



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

DIAGNÓSTICO Y CLASIFICACIÓN DE SECTORES ACUÍFEROS

INFORME EJECUTIVO DE DIFUSIÓN

**REALIZADO POR:
GEOHIDROLOGÍA CONSULTORES LTDA.**

SANTIAGO, JULIO 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar Ch.**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.**

**Jefa Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos
Ingeniero Sra. Mesenia Atenas V.**

**Inspector Fiscal
Ingeniero Sra. María Eugenia Molina L.**

GEOHIDROLOGÍA CONSULTORES LTDA.

**Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Sr. José Muñoz P.**

**Especialistas
Ingeniero Civil Sr. José Muñoz P.
Ingeniero Civil Sr. Pablo Rengifo O.
Ingeniero Agrónomo Sr. Cristian Ortiz A.
Geóloga Sra. Laura Vitòria C.**

**Profesionales:
Ingeniero Civil Sr. Carlos Vásquez G.
Ingeniero Civil Sr. Nicolás Ramírez N.
Geógrafo Sr. Rodrigo López A.
Ingeniero Civil Sr. Pedro Sanzana C.
Geólogo Sr. Felipe García-Huidobro C.**

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
2	RESUMEN DEL ESTUDIO.....	2
2.1	METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS.....	2
2.1.1	Esquema general de la metodología.....	2
2.1.2	Cálculo de índice de calidad.....	5
2.1.3	Análisis temporal del índice de calidad.....	11
2.1.4	Análisis estadístico para determinar el origen de los compuestos disueltos.....	12
2.2	APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS.....	13
2.2.1	Sector acuífero El Loa.....	13
2.2.2	Sector acuífero Los Choros.....	16
2.2.3	Sector acuífero Aconcagua.....	19
2.3	INSTRUMENTOS PARA LA PROTECCIÓN DE LA CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	21
2.3.1	Aproximación de las medidas de protección en sectores acuífero estudiados.....	22
2.4	PROPUESTA DE MONITOREO DE LA RED DE MEDICIÓN DE LA DGA.....	33
3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
3.1	CONCLUSIONES DEL PROYECTO.....	37
3.1.1	Desarrollo de la metodología.....	37
3.1.2	Instrumentos de protección.....	39
3.1.3	Red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas.....	41
3.2	RECOMENDACIONES DE TRABAJOS FUTUROS.....	42
4	BIBLIOGRAFÍA.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema y diagrama de flujo de la metodología.	4
Figura 2.2: Índice de calidad general para el sector acuífero El Loa.	15
Figura 2.4: Índice de calidad general para el sector acuífero Aconcagua.	20
Figura 2.5: Captaciones subterráneas y fuentes potenciales de contaminación sector acuífero El Loa.	25
Figura 2.6: Captaciones subterráneas y mapa de índice de calidad sector acuífero Los Choros.	27
Figura 2.7: Vulnerabilidad sector acuífero Los Choros.	28
Figura 2.8: Captaciones subterráneas, fuentes potenciales de contaminación y resultados de la metodología en sector acuífero Aconcagua.	30
Figura 2.10: Vulnerabilidad sector acuífero Aconcagua.	32
Figura 2.11: Propuesta de muestreo sector acuífero El Loa.	34
Figura 2.12: Propuesta de muestreo sector acuífero Los Choros (sector costero).	35
Figura 2.13: Propuesta de muestreo sector acuífero Aconcagua.	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Criterios para establecer el IC general.	9
Tabla 2.2: Reclasificación temporal de la calidad química de aguas.	11
Tabla 2.3: Origen principal de parámetros en sector acuífero El Loa.	16
Tabla 2.4: Origen principal de parámetros en acuífero Los Choros.	18
Tabla 2.5: Origen principal de parámetros en sector acuífero Aconcagua.	21

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La creciente demanda de agua asociada al desarrollo económico del país, provoca efectos sobre los sistemas hídricos no sólo en su disponibilidad sino que también en su calidad.

Actualmente, existe una intensa explotación de las aguas subterráneas, la que puede provocar el deterioro de su calidad por diferentes causas, entre ellas intrusión salina, contaminación difusa, etc. Además, la intensidad del re-uso del recurso implica un potencial deterioro de la calidad del agua de recarga a los acuíferos, incorporándose elementos potencialmente nocivos tales como fertilizantes, pesticidas, metales, lixiviación de suelos, etc.

En este contexto, la DGA licitó el estudio de “Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos” en búsqueda de desarrollar las bases para la caracterización, en términos de calidad química, de los recursos hídricos subterráneos, además de desarrollar metodologías que permitan proponer cuerpos normativos respecto a la protección dichos recursos.

De acuerdo a lo anterior, los objetivos generales del proyecto son:

- Desarrollar una metodología que caracterice sectores acuíferos en cuanto a la calidad química de los recursos hídricos subterráneos, estableciendo criterios para su protección.
- Aplicar esta metodología en sectores acuíferos previamente definidos en conjunto con la Autoridad, considerando los niveles de explotación, la calidad química, el riesgo de contaminación que presenten.
- Establecer y validar instrumentos de protección de acuíferos.

El estudio en su conjunto ha sido desarrollado en varias etapas. Primeramente se realizaron los estudios básicos correspondientes a la recopilación de antecedentes y análisis. Luego, en base a estos antecedentes se realizó el desarrollo y aplicación de Metodología de clasificación de sectores acuíferos. Finalmente se propusieron y discutieron los posibles instrumentos de protección de acuíferos de acuerdo a la realidad local. Adicionalmente, y de manera complementaria al desarrollo de la metodología se revisó la red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas de la DGA y se realizó una propuesta de red de monitoreo óptima detallando sus características, para cada uno de los sectores acuíferos en estudio.

2 RESUMEN DEL ESTUDIO

2.1 Metodología de clasificación de acuíferos

La metodología diseñada para la clasificación de acuíferos en cuanto a la calidad de sus aguas, toma como base el análisis de todas las metodologías estudiadas y los antecedentes revisados. Esta metodología se ha desarrollado en base a los siguientes pilares fundamentales:

- El análisis de las concentraciones químicas medidas en el agua subterránea, tanto de parámetros de análisis común como de interés local.
- La comparación de las concentraciones observadas en el agua subterránea con diferentes normas de calidad.
- La generación y representación espacial y temporal de un índice de calidad mediante una herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- El análisis estadístico multivariado para visualizar las agrupaciones y correlaciones de elementos que posiblemente provienen de una misma fuente.

La validación de esta metodología fue realizada a través de su aplicación en los sectores acuífero El Loa, Los Choros y Aconcagua.

2.1.1 Esquema general de la metodología

La Figura 2.1 muestra un esquema general de la metodología, la cual permite por una parte, obtener los mapas de calidad de las aguas del acuífero a partir del cálculo de un índice de calidad (IC) para un instante o período dado, y por otro, determinar la o las fuentes de origen de los distintos parámetros químicos disueltos en ellas. También indica la potencialidad de realizar comparaciones temporales de la calidad en un mismo acuífero.

Para el cálculo del índice de calidad (IC), la metodología necesita obtener mapas de isoconcentración de cada uno de los parámetros químicos involucrados en el cálculo, los cuales representan también resultados parciales de la misma metodología. Estos mapas se utilizan para clasificar la calidad química de cada parámetro químico involucrado en el cálculo (IC individual) según la clasificación propuesta. Esta clasificación presenta un rango de variación continuo entre 0 (mejor) y 5 (peor), dividido en cinco clases de calidad: excepcional,

buena, regular, insuficiente e intratable. Posteriormente, a partir del IC individual se obtiene la calidad global del acuífero, IC general, adoptando criterios adecuados, presentados más adelante (sección 2.1.2.3), que consideren como base aquellos elementos químicos que presentan mayor riesgo para la salud humana. El IC general también toma valores en el rango continuo de 0 a 5, sin embargo su representación espacial es discretizada sólo en 5 clases.

Por otra parte, mediante un análisis estadístico se pretende identificar las fuentes (naturales o antrópicas) que determinan la presencia y/o concentración encontrada de los parámetros químicos en cada sector del acuífero, en base a relaciones existentes entre ellos.

A partir de la combinación de los resultados de cada análisis, tanto químico como temporal y estadístico, se obtienen mapas de la calidad química del acuífero, caracterizadas según su origen y/o tendencia temporal.

Las herramientas de interpolación espacial son uno de los puntos importantes de esta metodología, las que se utilizan para extrapolar a un área extensa las mediciones puntuales observadas de los parámetros de interés. Existen distintos métodos de interpolación que pueden ser utilizados, siempre bajo la hipótesis de que la concentración de los parámetros físico-químicos es continua en el espacio y que posee correlación espacial. El método de interpolación debe ser elegido bajo criterio experto tomando en cuenta al menos los siguientes aspectos:

- Cantidad y ubicación de los puntos muestreados.
- Superficie del acuífero.
- Tamaño de la grilla de interpolación.
- Relación entre los valores de la medición entre muestras cercanas.
- Geometría del acuífero y consideración de barreras naturales hidrogeológicas.
- Consideraciones especiales por diferencias de acuíferos muestreados.

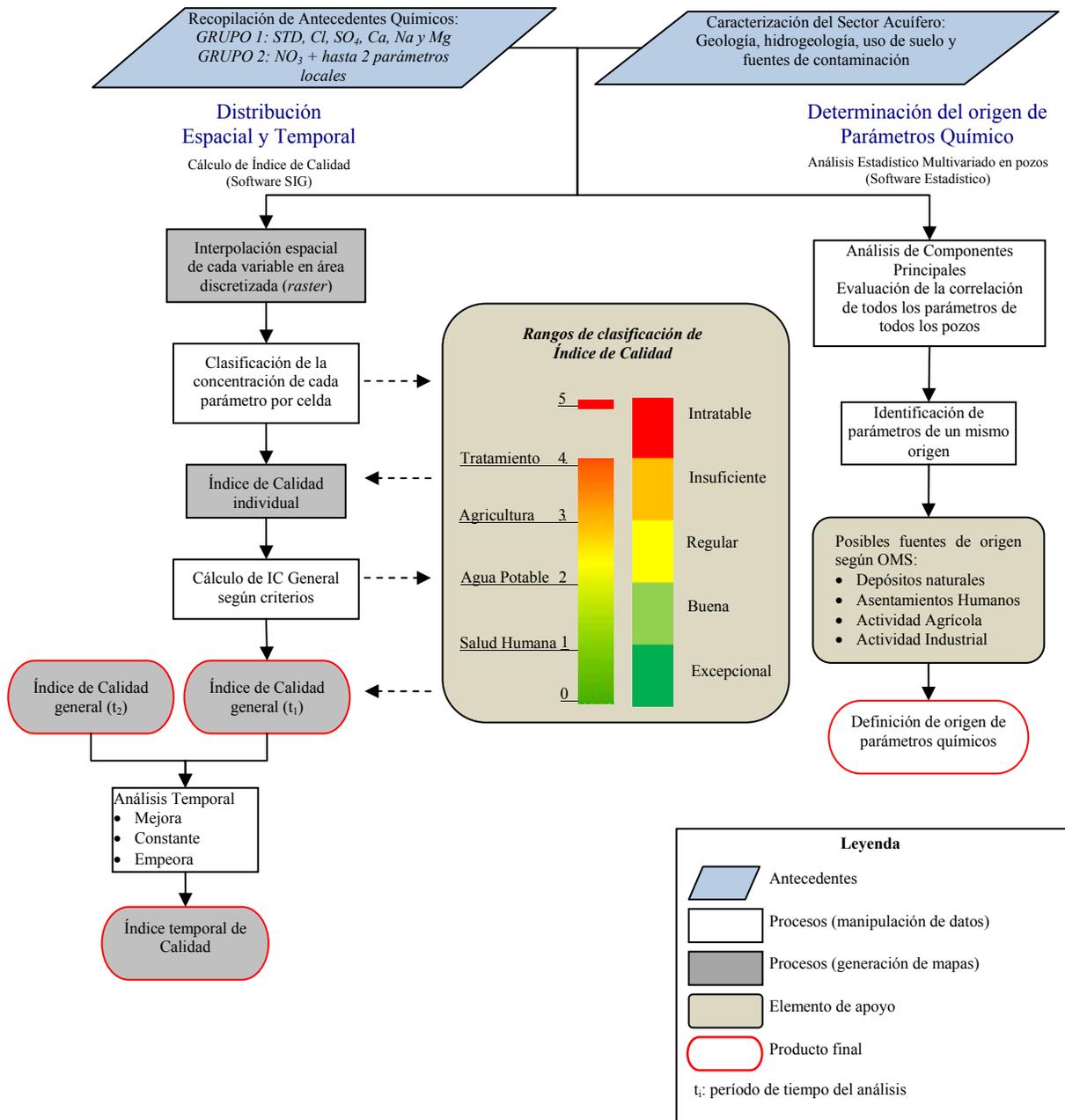


Figura 2.1: Esquema y diagrama de flujo de la metodología.

Otros de los puntos importantes en esta metodología es la elección de los parámetros relevantes a medir. La metodología contempla trabajar con dos grupos de parámetros:

- El primer grupo está conformado por los parámetros químicos Sólidos Disueltos Totales (SDT), Cloruros (Cl), Sulfatos (SO₄), Calcio (Ca), Sodio (Na) y Magnesio (Mg), que corresponden a parámetros comúnmente analizados en cualquier muestra de agua y que además son utilizados en la mayoría de las metodologías internacionales. Estos parámetros se encuentran siempre disueltos en las aguas en forma natural, y el aumento de sus concentraciones puede deberse a efectos antrópicos.
- El segundo grupo está conformado por parámetros químicos que dan cuenta de la singularidad de cada acuífero y está conformado por un máximo de tres parámetros: la concentración de Nitratos (NO₃), más la concentración de dos elementos minoritarios que pueden escogerse en forma libre para cada acuífero, siempre y cuando reflejen las particularidades del mismo, ya sea por causas naturales o antrópicas.

2.1.2 Cálculo de índice de calidad

2.1.2.1 Mapas de isoconcentración

La aplicación de la metodología requiere la generación de mapas de isoconcentración de cada uno de los parámetros en estudio, a partir de una base de datos químicos convenientemente depurada considerando el balance iónico, la temporalidad, unidad hidrogeológica de interés, límites de detección, y chequeo de valores anormales. Los mapas de isoconcentración se generan con herramientas SIG, en base a un método de interpolación espacial, aceptando la hipótesis que las concentraciones de los parámetros físico-químicos son continuas y que están correlacionadas en el espacio.

Posteriormente, cada uno de los mapas es subdividido en un conjunto de celdas regulares (rasterización), conocidas como *raster*, las cuales podrán tener distinto tamaño según la extensión del acuífero que se esté estudiando, su morfología y densidad de puntos con información química.

2.1.2.2 *Índice de calidad individual por parámetro*

Después de generar los archivos en formato *raster* con la concentración de cada parámetro químico obtenido en cada una de las celdas, se procede a la clasificación de cada celda a partir de la escala de valores del índice de calidad.

El índice de calidad (IC) de una celda, para cada uno de los parámetros, se obtiene mediante la interpolación lineal entre las concentraciones límites de cinco clases de calidad (C1, C2, C3, C4 y C5) asociados a los valores de corte (VC1, VC2, VC3 y VC4).

Las cinco clases de calidad corresponden a diferentes condiciones cualitativas de la calidad del agua subterránea, en base a valores de corte o límites provenientes de normativas vigentes y/o recomendaciones sanitarias, tal como se presenta a continuación.

- Valor de corte 1 (VC1) define la concentración máxima de calidad *Excepcional* (C1). Se define en base a recomendaciones de concentración máxima de un parámetro químico, que toma en cuenta la salud humana o bien la aceptabilidad del agua potable dada por su sabor. Por lo tanto, toma concentraciones que aseguran la no afectación a la salud humana o su percepción de las características organolépticas del agua que consume. La referencia principal de este valor son las indicaciones de la Organización Mundial de la Salud respecto a la calidad del agua para consumo humano¹.
- Valor de corte 2 (VC2) define la máxima concentración para la calidad *Buena* (C2). Se define en base a las exigencias sobre las características de concentración máxima permitida en el agua potable por una normativa legal. En este caso, la principal referencia es la normativa chilena respecto a los requisitos del agua potable NCh409 (INN, 2005). En el caso que esta norma no establezca límite para un parámetro de interés se toma como referencia otras fuentes como OMS¹, USEPA², o normas del Consejo de la Unión Europea³ (CE).

¹ Guidelines for Drinking-water Quality de OMS (2006).

² NPDWR y NSDWR, de la USEPA (2009).

³ Directiva 98/83/CE 3 Nov. 1998, del Consejo de la Unión Europea.

- Valor de corte 3 (VC3) define la máxima concentración de calidad Regular (C3). Se define en base a recomendaciones y/o especificaciones de concentración máxima de elementos en el agua subterránea para ser utilizada en la actividad agrícola. La referencia principal proviene de la *Water Quality for Agriculture* de la FAO (1994), sin embargo se considera también la norma chilena de riego, NCh1333 (INN, 1996).
- Valor de corte 4 (VC4) define la máxima concentración de calidad Insuficiente (C4). Se define como la concentración máxima de un cierto compuesto o elemento químico presente en el agua subterránea, de modo que permita ser tratada y alcanzar la calidad de agua potable definida por la normativa establecida. La estimación de este valor depende de las tecnologías de tratamiento disponibles y de su efectividad de remoción de cada parámetro, considerando aspectos técnicos y económicos. Se han considerado dos referencias principales, primero el criterio propuesto por SISS (INN, 2008) para definir el tipo de tratamiento necesario cuando se supera determinado nivel de concentración, y segundo, la clasificación de rangos de efectividad encontrados en la literatura técnica (HAMANN, y otros, 1990; LANKFORD y ECKENFELDER, 1990; PONTIUS, 1996 y MENA, 2007).

La estimación del valor de corte 4 queda establecida por la siguiente ecuación (Ec. 1), en donde el valor límite (VL) es el valor definido para aguas tipo III de acuerdo a la SISS (INN, 2008) o en su defecto el valor para la clase C2, y % Eficiencia Remoción indicado en la Ec. 1, para cada parámetro.

$$C4 = \frac{VL}{1 - \%Eficiencia\ Remoción} \quad \text{Ec. 1}$$

- Los parámetros con concentraciones por sobre valor de corte 4 son clasificados como Intratables (C5). Hay que considerar que al haber adoptado un valor intermedio de remoción para la definición del valor de C4, las aguas de esta clase no se refiere, en términos estrictos, a aguas que no se pueden tratar, sino más bien que el tratamiento requerido para cumplir normativa de agua potable, de ser posible, sería con procesos que aseguren una mayor eficiencia, por lo que probablemente más complejos y costosos.

2.1.2.3 Cálculo del IC general

Una vez que se dispone del IC individual de cada parámetro es posible obtener el IC general del sector acuífero. Se definió que los criterios para definir el IC general dependieran principalmente del IC de los elementos químicos que, de acuerdo a la norma chilena de agua potable vigente, afecten la salud humana (Tabla 2.1), y buscan reflejar que la calidad del acuífero esté definida por el parámetro de peor calidad, de manera de ser consistente con los objetivos de la DGA. Los criterios se presentan en la Tabla 2.2 y se aplican para cada celda del sector acuífero de acuerdo a la interpolación generada (archivo *raster*).

Tabla 2.1: Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud (Tipo II) según NCh409/1Of.2005.

Elementos esenciales	Elementos no esenciales	Sustancias orgánicas	Plaguicidas	Productos secundarios de la desinfección
Cobre	Arsénico	Tetracloroetano	DDT	Monocloroamina
Cromo	Cadmio	Benceno	DDD	Dibromoclorometano
Fluoruro	Cianuro	Tolueno	DDE	Bromodiclorometano
Hierro	Mercurio	Xilenos	2,4-D	Tribromometano
Manganeso	Nitrato		Lindano	Triclorometano
Magnesio	Nitrito		Metoxicloro	Trihalometanos
Selenio	Plomo		Pentaclorofenol	
Zinc				

Fuente: INN (2005).

Tabla 2.2: Criterios para establecer el IC general.

Condición IC individual		Resultado IC general	Expresión
Si existe un parámetro con IC Intratable	→	IC general es Intratable	$\text{Si } IC_{individual} > 4$ $IC_{general} = 5$
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente	→	IC general es el peor IC individual de todos los parámetros	$\text{Si } 1 < IC_{individual} \leq 4$ $IC_{general} = \text{Max}_{i=\text{parametro}} (IC_i)$
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Excepcional	→	IC general es el promedio aritmético del IC individual de todos los parámetros	$\text{Si } IC_{individual} \leq 1$ $IC_{general} = \frac{\sum_{i=\text{parametro}} IC_i}{n^{\circ} \text{ parametros}}$

A partir de lo anterior se obtiene un valor para el IC general del sector acuífero en el rango continuo entre 0 y 5, sin embargo para efectos de la visualización se utiliza una escala discreta de las cinco clases establecidas. La interpretación de la calidad según el IC general está definida en base a los criterios utilizados para su determinación, es decir los parámetros que afectan a la salud humana y/o que presenten la peor calidad química. A continuación se describe la interpretación de los valores que puede tomar el IC general, sin embargo se recalca que debido a los criterios definidos, ésta debe ser complementada con los IC individuales.

Calidad Excepcional ($0 \leq IC_{general} \leq 1$): Implica que todos los parámetros definidos por la norma NCh409 como de importancia para la salud (elementos esenciales y no esenciales, sustancias orgánicas, plaguicidas y productos secundarios de la desinfección), presentan IC Excepcional y que el IC final está dado por el promedio aritmético de todos los parámetros seleccionados. Por lo tanto, la calidad excepcional permite asegurar que entre los parámetros seleccionados ninguno afecta a la salud humana, aunque el resto de parámetros presentes puede tener calidad Regular o Insuficiente. Sin embargo la situación esperada es que el resto de parámetros seleccionados presenten calidad Buena o Excepcional, en cuyo caso estas aguas con IC Excepcional no afectan la salud humana y cumplirían con criterios de aceptabilidad del agua potable. Para una interpretación más completa será necesario analizar el IC individual del resto de parámetros que no afecten la salud humana, por ejemplo para definir la existencia de

afectación antrópica, el nivel de dureza, la clasificación como fuente de agua potable según la SISS o las limitaciones de uso.

Calidad Buena ($1 < IC_{general} \leq 2$): Esta situación puede darse tanto porque existe algún parámetro que afecta a la salud humana (según normativa NCh409) que presenta IC individual Bueno y el resto presenta IC Bueno o Excepcional, o bien los parámetros de importancia para la salud humana, según normativa NCh409, presentan IC Excepcional y el resto de parámetros presenta IC Buena, Regular y/o Insuficiente. De este modo las aguas clasificadas con IC Bueno no afectan a la salud humana, sin embargo podrían presentar concentración elevada en algunos parámetros que reflejen afectación antrópica o limiten su uso. Una interpretación más detallada requiere del análisis del IC individual.

Calidad Regular ($2 < IC_{general} \leq 3$): Esta calidad puede ser reflejo que al menos uno de los parámetros que afectan la salud humana (según normativa NCh409) tiene IC Regular mientras el resto presenta IC Regular, Bueno y/o Excepcional. Sin embargo, también puede ocurrir cuando la concentración de parámetros relevantes a la salud humana no son altos (IC Bueno o Excepcional) y existe uno o más del resto de parámetros con IC Regular. Por lo tanto, el IC Regular corresponderá principalmente a aguas que afectan a la salud humana, aunque no se descarta que las aguas no sean nocivas para la salud humana y sea el resto de los parámetros seleccionados los que definen la calidad general. Dado esto, se debe analizar el IC individual para definir con mejor detalle limitaciones de uso o afectación antrópica.

Calidad Insuficiente ($3 < IC_{general} \leq 4$): Esta situación puede reflejar que existe al menos un parámetro nocivo para la salud humana (según normativa NCh409) que presenta IC Insuficiente, es decir que limita su uso en agricultura. Sin embargo, también puede producirse cuando los parámetros que afectan la salud humana tienen IC Bueno o Excepcional, pero existe al menos uno del resto de parámetros con IC Insuficiente. Por lo tanto, el IC Insuficiente corresponde a aguas que no pueden ser usadas en la agricultura ni menos para el consumo humano, debido a que al menos uno de los parámetros seleccionados, tanto nocivos o no nocivos para la salud humana supera las recomendaciones.

Calidad Intratable ($IC_{general} = 5$): Esta situación define cuando existe al menos un parámetro de los seleccionados que presenta una calidad intratable, ya sea que afecte o no a la salud humana. Estos niveles son tales que dificultan enormemente su tratamiento, pues exigen procesos de tratamiento de alta eficiencia, y probablemente asociado a mayor complejidad y costos. En definitiva esta agua presentaría limitaciones para la mayoría de los usos.

2.1.3 Análisis temporal del índice de calidad

Mediante un análisis temporal se busca complementar la caracterización de la calidad química de aguas en un sector acuífero. El análisis temporal de la metodología permite conocer la evolución o tendencia de la calidad del agua en el tiempo o en dos momentos dados, pudiendo ésta empeorar, mejorar o mantenerse. En términos generales la evaluación de este cambio temporal consiste en comparar el IC proveniente de mapas de calidad del mismo sector acuífero, pero en distintos momentos o entre un tiempo reciente y la situación de la línea base.

En el caso que el análisis temporal se realice entre dos momentos dados, la evaluación consiste en determinar el cambio porcentual entre el IC inicial y final, con respecto a la situación inicial. La evaluación de la tendencia temporal se realiza a partir de la regresión lineal de la serie temporal de datos, para luego establecer que si existe tendencia al incremento (pendiente positiva) la calidad empeora, o si la tendencia es decreciente (pendiente negativa) la calidad mejora, o bien si la tendencia es constante (pendiente nula) la calidad se mantiene inalterada.

Considerando la variable temporal en la metodología es posible obtener un nuevo mapa del sector acuífero que refleje la calidad del agua subterránea considerando la variación temporal del índice de calidad. Para esto se plantea una nueva clasificación en base al cruce entre las clases de calidad y la clase temporal según la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Reclasificación temporal de la calidad química de aguas.

		Clase de Calidad				
		Excepcional	Bueno	Regular	Insuficiente	Intratable
Clase temporal	Empeorando					
	Constante					
	Mejorando					

Fuente: Adaptado de PASSARELLA y CAPUTO (2006).

2.1.4 Análisis estadístico para determinar el origen de los compuestos disueltos

El origen de los compuestos disueltos que definen la calidad de las aguas subterráneas puede identificarse en base a los antecedentes disponibles de la zona de estudio como el uso de suelo, catastro de actividades antrópicas, etc. Cuando no se dispone de esta información o ésta no es lo suficientemente precisa como para determinar el origen de la calidad química del acuífero, pueden utilizarse herramientas estadísticas aplicadas a la concentración de los elementos o compuestos químicos presentes en el agua subterránea. En particular para el estudio de la hidrogeoquímica es utilizado el Análisis de Componentes Principales (ACP), ya que tiende a develar factores latentes que existen entre los parámetros físico-químicos de un acuífero (TOLOSANA-DELGADO, y otros, 2005) y con ello permite agrupar parámetros que se encuentren correlacionados, y por ende reconocer grupos de características similares (LOVE, y otros, 2004).

El ACP es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible.

Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí. La interpretación de estos factores principales y su relación con las variables originales puede asociar estas variables a fuentes de origen común.

Bajo esta perspectiva la metodología considera en primer lugar, desarrollar un ACP a la base de datos (en el período de tiempo de estudio, por ejemplo un año) de valores de concentración de los parámetros en los puntos de muestreo, obteniendo al final de éste grupos de parámetros químicos que probablemente provienen desde una misma fuente. En segundo lugar, para identificar las fuentes comunes se cruza la información obtenida con referencias disponibles, por ejemplo actividad industrial en el sector acuífero o correlaciones realizadas por la OMS (2007) entre distintos compuestos en las aguas subterráneas, y así identificar el origen común de los compuestos disueltos, por ejemplo agricultura, industria, aguas servidas, etc.

2.2 Aplicación de metodología de clasificación de acuíferos

La aplicación de la metodología se realizó para tres acuíferos: El Loa, Los Choros y Aconcagua.

Todos los cálculos se realizaron bajo la plataforma ArcGIS®, aunque con el apoyo de Excel®, donde se realizó la interpolación y las posteriores clasificaciones del IC individual y el IC general. Se eligió esta plataforma debido a que contiene una gran cantidad de opciones de interpolación y contiene opciones de cálculo. Cada uno de estos cálculos arroja como resultado mapas de los acuíferos donde se representa espacialmente los distintos índices de calidad.

2.2.1 Sector acuífero El Loa

Este acuífero está ubicado en la II Región de Antofagasta, al interior de la cuenca del Río Loa y posee un comportamiento exorreico. Los escurrimientos principales son el río San Pedro, El Loa, Salado y El Salvador y las quebradas Llalqui y León. El acuífero posee un área de 7.950 km² y se extiende desde el valle central hasta la Cordillera de los Andes. Entre las ciudades importantes se puede mencionar a Calama.

La hidrogeología del sector acuífero la componen depósitos no consolidados, con rocas volcánicas fracturadas y rocas carbonatadas, en tres zonas características: Calama, Llalqui y León. Existen dos acuíferos, uno superior de condición libre y con espesor máximo de 100 m, y otro inferior del tipo confinado y cuyo espesor puede alcanzar los 200 m. Ambos acuíferos se encuentran separados por un estrato confinante con espesor entre 0 y 200 m (DICTUC, 2005).

La metodología describe la calidad de un acuífero, por lo que en este sector acuífero como se reconocen dos, uno superior libre y otro inferior confinado, sería necesario aplicarla a cada uno de ellos en forma independiente. En el presente informe sólo se aplicó la metodología al acuífero superior por contar con más datos y revestir mayor riesgo de afectación antrópica.

2.2.1.1 Índice de calidad

De acuerdo a la metodología, se analizaron los dos grupos de parámetros, en que el primer grupo está conformado por los parámetros obligatorios (SDT, Cl, SO₄, Ca, Na y Mg). Además

del NO_3 , para el segundo grupo sólo se eligió el Arsénico (As), ya que es el único parámetro que cuenta con datos en todos los puntos seleccionados y que presenta valores elevados en la zona.

Cabe destacar que la escasez de datos disponibles no permite obtener una correcta interpolación en todo el sector acuífero, y por tanto la calidad sólo puede definirse en un área reducida en torno a los pozos disponibles. En este caso se consideró adecuado que cada pozo o dato disponible es representativo de 200 km^2 . La Figura 2.2 presenta el mapa de IC general para el sector acuífero El Loa. Se aprecia una importante zona con IC Intratable, debido principalmente a los Cloruros y SDT, aunque el Arsénico también contribuye en el extremo sureste. El resto del área presenta mayoritariamente IC Regular.

La distribución espacial del IC muestra claramente el efecto de aumento natural de la concentración, en el sector oriental del acuífero, donde se alcanzan altas concentraciones de As, Cl y SDT, producto de la actividad volcánica en el sector del Tatio. Por otra parte en el sector nororiente se observa una calidad mejor del agua debido a que se está cerca de las zonas de recarga del sistema acuífero. Finalmente el sector poniente presenta mala calidad, que puede ser el reflejo de la mezcla de efectos naturales y antrópicos, dada su ubicación cercana a un centro urbano.

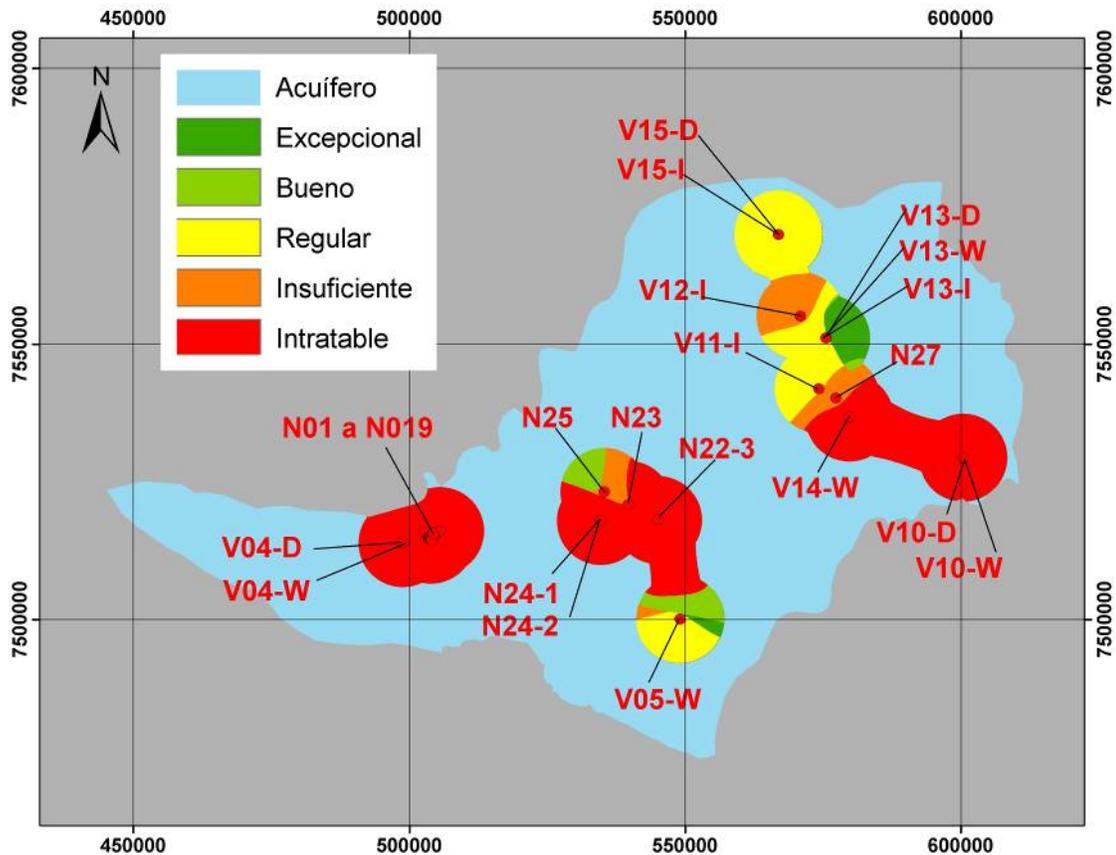


Figura 2.2: Índice de calidad general para el sector acuífero El Loa.

2.2.1.2 *Análisis estadístico ACP*

Para obtener la caracterización de posibles fuentes u origen de la calidad química en el sector acuífero El Loa, se realiza el análisis de componentes principales con el apoyo de una rutina establecida en el programa computacional XLSTAT® acoplado al *software* Excel®, y siguiendo cada uno de los pasos presentados en la metodología.

De acuerdo al análisis realizado se elaboró la Tabla 2.4 en donde se presenta cada uno de los parámetros elegidos y el origen principal obtenido del ACP.

Tabla 2.4: Origen principal de parámetros en sector acuífero El Loa.

Parámetros	Origen principal
Na, Cl, SDT, Ca	Natural (condiciones hidrogeoquímicas)
Mg	Natural (condiciones hidrogeoquímicas)
NO ₃	Antrópico (industrial y/o asentamiento urbano)
SO ₄	Natural y Antrópico (industrial minería)
As	Natural y Antrópico (industrial minería)

2.2.1.3 Conclusiones

En general, el acuífero presenta aguas subterráneas de mala calidad química, ya que predominan zonas con IC Regular a IC Intratable. Esta situación se debe a altos niveles de SDT, Cl y As. Tanto el Cl como SDT tienen un origen natural producto de condiciones hidrogeoquímicas del acuífero. Mientras que el As tendría un origen mixto, es decir natural y antrópico.

2.2.2 Sector acuífero Los Choros

Este acuífero se ubica en la IV Región de Coquimbo, al interior de la cuenca Los Choros que tiene comportamiento exorreico. Los principales cauces son Quebrada el Pelicano, quebrada los Pedernales y Quebrada Los Choros. Este acuífero posee un área total de 4.173 km² y se desarrolla en la depresión intermedia y zona costera. La hidrogeología del sector está compuesta por rocas sedimentarias y mixtas sedimento-volcánicas, además de encontrarse rocas plutónicas e hipabisales. En el área de estudio, comprendida en parte por subsector acuífero Los Choros Bajos y Playa Los Choros, en el sector costero, se reconoce un único acuífero con espesor de relleno entre 10 y 200 m, en donde se mezclan arcillas, limos, arena y gravas (DGA, 2005).

El uso de suelo es predominantemente agrícola, mediante cultivos tales como olivos, hortalizas, maíz y cítricos. Respecto a los derechos de aprovechamiento del recurso subterráneo destaca el riego (agrícola), posteriormente agua potable y finalmente minería.

Existen antecedentes respecto a problemas de intrusión salina en la zona de estudio (DGA, 2005), el cual se acrecienta por efecto del bombeo que realiza el sector agrícola en la zona más cercana a la costa.

2.2.2.1 Índice de calidad

De acuerdo a la metodología, se analizaron los dos grupos de parámetros, en que en el primer grupo se analizaron los parámetros obligatorios (SDT, Cl, SO₄, Ca, Na y Mg). Además del NO₃, para el segundo grupo se escogió el Hierro (Fe) y el Aluminio (Al), ya que presentaron valores más elevados que el resto de parámetros minoritarios disponibles (K, Mo, Ni, Hg, y PO₄).

En la Figura 2.3 se aprecia el mapa de IC general para el sector acuífero Los Choros, donde se observa zonas con IC Insuficiente e IC Regular. En la parte este se aprecia una pequeña área con IC Insuficiente que responde a la conjunción de las concentraciones de SDT y Al. También al este, pero entorno a punto LC15 se tiene IC Insuficiente pero de carácter puntual, y que responde al SDT y al Mg (que afecta a la salud humana según normativa NCh409). La intrusión salina se muestra en la zona noroeste con IC Regular e IC Insuficiente, debido a la calidad del SDT en donde el Mg presenta IC Bueno o IC Regular. En la zona sureste se aprecia un área con IC Regular que se explica por el Al en un pozo ubicado en zona urbana. El resto del área que posee valores de IC Bueno y Excepcional, se debe al promedio de todos los parámetros.

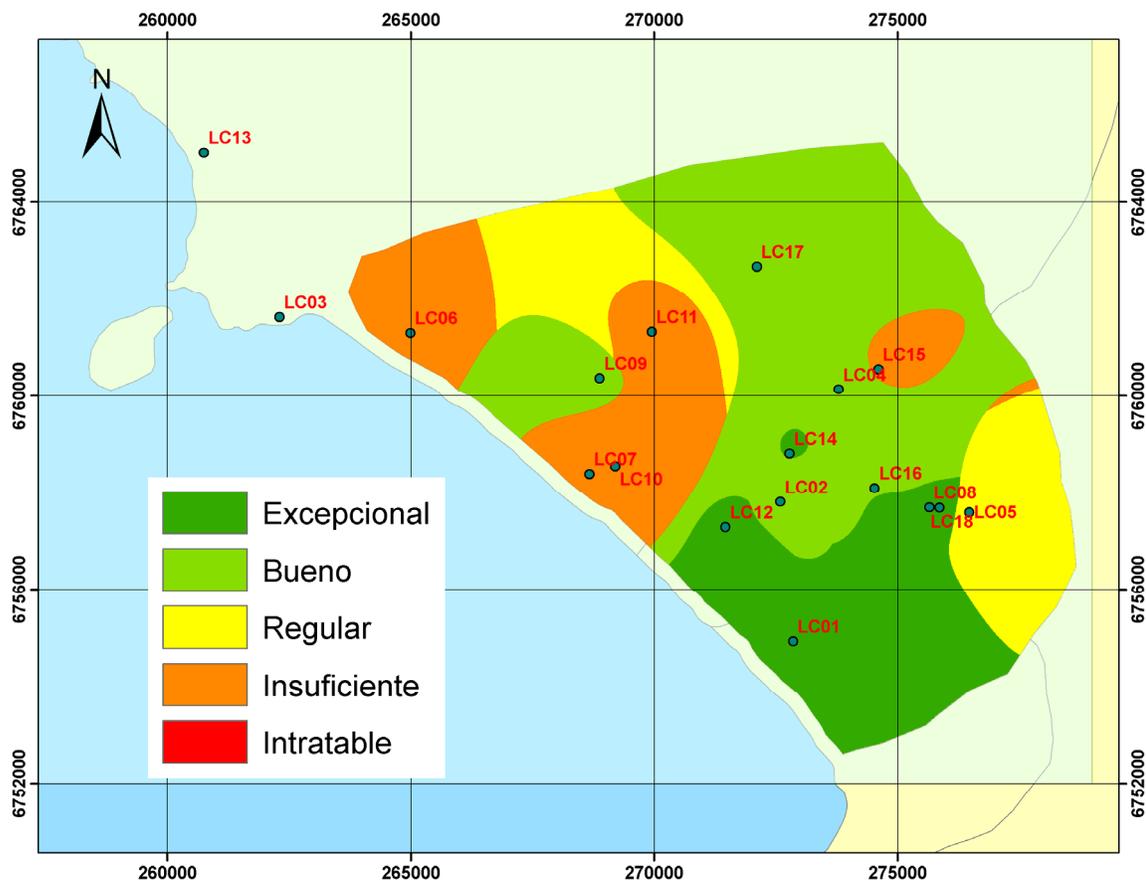


Figura 2.3: Índice de calidad general para el sector acuífero Los Choros.

2.2.2.2 Análisis estadístico ACP

De acuerdo al análisis realizado se elaboró la Tabla 2.5 en donde se presenta cada uno de los parámetros elegidos y la fuente u el origen principal obtenido del ACP.

Tabla 2.5: Origen principal de parámetros en acuífero Los Choros.

Parámetros	Origen principal
Na, Cl, SDT, Mg	Natural (intrusión salina)
SO ₄ , Ca	Natural
NO ₃ , Al	Antrópico (asentamiento urbano)
Fe	Antrópico (estado de pozos)

2.2.2.3 Conclusiones

En general, la calidad química de las aguas subterráneas de este acuífero se encuentra entre IC Excepcional a Regular en su parte central y con IC Regular e IC Insuficiente hacia el noroeste y hacia el este. La zona con IC Regular al sureste se ubica en las cercanías del pueblo, con valores más elevados de Aluminio y Nitratos. Su origen se asocia principalmente a contaminación característica de asentamientos urbanos. Se logra reconocer la intrusión salina, al noroeste de la zona de estudio, asociado a parámetros SDT, Cl, Na y Mg, y con IC Regular e IC Insuficiente. Las zonas con IC Bueno e IC Excepcional en la parte central son el resultado que todos los parámetros presentan valores bajos y que no afectan a la salud humana.

2.2.3 Sector acuífero Aconcagua

El sector acuífero del río Aconcagua se ubica en la V Región de Valparaíso, en la cuenca del río Aconcagua y es de tipo exorreica. La red de drenaje superficial está constituida por los siguientes ríos principalmente: Estero Pocuro, Estero San Francisco, Río Putaendo, Estero de Catemu, Estero El Melón y Río Aconcagua. El área superficial del acuífero corresponde a 1.156 km² y se extiende a través de la zona costera, Cordillera de la Costa y Valle Central. Los centros urbanos que destacan son Concón, Quillota, La Calera, San Felipe y Los Andes.

La hidrogeología de la zona se desarrolla en depósitos no consolidados, que poseen como relleno rocas sedimentarias y mixtas sedimento-volcánicas. Sólo en sectores de Las Vegas, Llay-Llay, parte de Desembocadura y, posiblemente en Catemu, es posible reconocer más de un acuífero, donde el inferior tiene algún grado de confinamiento. El espesor del acuífero superficial es variable según los distintos sectores: San Felipe-Los Andes entre 50 a 100 m, Putaendo entre 70 y 150 m, Las Vegas entre 35 y 80 m, Llay-Llay entre 5 y 30 m, Rabuco entorno a 20 m, Quillota entre 35 y 90 m, Limache entre 60 y 115 m, Desembocadura entre 10 y 150 m, y en Nogales y Catemu se desconoce (DGA, 2001).

2.2.3.1 Índice de calidad

De acuerdo a la metodología, se analizaron los dos grupos de parámetros, en que el primer grupo está conformado por los parámetros obligatorios (SDT, Cl, SO₄, Ca, Na y Mg). Además del NO₃, para el segundo grupo sólo se eligieron Hierro (Fe) y el Manganeseo (Mn), ya que

presentan valores importantes en las mediciones efectuadas frente al resto de parámetros disponibles (K, Al, Cu, Mo, Hg, Ni y Ba). Por otra parte, de acuerdo a la literatura (DESPOUY, 2005), en la V región estos metales junto al Aluminio, Molibdeno y Bario presentan contenidos elevados con origen natural en esta zona.

En la Figura 2.4 se aprecia el mapa de IC general para el sector acuífero Aconcagua, y donde se aprecia cuatro zonas con IC Insuficiente, debidas principalmente al Manganeso. El resto del área posee en general un IC entre Bueno y Regular debido principalmente a Nitratos al centro y al oeste, y al Hierro en el extremo este. Los valores altos de manganeso y hierro parecen estar asociados a la actividad industrial.

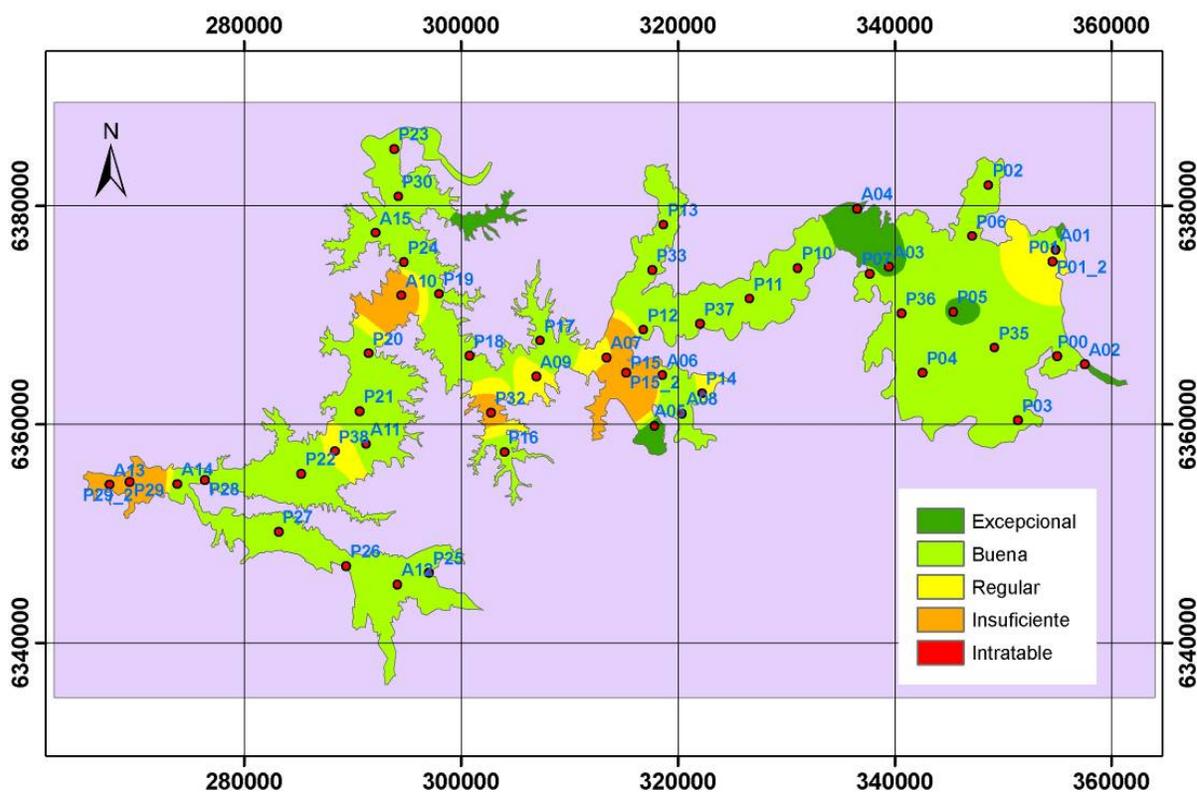


Figura 2.4: Índice de calidad general para el sector acuífero Aconcagua.

2.2.3.2 *Análisis estadístico ACP*

De acuerdo al análisis realizado se elaboró la Tabla 2.6 en donde se presenta cada uno de los parámetros elegidos y la fuente u origen principal obtenido del ACP.

Tabla 2.6: Origen principal de parámetros en sector acuífero Aconcagua.

Parámetros	Origen principal
Na, Cl	Natural
SDT, Mg, SO ₄ , Ca	Natural
Fe, Mn	Antrópico (industrial) y Natural
NO ₃	Antrópico (agricultura)

2.2.3.3 *Conclusiones*

En general se aprecia que la calidad de las aguas de este acuífero es Buena, sin embargo existen zonas donde la calidad empeora hasta ser Insuficiente. El IC Bueno generalizado está marcado por los niveles de NO₃, los que reflejan una afectación antrópica cuyo origen principal sería la actividad agrícola. Las zonas con peor calidad (IC Regular e IC Insuficiente) se deben a valores aún más elevados de NO₃, así como de Mn y Fe. La ubicación de estas zonas, así como la correlación entre parámetros hace suponer que su origen sea la actividad industrial en dichos lugares.

2.3 Instrumentos para la protección de la calidad química del agua subterránea

Los instrumentos de protección de acuíferos tienen como objetivo preservar la calidad y continuidad del recurso hídrico subterráneo de una determinada zona. Estas medidas constituyen todas las acciones gubernamentales y privadas destinadas para este fin que abarcan desde una gestión directa sobre situaciones de emergencia, hasta labores de educación orientadas a la prevención.

Los diversos instrumentos y medidas de protección de acuíferos, pueden dividirse en cuatro grupos principales, que son:

- **Medidas de Conocimiento e Investigación.**
 - Contexto Hidrogeológico: geología, química del agua, hidrología, hidráulica subterránea.
 - Vulnerabilidad, riesgo y carga de contaminantes.
 - Línea Base de calidad de aguas
 - Fuentes de contaminación
 - Puntos de extracción
 - Monitoreo.
- **Medidas Educativas.**
 - Promover el uso racional del agua y los programas de prevención de su contaminación.
 - Implementar programas de enseñanza en escuelas, hogares y empresas.
- **Medidas Políticas y Económicas.**
 - Incentivos económicos
 - Políticas de autorregulación.
 - Programas de ordenamiento territorial.
 - Elaboración de planes de manejo integrales.
- **Medidas de Acción Directa.**
 - Zonificación del acuífero.
 - Recargas artificiales.
 - Tratamiento y descontaminación.

2.3.1 Aproximación de las medidas de protección en sectores acuífero estudiados

De acuerdo a los instrumentos de protección mencionados, en el estudio se realizó el ejercicio de aplicar la primera parte de estas medidas que corresponden a las de **conocimiento e investigación** en donde se recopila toda la información disponible y relevante respecto del acuífero en estudio. En base a la información recopilada y a la definición de cada una de las medidas de protección, se realizó una discusión sobre la aplicabilidad de este primer grupo de

medidas y la repercusión que tendrán en las medidas Educativas, Políticas y Económicas y de Acción Directa que se aplican después de realizar el levantamiento de la información existente.

Los sectores acuíferos utilizados fueron El Loa, Los Choros y Aconcagua, pues fue donde se aplicó la Metodología de Diagnóstico y Clasificación de Acuíferos. La aplicación de la metodología fue incluida dentro de la recopilación de antecedentes ya que constituye una buena herramienta para clasificar espacialmente la situación del acuífero.

Se debe tener en cuenta que la aproximación realizada constituye sólo un ejercicio elaborado con la información disponible. En el desarrollo de cada una de las aplicaciones se realizaron recomendaciones cuando existía información faltante sobre las posibles fuentes o el levantamiento que se deba realizar.

2.3.1.1 Sector acuífero El Loa

La Figura 2.5 reúne toda la información recopilada en los estudios y bases de datos proporcionadas. En ella se puede ver la directa relación que tiene cada uno de los ítems presentados, como por ejemplo la actividad minera, el resultado de la metodología y el uso de suelos. En particular se puede señalar lo siguiente:

- En primer lugar se debe revisar la definición del área sector acuífero, ya que la DGA la realiza tomando en cuenta variados factores, que no necesariamente están ciento por ciento relacionados con la hidrogeología. Sin embargo, no existe un criterio único de definición del área denominada “sector acuífero”, por lo que se debiese implementar un criterio único para su determinación que considere todas las variables posibles y tome en cuenta las grandes diferencias que puedan existir entre un acuífero y otro.
- Existe una cantidad importante de derechos de aprovechamiento sin información acerca de su uso. Se deben determinar con exactitud los derechos que corresponden a extracciones de aguas subterráneas destinadas a agua potable, ya que éstas son las que requerirán una calidad mayor.
- Existen derechos de aprovechamiento para uso minero que no están asociados a actividad minera o alguna generación de residuos de este rubro. Por lo que se debería

realizar un levantamiento acucioso de las mineras presentes en el sector ya que es la principal actividad productiva.

- El resultado de la metodología no comprende toda el área del sector acuífero, sin embargo abarca casi la totalidad de la zona de extracciones en las tres áreas que se presentan. Los valores encontrados en las 3 áreas son en su mayoría desde Regular a Intratable debido a las altas concentraciones de cloruros y arsénico.
- Se distingue la necesidad de realizar una ampliación de la red de monitoreo de manera de generar información para aplicar la evaluación de índice de calidad al sector acuífero completo, o por lo menos a las áreas de interés.
- Para este sector aún no existe un estudio completo de vulnerabilidad de acuíferos por lo que no es posible incorporarlo. Sin embargo, cuando se disponga de esta información se podrá contar con un mayor conocimiento de la fragilidad de las distintas zonas a ser afectadas por contaminaciones de origen antrópico.
- El uso de suelo indica que existe un incipiente actividad agrícola en los alrededores de Calama y el resto son zonas sin vegetación o praderas naturales en la parte alta de la cuenca.

2.3.1.2 Sector acuífero Los Choros

El mapa de Índice de Calidad General se realizó sólo para el sector Playa Los Choros y Los Choros Bajos de acuerdo a lo solicitado por la DGA en su interés de cuantificar los efectos de la intrusión salina para el sector específico. La Figura 2.6 reúne la información del mapa de índice de calidad y los derechos otorgados, en tanto que la Figura 2.7 se presenta la vulnerabilidad estimada por SERNAGEOMIN, el cual estima la vulnerabilidad considerando las condiciones naturales de protección del acuífero, es decir sin la existencia de obras de infiltración, ya que utiliza el método BGR. De acuerdo a estas figuras se puede señalar lo siguiente:

- Se debe realizar un levantamiento de las actividades mineras e industriales dentro del sector, en conjunto con cualquier otra actividad que constituya una fuente potencial de contaminación.
- El resultado de la metodología comprende un área reducida de la totalidad del sector, sin embargo constituye una primera aproximación a una zonificación del acuífero ya que al cruzar esta información con la de vulnerabilidad se podrían definir sectores de protección.
- Al igual que en el sector El Loa, se distingue la necesidad de realizar una ampliación de la red de monitoreo de manera de generar información para aplicar la evaluación de índice de calidad al sector acuífero completo, o por lo menos a las áreas de interés.
- En la Figura 2.7 se presenta la vulnerabilidad para el sector acuífero Los Choros. En ella se aprecia que las mayores vulnerabilidades se encuentran cercanas a la Quebrada los Choros y donde se concentran los derechos otorgados (Figura 2.6). También se aprecia que en el sector donde se aplicó la metodología de Índice de Calidad existen valores de vulnerabilidad de moderados a altos.

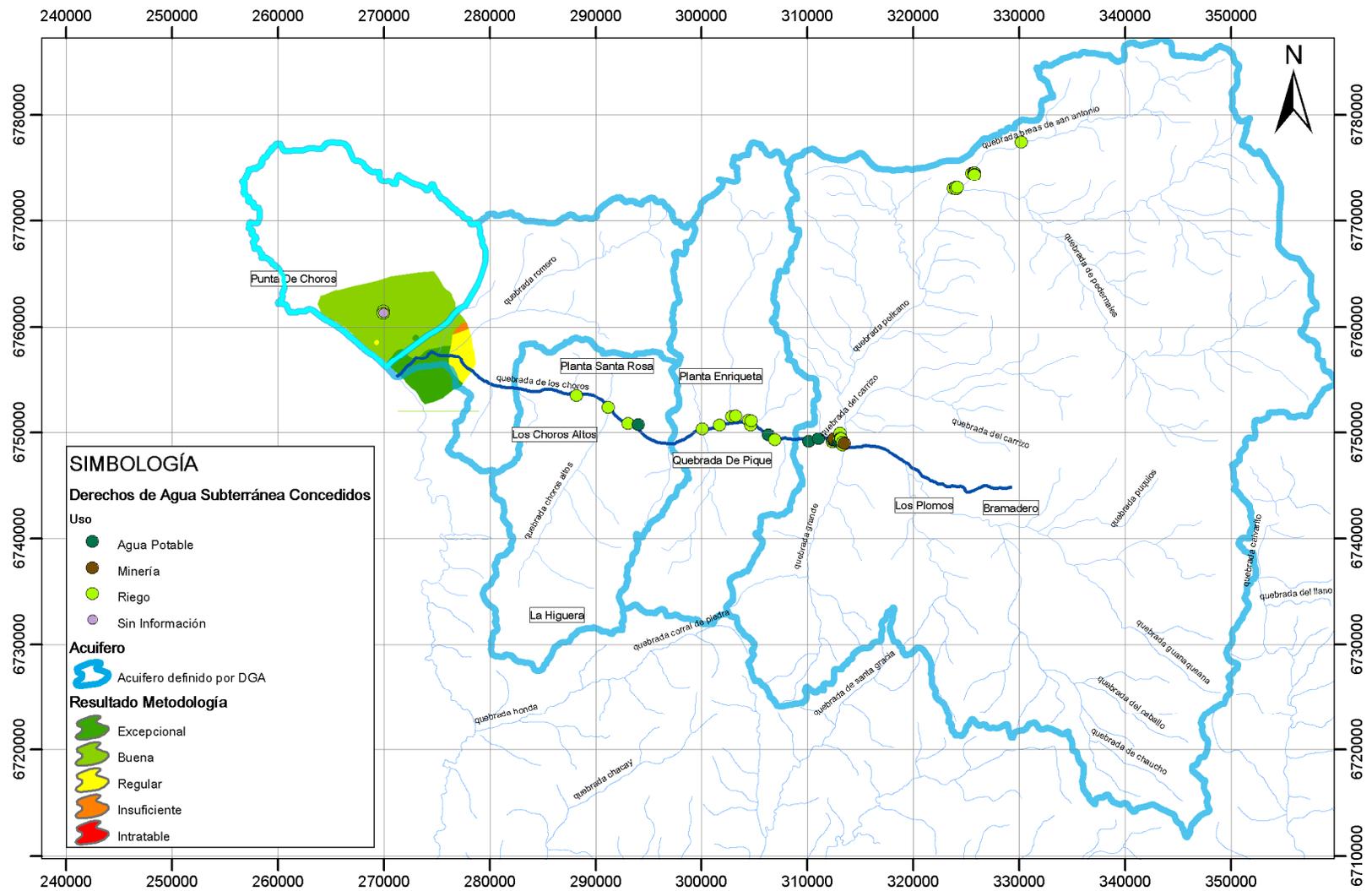


Figura 2.6: Captaciones subterráneas y mapa de índice de calidad sector acuífero Los Choros.

2.3.1.3 Sector acuífero Aconcagua

La Figura 2.8 presenta la información recopilada en los estudios y bases de datos proporcionadas con respecto a las captaciones subterráneas, fuentes potenciales de contaminación y los resultados de la metodología aplicada.

En la Figura 2.9 se presenta el mapa de uso de suelos del sector acuífero y en la Figura 2.10 se presenta la vulnerabilidad. Con respecto a todas estas figuras se debe señalar lo siguiente:

- En tres de las cuatro áreas en que se presentan valores Insuficientes de índice de calidad se encuentran derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas destinados a agua potable. Junto con la anterior, existe una numerosa generación de residuos industriales líquidos (RILes) en estas mismas áreas. Existen varios puntos de actividad minera que en general se encuentra fuera de la definición del sector, no obstante se encuentran en cuencas aportantes al sector acuífero.
- De acuerdo al mapa de uso de suelos (Figura 2.9) se aprecia que la totalidad del sector acuífero corresponde a terrenos agrícolas.
- En cuanto a la vulnerabilidad (Figura 2.10), se puede decir que la mayor parte de la superficie del sector presenta vulnerabilidades altas debidas a la baja profundidad del agua subterránea.

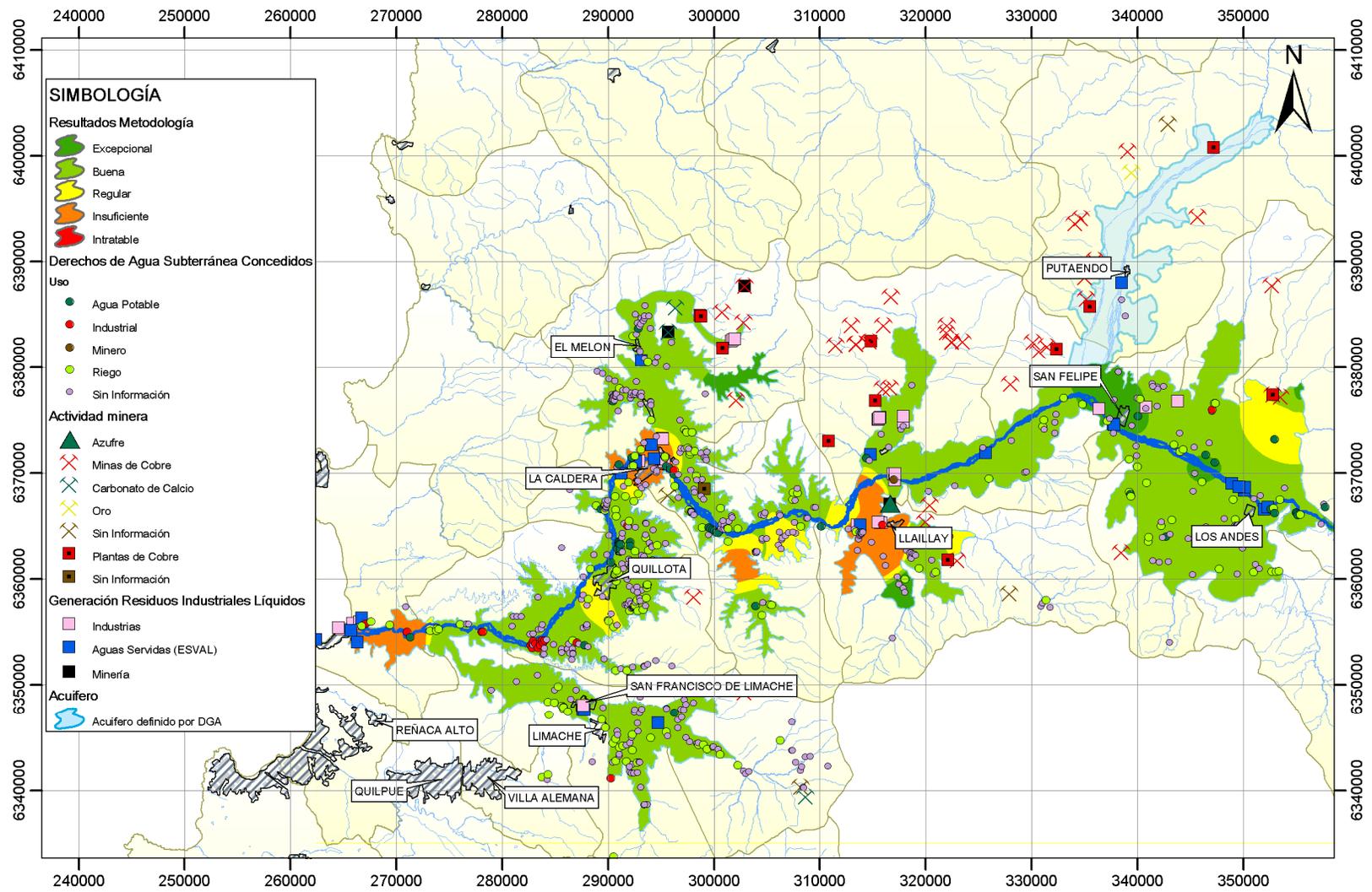


Figura 2.8: Captaciones subterráneas, fuentes potenciales de contaminación y resultados de la metodología en sector acuífero Aconcagua.

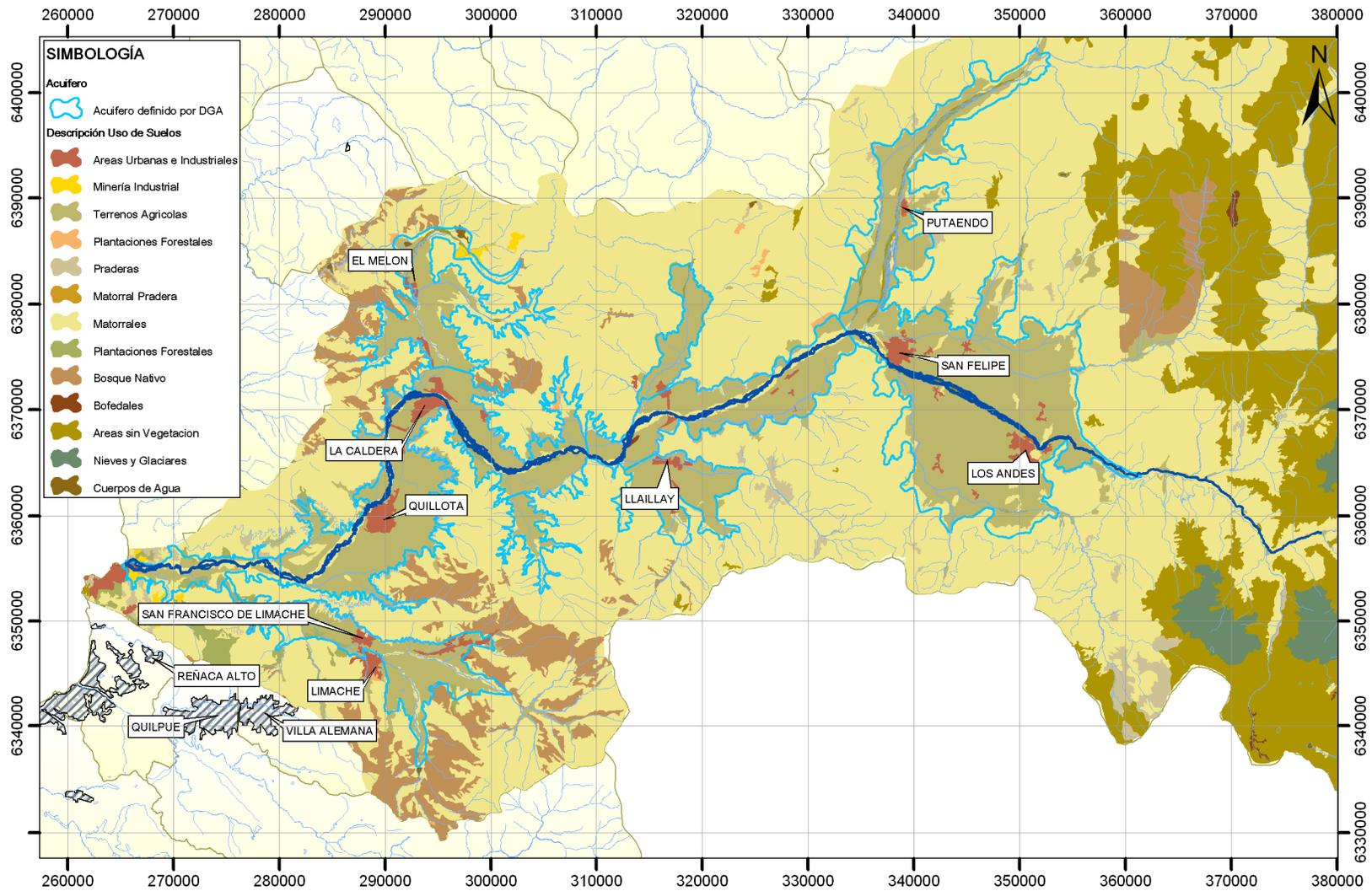


Figura 2.9: Uso de suelos sector acuífero Aconcagua.

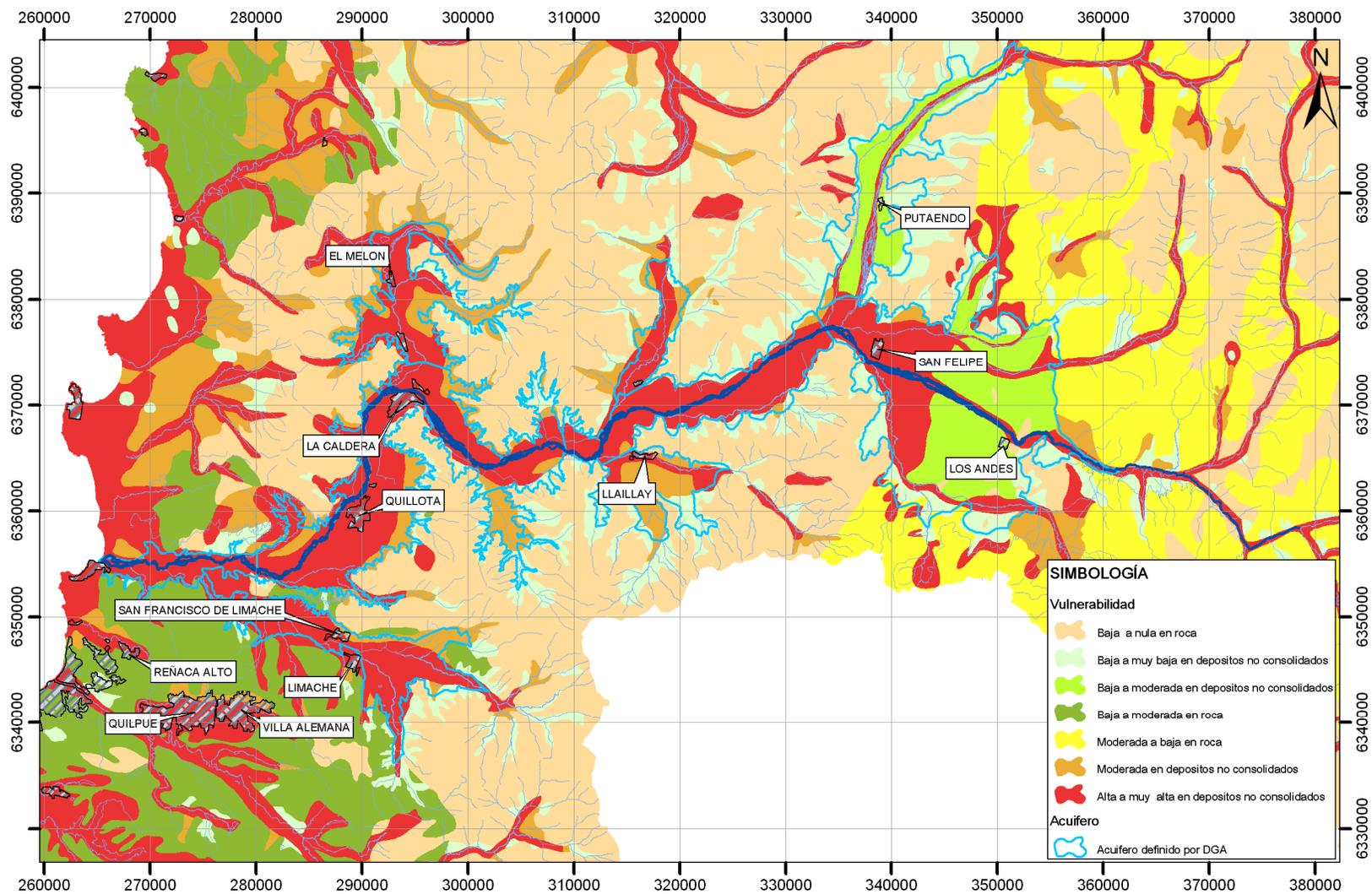


Figura 2.10: Vulnerabilidad sector acuífero Aconcagua.

2.4 Propuesta de monitoreo de la red de medición de la DGA

Se realizó una propuesta de puntos de control para los acuíferos estudiados de acuerdo a criterios recopilados de bibliografía especializada; estos criterios se refieren principalmente a:

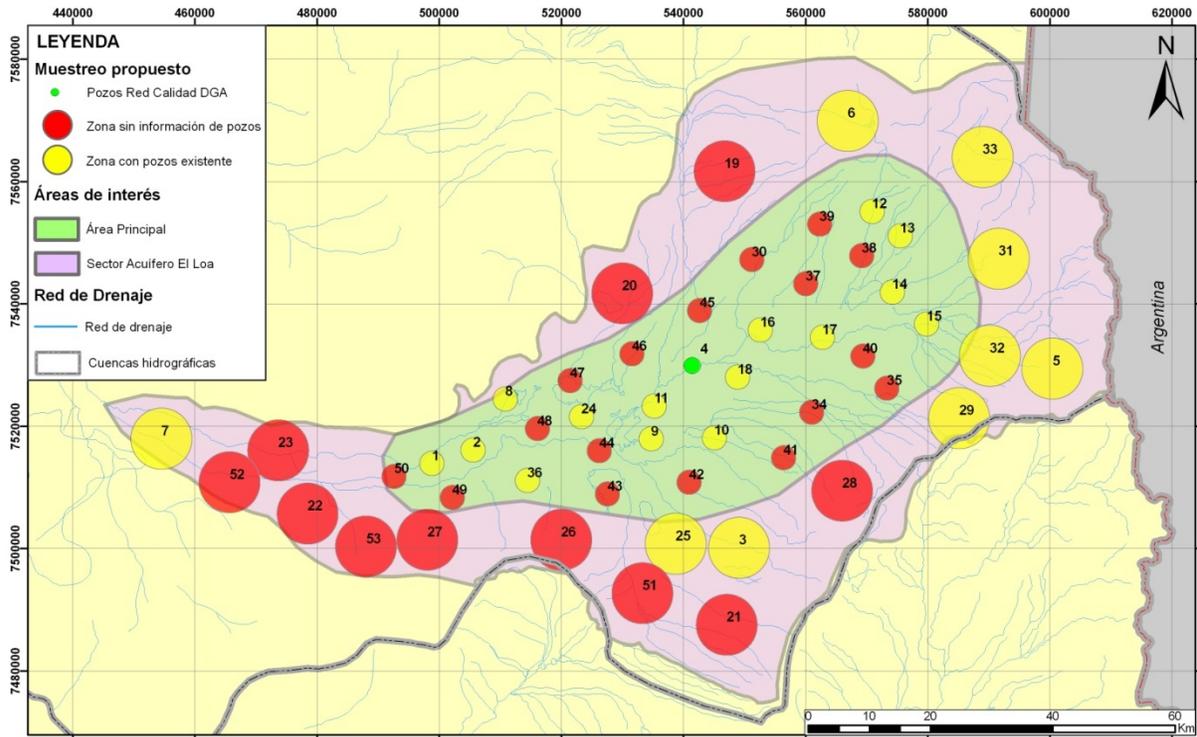
- Ubicación y distribución de los puntos de control en base a la disponibilidad y características constructivas de estos, y de las condiciones del acuífero. (EUROWATERNET, 1998; RENTIER, y otros, 2006).
- Parámetros a controlar que sean consistentes con la metodología.
- Frecuencia del muestreo en base a condiciones del acuífero. (EUROWATERNET, 1998).
- Protocolo de muestreo, transporte y análisis de las muestras que aseguren la representatividad de la calidad química del agua subterránea. (INN, 1998).

A continuación se presenta para cada sector acuífero, mediante fichas (Figura 2.11, Figura 2.12 y Figura 2.13), una propuesta de red de muestreo que cumple con los criterios de diseño, junto a los antecedentes disponibles y a la experiencia obtenida durante las campañas de muestreo adicional realizadas durante el proyecto.

La ubicación propuesta se basa en la ubicación de pozos existentes (muestreados, red de calidad de la DGA y red de pozos con derechos de aguas DGA) de modo de reducir la necesidad de construir nuevos. En el caso que la ubicación propuesta no era un pozo de la red de calidad o no hubiese sido muestreado en este proyecto, se consideró adecuado establecer un área en la cual resulta necesario definir un pozo existente o bien la construcción de uno.

Además de la localización se indican los parámetros químicos mínimos que interesaría muestrear desde el punto de vista de la aplicación de la metodología para definir la calidad del acuífero. Todos los parámetros deben medirse como disueltos, excepto aquellos con sufijo (t), que deben medirse como totales.

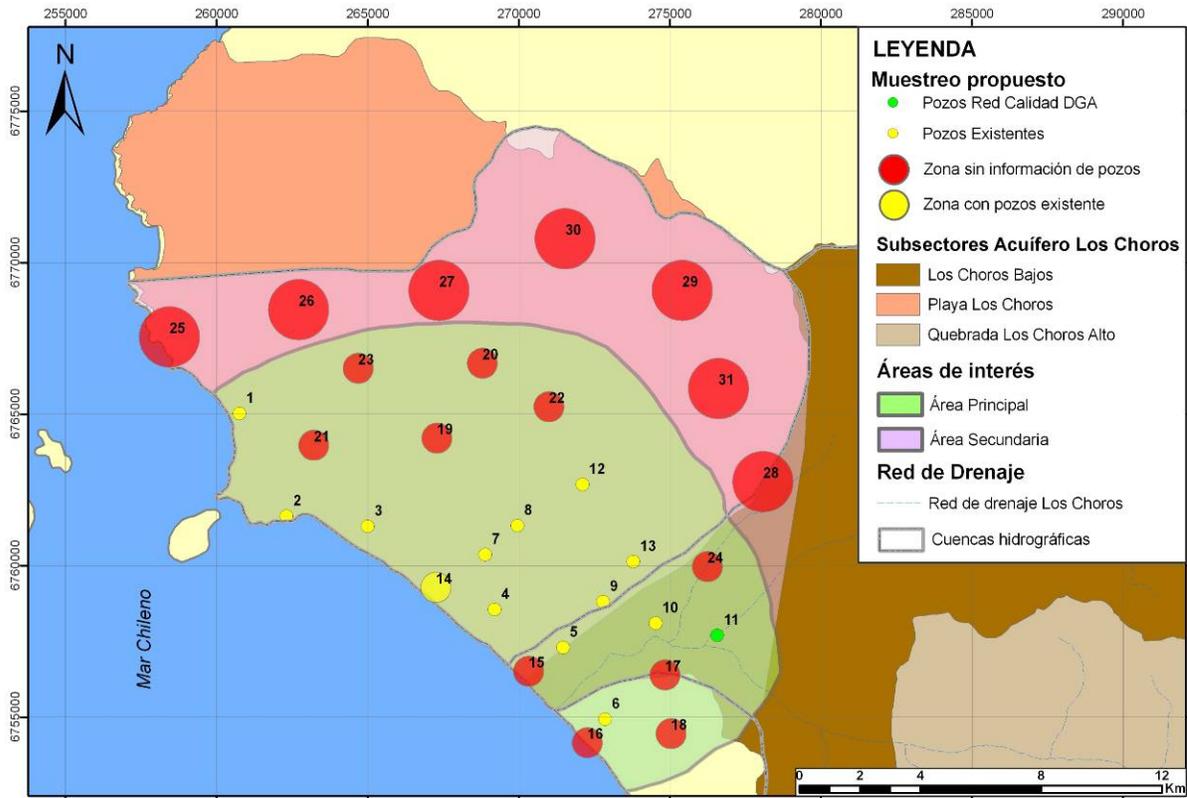
Por otro lado se recomienda la frecuencia de muestreo mínimo e ideal y las condiciones del acuífero. Y por último, se indica detalles respecto al método de muestreo que complementa con lo descrito en capítulos anteriores.



Características

<p style="text-align: center;">Ubicación</p> <p>Distribución homogénea en cada área. Área principal: Puntos: 33. Densidad: 93 km²/punto. Área secundaria: Puntos: 20. Densidad: 243 km²/punto.</p>	<p style="text-align: center;">Parámetros a controlar</p> <p>Grupo 1: Cl, SO₄, Ca, Na, Mg, SDT. Grupo 2: NO₃, As (t), Li (t), Cu (t), Mo (t), Al (t), B (t), Ag (t), Be (t), Ba (t), Sb (t). Adicional: CO₃, HCO₃, K, C.E., pH, T° y OD. Hidrogeológicos: nivel freático.</p>
<p style="text-align: center;">Frecuencia de muestreo</p> <p>Mínimo cada 12 meses, ideal cada 3 meses.</p>	<p style="text-align: center;">Toma de muestras</p> <p>Uso de bombas instaladas o de muestreadores discretos (<i>bailer</i>).</p>

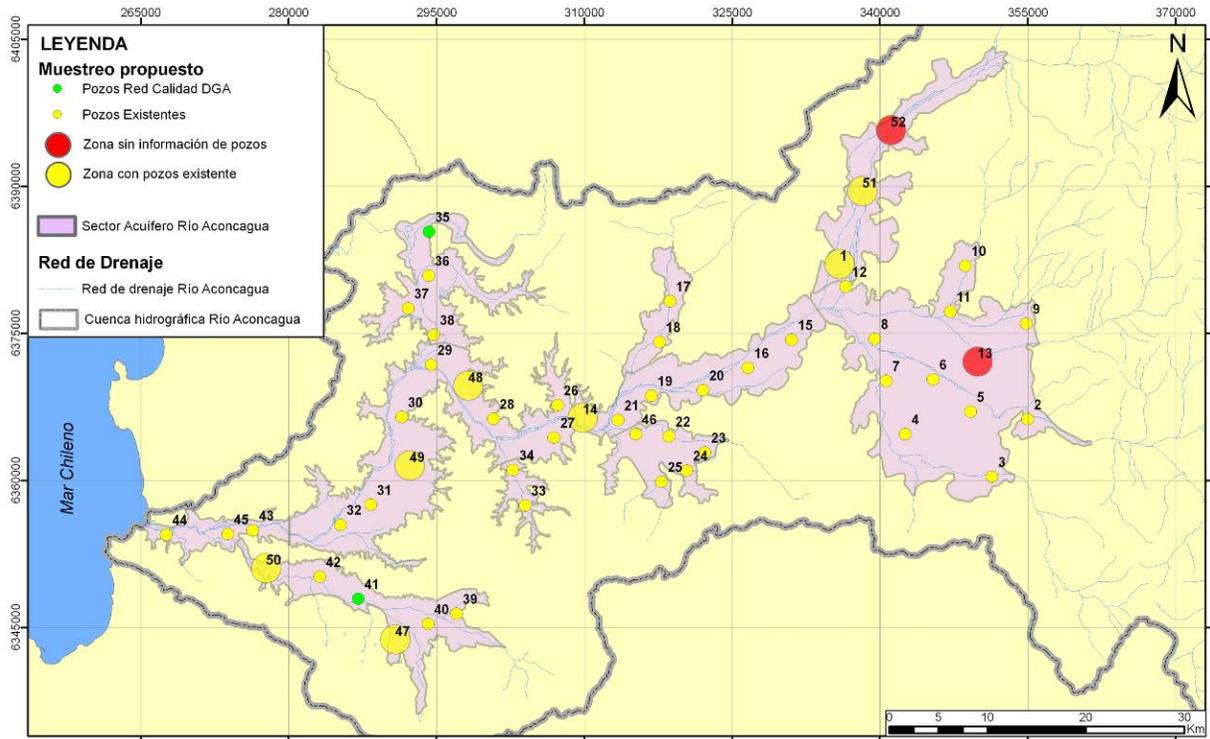
Figura 2.11: Propuesta de muestreo sector acuífero El Loa.



Características

Ubicación	Parámetros a controlar
Distribución homogénea en cada área. Área principal: Puntos: 24. Densidad: 7 km ² /punto. Área secundaria: Puntos: 7. Densidad: 15 km ² /punto.	Grupo 1: Cl, SO ₄ , Ca, Na, Mg, SDT. Grupo 2: NO ₃ , Al (t), Fe (t), Mn (t), Mo (t), Ni (t), Hg (t), PO ₄ . Adicional: CO ₃ , HCO ₃ , K, C.E., pH, T° y OD. Hidrogeológicos: nivel freático.
Frecuencia de muestreo	Toma de muestras
Mínimo cada 12 meses, ideal cada 3 meses.	Uso de bombas instaladas o de muestreadores discretos (<i>bailer</i>).

Figura 2.12: Propuesta de muestreo sector acuífero Los Choros (sector costero).



Características

<p style="text-align: center;">Ubicación</p> <p>Distribución homogénea. Puntos: 52. Densidad: 23 km²/punto.</p>	<p style="text-align: center;">Parámetros de control</p> <p>Grupo 1: Cl, SO₄, Ca, Na, Mg, SDT. Grupo 2: NO₃, Al (t), Fe (t), Mn (t), Mo (t), Hg (t), Ni (t), B (t). Adicional: CO₃, HCO₃, K, C.E., pH, T° y OD. Hidrogeológicos: nivel freático.</p>
<p style="text-align: center;">Frecuencia de muestreo</p> <p>Mínimo cada 6 meses, ideal cada 3 meses.</p>	<p style="text-align: center;">Toma de muestras</p> <p>Uso de bombas instaladas.</p>

Figura 2.13: Propuesta de muestreo sector acuífero Aconcagua.

3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Conclusiones del proyecto

3.1.1 Desarrollo de la metodología

En base a la revisión de la literatura científica nacional e internacional y a partir de la experiencia alcanzada durante la ejecución de este proyecto se puede realizar las siguientes conclusiones respecto del desarrollo de la metodología de clasificación de acuíferos:

- La revisión de la literatura científica especializada permite concluir que existen pocas metodologías de clasificación de calidad química de acuíferos desarrolladas a nivel mundial, y que las existentes no son aplicables en Chile, ya que no satisfacen los criterios, las realidades y las necesidades de nuestro país.
- Lo anterior implicó el desarrollo de una metodología propia que permitiera clasificar la calidad química del agua subterránea considerando la gran variabilidad natural de los acuíferos a nivel nacional, incorporando criterios de la Dirección General de Aguas, en cuanto el uso del agua y la protección de la salud de las personas.
- La metodología de clasificación de la calidad química de acuíferos desarrollada demostró ser una herramienta útil y confiable, que puede ser aplicada a diferentes acuíferos del país, que entrega una valiosa información respecto de los potenciales usos del agua subterránea.
- Dada la gran variabilidad de la calidad química de los acuíferos en Chile, la utilización de una metodología flexible que permita incorporar parámetros químicos característicos de una zona o acuífero, resulta fundamental. En este sentido la metodología desarrollada cuenta con un conjunto de parámetros químicos fijos (Grupo 1) y otro conjunto con parámetros variables (Grupo 2). Los primeros permiten calcular un índice de calidad (IC) intermedio que permite comparar la calidad química de los diferentes acuíferos en idénticas condiciones. Por otra parte, los parámetros variables incorporan parámetros propios del acuífero en estudio, permitiendo dar cuenta de las características propias de cada sector acuífero del país.

- El desarrollo de una metodología de clasificación requiere necesariamente la adopción de criterios que permita catalogar los diferentes tipos de agua. La metodología desarrollada adoptó como primeros criterios la utilización de normas de calidad de agua. Esto le confiere, por una parte, un sólido respaldo técnico y legal, y por otra, una gran flexibilidad, ya que si se promulgan nuevas normas o nuevos valores máximos de parámetros químicos, es posible volver a aplicar la metodología sin cambios metodológicos importantes.
- Uno de los aspectos importantes a considerar en el diseño de una metodología de clasificación de la calidad química de acuíferos, es el comportamiento temporal de la calidad química. Se requiere para ello una visión dinámica de la calidad química, ya que el recuso hídrico subterráneo tiene un comportamiento dinámico, al igual que las actividades que potencialmente pueden alterar o cambiar su composición química. A modo de ejemplo se puede indicar que es muy distinto tener un acuífero que presenta un IC Bueno, que se ha mantenido constante en el tiempo, a que este mismo índice anteriormente haya sido excepcional. En este último caso la calidad del acuífero va empeorando.
- La utilización de técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales (ACP) permite analizar situaciones en la cual existe una gran cantidad de información. Este es el caso del monitoreo de la calidad química de aguas subterráneas, donde se tiene un alto número de parámetros químicos medidos, en un número importante de pozos y en muchos casos con series históricas largas. La técnica ACP demostró ser una herramienta que permite analizar la fuente de cada uno de los parámetros químicos observados en el agua subterránea.
- La aplicación de cualquier metodología de clasificación de calidad química de acuíferos requiere una buena red de medición, en cuanto a calidad de los análisis de laboratorio, número de parámetros analizados, número y distribución espacial de los pozos de monitoreo, y ojala con una frecuencia adecuada.
- Utilizar información de análisis químicos de distintas fuentes como: Banco Nacional de Aguas de la DGA, estudios hidrogeológicos varios, estudios de impacto ambiental (SEIA), informes de fiscalización de la Superintendencia de Servicios Sanitarios

(SISS), etc., no es viable o genera información poco confiable. Lo anterior se funda en el hecho que la información muchas veces no es comparable, ya que corresponde a periodos de tiempo diferentes, análisis químicos incompletos, análisis en distintos laboratorios, etc.

- Por lo tanto, se refuerza el hecho de que la DGA es el organismo que debe continuar con la labor de mantención y operación de la red de monitoreo de agua subterránea. Sin embargo, se debe poner énfasis en la ampliación de la red de monitoreo actual, especialmente en el número de puntos de control en aquellos acuíferos en los que actualmente existe monitoreo.

3.1.2 Instrumentos de protección

Respecto de los instrumentos de protección de acuíferos se puede realizar las siguientes conclusiones:

- Las medidas de conocimiento e investigación son fácilmente aplicables en Chile, e incluso muchas de ellas están siendo ya abordadas actualmente por distintos organismos. Por ejemplo, los mapas de vulnerabilidad de acuífero para todo el país se están realizando en el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), mientras la Dirección General de Aguas (DGA) se ocupa de los monitoreos de calidad de las aguas.
- La zonificación de acuíferos es también una herramienta de fácil implementación, eficiente y sencilla, que permite diseñar planes de manejo y gestión de los recursos hídricos considerando las zonas que requieren una mejor protección.
- Las medidas de acción directa, tienen un costo económico más alto y pueden plantearse en determinados sectores donde exista un riesgo elevado de deterioro del recurso en cuanto a su calidad y/o cantidad.
- Las medidas educacionales son altamente recomendables, puesto que la consciencia de la sociedad frente los problemas medioambientales es una de las mejores medidas auto-regulatorias.

- Las medidas políticas y económicas son absolutamente necesarias para que el Estado tenga el control en la protección de sus recursos. Muchas de las medidas descritas ya existen en nuestro país aunque parece necesario que el Estado tenga más capacidad para implementar tales medidas o que éstas sean más duras (multas) de modo que las actividades privadas se autorregulen mejor. Hay que considerar que estas medidas, son quizás las que serían más lentas de implementar en el país ya que requieren de la elaboración (o modificación) de nuevas normativas y leyes.
- El punto crucial para poder contar con instrumentos de protección de acuíferos es la elaboración de normas de calidad ambiental (secundarias), de modo de poder utilizar las herramientas de gestión que la actual institucionalidad ambiental permite.
- Dado que la elaboración de normas secundarias, es complejo y muchas veces toma un tiempo considerable, se recomienda realizar a la brevedad una caracterización de acuíferos desde el punto de vista físico-químico, que permitan contar con información de la calidad natural del acuífero o similar a su calidad natural. De modo que en el momento que se decida confeccionar las normas de calidad ambiental se cuente con una información técnicamente óptima.
- Desde el punto de vista de la aplicabilidad de las medidas de protección, se observa que pueden ser perfectamente aplicables en Chile siempre que se destinen los recursos necesarios en cada uno de los aspectos. De acuerdo al levantamiento de información realizado en los acuíferos de estudio, se aprecia que existen varios ítems que requieren un mayor conocimiento como son los tipos de extracción de aguas subterráneas, potenciales fuentes de contaminación, vulnerabilidad, etc. Todos ellos fundamentales para obtener un conocimiento acabado del estado del recurso para un determinado sector acuífero. Resulta especialmente importante contar con información espacialmente distribuida de la calidad química de los acuíferos, ya que es la base para cualquiera de las medidas de protección propuestas. En definitiva, resultará más difícil proteger un sistema mientras menos información y/o conocimiento se tenga de él.
- Junto con lo anterior, se destaca que la metodología desarrollada resulta muy útil para el análisis del estado de un sector acuífero. Esta herramienta sumada a los otros

aspectos que se analizan dentro del sector constituyen los elementos con que se podría implementar un sistema de zonificación de acuíferos. En esta zonificación se podrían proteger acuíferos que presenten un estado crítico en cuanto a vulnerabilidad, calidad o continuidad del recurso, o alguna combinación de estos.

- La elaboración de normas de secundarias debe tomar en cuenta no sólo la calidad química del agua subterránea, sino que también el nivel de explotación de los acuíferos que pudieran inducir contaminación. En este sentido, el desarrollo de normas de calidad debe ir acompañado de un análisis legal que considere las leyes que rigen el aprovechamiento. Por ejemplo, si se indica que un acuífero está en estado de latencia se debería restringir las extracciones por razones de calidad, y no por razón de disponibilidad.

3.1.3 Red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas

En base al análisis de la información de la red de calidad química de aguas subterráneas de la DGA se puede realizar las siguientes conclusiones:

- La actual red de monitoreo de aguas subterráneas de la Dirección General de Aguas es deficiente, especialmente en términos espacial y temporal. Sin embargo, el conjunto de parámetros analizados y la calidad de los análisis de laboratorio cumplen con los requisitos necesarios para la caracterización y seguimiento de la calidad química del acuífero. En definitiva la red resulta poco representativa de las condiciones químicas de los acuíferos seleccionados, y por tanto no permite un adecuado seguimiento de ésta.
- Para cada sector acuífero seleccionado se propuso una nueva red de monitoreo, en la que se aumentó el número de puntos, los pozos existentes y/o nuevos, y que se cumplan con criterios claros respecto a representatividad y características constructivas.
- La red de monitoreo se complementa con definiciones respecto a los parámetros que se deben muestrear en cada punto de control, la frecuencia de muestreo mínimo y los protocolos de toma, transporte y análisis de las muestras.

3.2 Recomendaciones de trabajos futuros

Basado en la revisión de la literatura especializada, la experiencia obtenida durante la elaboración del estudio y las características de la red de medición de la calidad química de aguas subterráneas de la DGA se realiza las siguientes recomendaciones de trabajos futuros:

- Realizar muestreos de calidad química en 2 ó 3 acuíferos representativos de cada región, en al menos dos estaciones del año, considerando las recomendaciones indicadas en el capítulo 2.4 del presente informe. Esto permitirá contar con información de línea base con la calidad técnica necesaria para su posterior utilización en el diseño de medidas de protección de acuíferos más concretas.
- En este sentido es muy importante y recomendable que los muestreos se realicen a corto plazo, ya que en la medida que pasa el tiempo la calidad química del acuífero se aleja de la natural, y por tanto puede llevar a tomar decisiones erróneas respecto de, por ejemplo, la elaboración de normas secundarias.
- Consolidar la información de la calidad química de modo que sea asequible para cualquier usuario.
- Realizar monitoreo de la calidad química en los sectores acuíferos estudiados en este proyecto, es decir El Loa, Los Choros y Aconcagua, para aplicar, estudiar y analizar la temporalidad del índice de calidad. Esto resulta muy importante debido a que la escasez de información de calidad química no permitió aplicar las etapas de temporalidad de la metodología desarrollada.
- Una vez que se cuente con la información base de la calidad química de un acuífero, es necesario trabajar en el desarrollo de normas de calidad ambiental para los acuíferos, de modo que se utilice la institucionalidad ambiental que actualmente posee el país

4 BIBLIOGRAFÍA

DESPOUY, I. (2005). Caracterización de fuentes y Análisis Crítico de los Tratamientos de Agua Potable en Chile. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile [Libro]. - Santiago : [s.n.].

DGA (2001). Evaluación de los recursos subterráneos de la cuenca del río Aconcagua. S.D.T. N°101. [Informe técnico]. Santiago: DGA-MOP.

DGA (2005). Estudio de intrusión salina en acuíferos costeros: Sector Costa Quebrada Los Choros, IV Región. S.I.T. N°109. [Informe]. - Santiago : [s.n.].

DICTUC (2005). Hidrogeología de la II Región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos. Sector Calama-Pampa Llalqui. [Informe]. Santiago: DGA-MOP.

EUROWATERNET (1998). The European Environment Agency's Monitoring and Information Network for Inland Water Resources. Technical Guidelines for Implementation. [Informe].

FAO (1994). Water quality for agriculture, Irrigation and Drainage Paper (Ayers, R. S.; Westcot, D. W.) [Libro]. Vol. 29 Rev 1.

HAMANN, C.L., McEWEN, J.B. y MYERS, A.G. (1990). Guide to selection of water treatment process. En: **AWWA (1996).** Water Treatment Membrane Processes, Cap. 10 Pág 10.9[Libro].

INN (1996). NCh 1333/78. Requisitos de calidad del Agua para diferentes usos [Libro]. - Santiago : [s.n.].

INN (1998). NCh411/3.Of98. Calidad de Agua, Muestreo, Parte 3. Guía sobre la preservación y manejo de las muestras [Libro].

INN (2005). NCh 409/1. Agua Potable 1 Requisitos [Libro]. - Santiago : [s.n.].

INN (2008). NCh 777/1 c. R2008. Agua Potable, Fuentes de abastecimiento y obras de captación, Parte 1 Captación de aguas superficiales [Libro]. - Santiago : [s.n.].

LANKFORD P. y ECKENFELDER W. (1990). Toxicity reduction in industrial effluents [Libro]. - NY : [s.n.].

LOVE D., HALLBAUER, D, AMOS, A. y HRANOVA, R. (2004). Factor analysis as a tool in groundwater quality management two southern African case studies [Publicación periódica] // Physics and Chemistry of the Earth. 15-18: Vol. 29. - págs. 1135-1143.

MENA, P. (2007). Apuntes del curso CI66Q-1 Procesos avanzados de tratamiento, FCFM, Universidad de Chile. [Libro].

OMS (2006). Guidelines for drinking water quality: incorporating first addendum. 3^a Edition. - Vol. 1: recomendations.

OMS (2007). Chemical safety of drinking-water: Assessing priorities for risk management [Libro].

PASSARELLA, G. y CAPUTO, M.C. (2006). A methodology for space time classification of groundwater quality [Publicación periódica] // Environmental Monitoring and Assessment. 1-3: Vol. 115. - págs. 95-117.

PONTIUS, F. (1995). Regulatory compliance using Membrane Processes [Publicación periódica]. 5: Vol. 88. - págs. 12-14.

RENTIER, C., DELLOYE, F., BROUYÈRE, S. y DESSARGUES, A. (2006). A framework for an optimized groundwater monitoring network and aggregated indicators [Publicación periódica] // Environmental Geology. 50: Vol. 2. - págs. 194-201.

TOLOSANA-DELGADO, R., OTERO, N., PAWLOWSKY-GLAHN, V. y SOLER, A. (2005). Latent Compositional factors in the Llobregat River Basin (Spain) Hydrogeochemistry [Publicación periódica] // Mathematical Geology. 7: Vol. 37. - págs. 681-702.

USEPA (2009). Drinking water contaminants. Recuperado el Abril de 2009, de Safewater, Water USEPA: <http://www.epa.gov/safewater/contaminants/index.html>.