamarugal, con el cual se generó nuevos conocimientos sobre el funcionamiento del sistema hídrico. Asimismo, sirvió de base para la elaboración de un modelo numérico.
- El dominio del modelo se definió teniendo en cuenta las delimitaciones realizadas en estudios anteriores (y modelos numéricos), además de la información generada en terreno.
- El complemento de revisión de antecedentes con la interpretación de los trabajos de geofísica realizados para el presente estudio, permitieron definir una sola gran unidad acuífera freática limitada inferiormente por un basamento pre-Terciario.
- El modelo conceptual considera flujos de entrada subsuperficiales y subterráneos principalmente en las quebradas de Aroma, Tarapacá, Quipisca, Juan Morales, Quisma y Chacarillas. El flujo subterráneo de salida se encuentra en la zona sur, descargando hacia el salar Sur Viejo. Asimismo, existe una gran componente evaporativa proveniente de los salares de Pintados y Bellavista, y evapotranspirativa desde las plantaciones de tamarugos y algarrobales.
- No existe una recarga efectiva por precipitación en el sector. Las precipitaciones que ocurren en la parte alta generan flujos intermitentes en los cursos superficiales que se

infiltran directamente, formando escorrentía subsuperficial y subterránea que baja hacia el acuífero de la Pampa del Tamarugal. Estos flujos generan la principal fuente de recarga en el sistema acuífero desde su límite oriental.

- Los trabajos en terreno permitieron profundizar el análisis sobre los mecanismos de recarga en el sector denominado abanicos fluviales. Esta recarga ocurre cuando el caudal de crecida no se infiltra por completo en el cauce de las quebradas, es decir la recarga por flujo subsuperficial a la pampa, lo cual se determinó que ocurre para crecidas con periodo de retorno superior a 100 años. La construcción de calicatas en este sector, permitió definir bandas de infiltración con las cuales determinar el volumen de recarga asociado a este evento de precipitación extrema. Cabe destacar que, según este análisis, las recargas por este concepto serían mucho menores que las que provienen de las quebradas orientales (como flujo subterráneo). Esto era materia de duda hasta antes del presente estudio.
- Las principales áreas definidas de evaporación corresponden a los salares de Pintados y Bellavista. De acuerdo a la caracterización realizada, la profundidad de extinción se estimó en 8,5 metros. Asimismo, las principales áreas evapotranspirativas se ubican al norte del salar de Pintados. Según la información recabada, profundidades sobre 20 metros del nivel freático provocan un stress hídrico a las plantaciones que les provocarían la muerte.
- La información disponible permitió construir un modelo numérico de la Pampa del Tamarugal, utilizando el modelo Visual MODFLOW v2010.1.
- La extensión espacial del modelo, se definió de tal manera de disponer de secciones de control en las cuales imponer condiciones de borde naturales.
- Como condiciones de borde se consideraron niveles conocidos de nivel del agua subterránea; el módulo ETS de Visual MODFLOW, para caracterizar el flujo evaporado desde la superficie de los salares y evapotranspirado desde las plantaciones de tamarugos y algarrobos; y pozos de inyección para simular la recarga de las quebradas aportantes.
- Para la calibración del modelo se consideró régimen permanente de flujo (CNP), en una situación histórica de flujo asociada a la década de 1960, según la información recabada. El ajuste obtenido entregó un rango válido de permeabilidades, mientras que se cumplieron los principales criterios de precisión del modelo (RMS < 5% y Error de Balance < 1%). Asimismo, la calibración del modelo en régimen transiente (CAT) entre los años 1960 y 2016, fue satisfactoria, observándose en términos generales, un buen ajuste de los niveles y de su tendencia en el tiempo. El balance hídrico obtenido asegura el correcto

funcionamiento numérico del modelo, ya que el error de éste en términos promedio para el periodo de calibración es muy bajo y similar al obtenido en el modelo permanente.

- Así, los modelos CNP y CAT fueron capaces de representar la dinámica de las aguas subterráneas presentes, según lo establecido en el modelo conceptual, considerándose herramientas confiables y que representan especialmente al acuífero existente.
- En lo que respecta a la condición actual transiente, modelo CAT, se incorporó la información de niveles de un catastro más extenso que el caso permanente, abarcando de mejor manera la distribución espacial del dominio del modelo. Sin embargo, el sector norte de todos modos presenta sectores sin información puntual de nivel freático, al igual que parte del sector suroriente. En el resto del dominio, se observa un buen ajuste de los niveles y de su tendencia en el tiempo. Asimismo, en el balance hídrico se observa que el error de éste en términos medios para el periodo de calibración es muy bajo y similar al obtenido en el modelo permanente. Lo anterior, indica la necesidad de desarrollar estudios que permitan generar información de niveles freáticos en el sector norte y oriente del dominio del modelo.
- El modelo implementado calcula de manera anual la descarga evapotranspirativa y evaporativa, a partir de la profundidad al nivel freático en los sectores asignados como plantaciones o salares, respectivamente. Esta implementación significa una mejora considerable respecto de modelos como PRAMAR (2008) y SERNAGEOMIN (2016), en los cuales esta variable se incorpora como descargas independientes de la variabilidad del nivel freático en su escala temporal.
- A pesar de lo anterior, se considera prudente realizar una nueva investigación del fenómeno evapotranspirativo en lo que respecta al cálculo del NVDI, similar al realizado en PRAMAR (2008), de manera de mejorar el ajuste de las curvas evapotranspirativas implementadas en los modelos. Del mismo modo, con una mejor interpretación y sectorización de las plantaciones en la Pampa del Tamarugal, en función de la edad de los tamarugos, se podría refinar el cálculo evapotranspirativo con una mejor distribución de los sectores en el modelo.
- En lo que respecta a la delimitación espacial de los salares, obtenida desde la Mapoteca DGA (2016), esta no es del todo exacta, pues no coincide de manera precisa con las imágenes satelitales y modelos de elevación digital utilizados. Lo anterior, indica la necesidad de desarrollar estudios y trabajos de terreno que permitan generar una delimitación fidedigna de estos sectores de descarga.
- En relación a los caudales de explotación en el modelo CAT, estos se incorporaron mediante factores de uso sobre los derechos otorgados en las instalaciones sanitarias.

Este criterio se consideró debido a la falta de información respecto del uso real actual de los caudales explotados, especialmente para el caso de Aguas del Altiplano. Conforme a esto, se recomienda realizar un nuevo catastro de terreno para toda la pampa, para levantar estas brechas de información.

- Complementando lo anterior, a pesar de que se utilizó la base de derechos registrados en la DGA, la cual se considera confiable en la estimación de la demanda hídrica, se podría realizar un catastro en terreno de las sentencias que la DGA no tiene incorporadas en sus registros. De esta manera, se contaría con una estimación más fidedigna de los derechos vigentes hoy.

#### **E. APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE SUSTENTABILIDAD**

- Se aplicó la metodología de sustentabilidad en la Pampa del Tamarugal mediante la utilización de tres modelos numéricos, definidos por sus condiciones de flujo: natural permanente (CNP), transiente actual (CTA) y transiente futuro (CTF).
- Mediante la revisión de antecedentes y la realización de entrevistas a departamentos gubernamentales dependientes de la DGA y el SERNAGEOMIN, se definieron restricciones ecosistémicas de la Pampa del Tamarugal. Se consideraron los servicios ecosistémicos de tamarugos y salares, la variación de niveles freáticos en zonas de producción y variabilidad de precipitaciones.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, en la situación actual el sistema no se encuentra en equilibrio, con un claro descenso constante de los niveles freáticos en el acuífero. Asimismo, sí cumple las restricciones establecidas para los servicios ecosistémicos que pueden ser evaluadas en el modelo CAT. Por lo anterior, la explotación actual de la pampa implica que el sistema se encontraría en vías de un equilibrio sustentable de largo plazo, o que definitivamente se encuentra minando sus recursos hídricos almacenados, lo cual es un escenario no sustentable, pero satisfaciendo temporalmente las restricciones ecosistémicas.
- Se debe tener en consideración que, a pesar del incremento de la superficie de plantación, la tendencia del flujo evapotranspirado en el periodo 1960-2016 es descendente, pues la explotación del sistema induce una depresión de los niveles que afecta al sector del salar y las plantaciones. Si bien en la actualidad se cumplen las restricciones asociadas a los servicios ecosistémicos, es importante notar que el stress al que se ha sometido el sistema ha inducido un constante descenso de los niveles, y que podría reducir su área de plantación.

- Se implementaron 4 escenarios para dar cuenta de diferentes explotaciones y recargas en el sistema como situaciones futuras. De esto, se puede concluir que la explotación de la totalidad de los derechos otorgados al 2016, con factor de uso y proyección de demanda, generan un escenario de desequilibrio al año 2066 en los modelos CFT. Esto se verifica por la tendencia de descenso en distintos puntos del sistema y por la utilización del almacenamiento para complementar la demanda de la extracción en el horizonte de evaluación.
- Asimismo, ninguno de los 4 escenarios de los modelos CFT cumple las restricciones de servicios ecosistémicos de tamarugos y salares y variación de niveles freáticos. Por lo tanto, mediante este análisis y distribución espacial de la explotación, se estima que los derechos actualmente otorgados no cumplen con la sustentabilidad del sistema acuífero de la Pampa del Tamarugal.
- En busca de cumplir con la sustentabilidad de la pampa, se analizaron distintos escenarios de explotación en el modelo CFT, reduciendo en forma discreta el caudal de explotación para cada pozo. Finalmente se fijaron dos escenarios de reducción de caudal, CFT 25%E2 y CFT 10%E2, correspondientes al 25% y 10% del caudal total de derechos otorgados hasta 2016.
- Considerando que el principal poseedor de derechos corresponde a una empresa sanitaria, que no puede ver reducida su explotación por abastecer a la población, los escenarios definidos pueden presentarse poco prácticos. Sin embargo, éstos apuntan a la espacialidad de las extracciones en las zonas sensibles del modelo y la determinación del caudal de bombeo sustentable en estos sectores. De esta forma se busca introducir la discusión respecto al manejo y posibilidad de modificar la configuración espacial de los pozos mediante políticas públicas de administración de los recursos hídricos direccionadas a proteger los servicios ecosistémicos.
- Como resultado final, **bompear un 25% de los derechos otorgados al año 2016**, no cumple sustentabilidad de flujo en el horizonte de evaluación, pues se observan descensos no estabilizados en el sistema. El volumen explotado desde la situación en equilibrio del sistema, hasta el horizonte de evaluación, equivale a un 6,4% del potencial volumen de almacenamiento con el que contaría la Pampa del Tamarugal. En este caso, se produce un desembalse promedio de 550 l/s en el periodo de evaluación, ya que el sistema debe sustentar en parte la explotación. Conforme a esto, es probable que en este escenario el **sistema se encuentre en un escenario de manejo no sustentable de flujo, con minado parcial de sus recursos hídricos, pero que cumple las restricciones en el horizonte de evaluación.**

- Complementariamente, **explotar un 10% de los derechos otorgados al año 2016**, cumple con la sustentabilidad de flujo en el horizonte de evaluación, pues se observan descensos estabilizados en el sistema. El volumen explotado desde la situación en equilibrio del sistema, hasta el horizonte de evaluación, equivale a un 4,8% del potencial volumen de almacenamiento con el que contaría la Pampa del Tamarugal. Esta extracción permite al volumen de almacenamiento regular el sistema en el horizonte de evaluación, desembalsando en promedio solo 100 l/s. De este modo, el **sistema se encuentra en un escenario de manejo sustentable de flujo, que cumple las restricciones en el horizonte de evaluación**. Considerando el horizonte de evaluación de 50 años y la tasa de bombeo sustentable de 344 l/s, correspondiente al 10% de los derechos, el **volumen susceptible equivale a 543 Mm<sup>3</sup>**.
- La implementación de los escenarios CFT ha dejado de manifiesto la importancia de mejorar la delimitación de los sectores que definen las restricciones ecosistémicas. A su vez, se podría mejorar la modelación del funcionamiento de las descargas naturales (plantaciones y salares) en forma local, las que interactuarían con el modelo regional ya desarrollado, junto con un refinamiento de la malla en cada sector.
- Complementando lo anterior, de contar con información de la demanda proyectada por la empresa sanitaria, se podría analizar un nuevo escenario considerando esta proyección para el periodo 2017-2066. Esta información se solicitó en reiteradas ocasiones en el transcurso del estudio, sin embargo no se obtuvo respuesta por parte de la sanitaria.
- Asimismo, los modelos CFT se realizaron contemplando la actual ubicación y delimitación de los sectores de plantaciones. En este sentido, el modelo puede ser mejorado, una vez se tenga un levantamiento actualizado de dichos sectores de plantaciones, y sus proyecciones futuras.
- Dentro de los modelos construidos no se considera una estimación de las extracciones ilegales. Sin embargo, el modelo CFT E2, considera un bombeo constante proyectado a 2017-2066 sin considerar factor de uso. De acuerdo a los registros de la oficina DGA de la I Región, se estima que en la actualidad se utilizan 2.441 l/s de 3.422 l/s en derechos otorgados, lo cual corresponde al 71%. De esta manera, el modelo CFT E2 considera aproximadamente 1 m<sup>3</sup>/s extra de caudal sobre la situación actual, lo cual representa un escenario muy desfavorable y en el cual las extracciones sin título podrían considerarse incluidas.
- Es importante destacar que la implementación de los escenarios CFT 25%E2 y CFT10%E2 indica que son situaciones sustentables. Sin embargo, estas soluciones no son las únicas, en futuros estudios se podría analizar, por ejemplo, una reubicación o redistribución de los sectores de bombeo, alejándolos de las zonas sensibles (plantaciones y salares). Lo



anterior se puede abordar una vez que se desarrollen los estudios recomendados según las brechas identificadas.

## **F. COMENTARIOS GENERALES**

- Es importante notar que la recarga del sistema hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal se debe principalmente a las precipitaciones en la alta cordillera. Sin embargo, éstas son una variable externa e independiente del grado de explotación del acuífero, y por lo tanto no dependen del estado del sistema acuífero. Además, para la Pampa del Tamarugal, la extracción de agua si puede provocar un efecto de intercepción, es decir, de captura o reducción de las descargas naturales del sistema: evaporación, evapotranspiración y salida subterránea hacia salar Sur Viejo.
- Complementariamente, las restricciones de servicios ecosistémicos establecidas son limitantes, pues tienen relación con la sobrevivencia de especies vegetativas. En este aspecto, la implementación de un aumento en la explotación del sistema es sumamente sensible, pues genera inmediatamente un descenso en los niveles freáticos que no da margen para aprovechar de mejor manera la intercepción.
- En un sistema acuífero de GVBR, el almacenamiento juega un rol fundamental en la regulación de las demandas productivas y naturales. Por lo tanto, la búsqueda de un escenario de explotación sustentable debe considerar un desembalse de igual forma sustentable.
- La metodología implementada fue contrastada con la utilizada para la Pampa del Tamarugal correspondiente a la otorgación de un 5% del volumen almacenado, tal como se indica en DGA (2011). Al respecto destacan los siguientes puntos:
  - La metodología de sustentabilidad propuesta se apoya en la implementación de modelos numéricos, que dan cuenta de la dinámica de las aguas subterráneas. A partir de ésta, se puede desprender que, desde la situación de equilibrio natural del año 1960, hasta una proyección a 50 años, 2066, el almacenamiento del acuífero es utilizado para cubrir la demanda existente por sobre la oferta.
  - La metodología considera el cumplimiento de la sustentabilidad del flujo, así como cumplir las restricciones de servicios ecosistémicos.
  - Según el criterio actual de la DGA, se considera como sustentable extraer el 5% del volumen almacenado en el acuífero en un plazo de 50 años, sin considerar el cumplimiento de restricciones ecológicas.
  - Asimismo, el estudio DGA (1995) determinó para la Pampa del Tamarugal un volumen susceptible de explotar sólo considerando la situación del acuífero al año 1995, es decir, cuando este ya estaba en explotación, habiendo ya sido extraído un volumen entre los

años 1960 y 1995. De esta manera, la proyección realizada del potencial volumen de explotación a 50 años se realizó tomando un escenario disminuido que no estaba en equilibrio.

- En términos generales, la metodología del 5% no considera restricciones de servicios ecosistémicos, ni asegura la sustentabilidad de flujo en el sistema acuífero en el tiempo. Asimismo, no toma en cuenta si el sistema está en equilibrio o, el grado de intervención histórico que ha tenido.
  - Con la nueva metodología, se pueden definir escenarios para los cuales se consideren distintas distribuciones de las extracciones, y tal que los servicios ecosistémicos se cumplan. Una posible redistribución de la explotación podría considerar el evitar la cercanía a las zonas sensibles del sistema, representadas por las restricciones ecosistémicas, y así evitar la intercepción de los flujos de salida. Conforme a esto, una distribución específica debiera ser planteada en futuros estudios, aunque teniendo en cuenta las restricciones prácticas, económicas y legales de efectuar dichas modificaciones.
  - El volumen estimado según la metodología propuesta (considerando que cumple las restricciones de servicios ecosistémicos, pero no la sustentabilidad de flujo en el horizonte de evaluación, escenarios CAT + CFT-25%E2), es parecido al calculado en DGA (2011) para periodos comparables. Sin embargo, la nueva metodología considera que el volumen a extraer en el horizonte de evaluación cumple con las restricciones de servicios ecosistémicos, y además toma en cuenta la historia anterior, o lo extraído antes del año 2016.
- Es evidente que los volúmenes estimados para ambas metodologías son inferiores a los derechos constituidos, lo cual indica el alto grado de sobreexplotación al que se está sometiendo el acuífero de la Pampa del Tamarugal. Esta condición podría generar el no cumplimiento de las restricciones ecosistémicas.
  - La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) el año 2016 ha planteado al país en su Segunda Evaluación de Desempeño Ambiental:

*“Implementar nuevas reformas al régimen de asignación de aguas, con el fin de asegurar la imposición de límites efectivos y exigibles a las extracciones, que reflejen las exigencias ambientales y ecológicas y las necesidades de un uso sostenible”*

Para ello, la OCDE propone adoptar un enfoque basado en riesgos para la gestión de los recursos hídricos, concebir e implementar un nuevo régimen de asignación de aguas y desarrollar una estrategia para evitar la asignación excesiva en cuencas y acuíferos donde asignaciones de derechos excedan su capacidad sostenible.

- Cabe destacar el uso del término “sostenible” por parte de la OCDE, el cual se sugiere comenzar a incorporar en futuros estudios a cambio de “sustentable”. Sostenible se refiere a que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente, no así sustentable que refiere a defender con razones.
- Es importante mencionar que la metodología es completamente aplicable a cualquier otro acuífero que se desee analizar.
- Como toda metodología, su grado de aplicación y bondad de ajuste depende de la calidad de la información base suministrada, procesada o generada de trabajos de terreno.
- Durante el desarrollo de este estudio, las principales brechas y necesidades identificadas fueron:
  - Generar un nuevo catastro de pozos en terreno, levantando información de las extracciones reales actuales;
  - Incorporación de nuevos puntos de monitoreo de niveles de agua subterránea para los sectores hacia el norte de la quebrada Tarapacá, y el sector sur-este de la quebrada de Chacarillas (Figura 7-6);
  - Actualizar la delimitación de los sectores de plantaciones y salares;
  - Nuevas investigaciones que permitan profundizar el fenómeno de la evapotranspiración, ajustando su evaluación en función de la edad y tipo de los árboles frente a la profundidad del nivel freático.
- Conforme a lo anterior, el desarrollo de nuevos estudios y trabajos de terreno pueden generar información que complementarían el modelo conceptual definido en este estudio. Asimismo, esta nueva información podría refinar los modelos numéricos ya implementados, que quedarán a disposición del DEP, pudiendo realizarse mejoras para los propósitos que se estimen convenientes.