

**CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO  
GEOGÉNICO DE LAS AGUAS  
SUBTERRÁNEAS EN CHILE**

**ARSENIC GEOGENIC CONTAMINATION OF  
CHILEAN GROUNDWATERS**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por: CARMEN COPIER MELLA**

**Dirigido por: Dr. JAVIER LILLO**

**Alcalá de Henares, a 20 mayo 2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a la Organización del Master y a todos sus profesores, los que nos brindaron todos sus conocimientos y apoyo durante el transcurso de los siete módulos anteriores, en especial, en este período tan difícil en que hemos estado duramente afectados por esta pandemia a nivel mundial.

Asimismo, quiero expresar mi especial agradecimiento al director de este Trabajo Final de Máster, el Dr. Javier Lillo, por brindarme siempre una orientación adecuada en su desarrollo, por la buena disposición a resolver mis dudas y aportar buenas ideas para el buen desarrollo de éste. Además, agradecer a mi colega Valentina Rosales por la revisión y aportes a este TFM.

Finalmente, quiero expresar todo mi agradecimiento y amor a mi familia, mi Cami, Paz y en especial a mi compañero de vida, el “Pelaito”, por apoyarme incondicionalmente en este nuevo desafío profesional, considerando que ya estoy ad portas de mis 60.

***GRACIAS A LA VIDA QUE ME HA DADO TANTO***

***Violeta Parra***

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	7
2	OBJETIVOS.....	8
3	METODOLOGÍA .....	8
4	OCURRENCIA DE AS DE ORIGEN NATURAL.....	10
4.1	ROCAS, SEDIMENTOS Y SUELOS.....	10
4.2	AGUAS SUPERFICIALES.....	11
4.3	ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	11
5	ARSÉNICO Y NORMATIVA DE AGUAS EN CHILE .....	13
5.1	Norma de Agua Potable- NCH 409/2005 .....	13
5.2	Norma de Aguas Minerales- DS 106.....	13
6	ARSÉNICO GEOGÉNICO EN LAS AGUAS DE CHILE.....	14
6.1	MACROZONA NORTE .....	15
6.1.1	Geología .....	16
6.1.2	Climatología .....	18
6.1.3	Hidrología e Hidrogeología .....	18
6.1.4	Ocurrencia de Arsénico en las Aguas:.....	23
6.2	MACROZONA CENTRO.....	28
6.2.1	Geología .....	28
6.2.2	Climatología .....	30
6.2.3	Hidrología e Hidrogeología .....	30
6.2.4	Ocurrencia de Arsénico en las Aguas.....	33
6.3	MACROZONA SUR.....	38
6.3.1	Geología .....	38
6.3.2	Climatología .....	40

6.3.3	Hidrología e Hidrogeología.....	40
6.3.4	Ocurrencia de Arsénico en las Aguas.....	44
6.4	DISTRIBUCION DE ARSENICO EN CHILE.....	47
7	CONCLUSIONES .....	50
8	RECOMENDACIONES .....	52
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	53

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Diagrama Eh-pH de especies acuosas de As. ....	12
Figura 2:	Gráfico Evolución Normas As OMS y Chile- Valor Máximo de As .....	13
Figura 3:	Macrozonas en Chile. ....	15
Figura 4:	Mapa Geológico-Macrozona Norte. ....	17
Figura 5:	Mapa Hidrogeológico-Macrozona Norte .....	22
Figura 6:	Distribución en Macrozona Norte de As en Aguas Subterráneas y Fuentes Termales .....	24
Figura 7:	Sectores con As- Macrozona Norte .....	25
Figura 8:	Mapa Geológico-Macrozona Centro .....	30
Figura 9:	Mapa Hidrogeológico-Macrozona Centro .....	33
Figura 10:	Distribución en Macrozona Centro de As - Aguas Subterráneas y Fuentes Termales .....	35
Figura 11:	Sectores con As- Macrozona Centro .....	36
Figura 12:	Mapa Geológico-Macrozona Sur. ....	39
Figura 13:	Mapa Hidrogeológico-Macrozona Sur .....	43
Figura 14:	Distribución en Macrozona Sur de As -Aguas Subterráneas y Fuentes Termales .	45
Figura 15:	Sectores con As- Macrozona Sur .....	46
Figura 16:	Distribución de As en Chile .....	48
Figura 17:	Diagramas de cajas – Aguas Termales en Chile .....	49
Figura 18:	Diagramas de cajas – Aguas Subterráneas Chile .....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Concentraciones de As en la Geosfera. ....	10
Tabla 2: Precipitaciones Macrozona Norte. ....	18
Tabla 3: Escorrentía- Macrozona Norte. ....	19
Tabla 4: Estaciones DGA y caudales - períodos 2013-2014 y 2019. ....	20
Tabla 5: Precipitaciones Macrozona Centro. ....	31
Tabla 6: Escorrentía Macrozona Centro .....	31
Tabla 7: Estaciones DGA y caudales-períodos 2013-2014 y 2019. ....	32
Tabla 8: Precipitaciones Macrozona Sur .....	40
Tabla 9: Escorrentía- Macrozona Sur .....	41
Tabla 10: Estaciones DGA y caudales - períodos 2013-2014 y 2019 .....	41

## TABLA DE ABREVIATURAS

APR: Agua Potable Rural

ATSDR: Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades

CVZ: Zona Volcánica Central

DGA: Dirección General de Aguas

DS: Decreto Supremo

GRAPHIC: Groundwater Resources Assessment Pressure Humanity Climate Change

MINSAL: Ministerio de Salud de Chile

MOP: Ministerio de Obras Públicas

OMS: Organización Mundial de Salud

SD: Sin Datos

SERNAGEOMIN: Servicio de Geología y Minería de Chile

SISS: Superintendencia de Servicios Sanitarios

SVZ: Zona Volcánica Sur

ZFP: Zona Falla Pucuro

## **RESUMEN**

El As es un metaloide muy nocivo, donde los efectos de contaminación crónica se asocian a varios tipos de enfermedades. Puede aparecer en el agua subterránea mediante disolución de minerales o meteorización química, con concentraciones generalmente inferiores a 10 µg/l. El estado de oxidación del As y su movilidad están controlados por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y pH, siendo el As (III) el más tóxico.

Este TFM revisa el estado de conocimiento sobre la contaminación geogénica por As en aguas subterráneas chilenas, identificando condiciones geológicas y factores que controlan su origen, distribución y mecanismos que permiten su liberación y concentración, integrando la información disgregada de diferentes estudios y generando cartografía de distribución de As en macrozonas, discretizando la información para aguas subterráneas y termales.

El origen del As en las aguas chilenas, está relacionado con procesos volcánicos e hidrotermales, donde el volcanismo activo determina un gradiente geotérmico alto que incrementa, la lixiviación de grandes volúmenes de roca por el hidrotermalismo.

Los valores de As determinados, presentan concentraciones excedidas en la Macrozona Norte, donde superan mil veces la norma, decreciendo hacia el sur del país. Los registrados en sistemas APR están levemente excedidos de la norma, situación grave, dado que éstos son destinados para consumo humano.

El Decreto Supremo DS 106 permite el uso de aguas embotelladas que, legalmente, aplicando la norma NCH409 no pueden ser usadas para agua potable, teniendo tres marcas comerciales chilenas de origen geogénico que superan tanto la norma de agua potable como normas internacionales.

## 1 INTRODUCCIÓN

El As es un metaloide que se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre con una concentración media de 2 mg/kg, en diversos cuerpos de agua, tanto subterránea como superficial, así como también en agua de mar. (Smedley y Kinniburgh, 2002). Puede aparecer en el agua subterránea mediante procesos de disolución de minerales o meteorización química, con concentraciones de fondo de As, generalmente inferiores a 10 µg/l en la mayoría de los países, sin embargo, existen valores comprendidos en un amplio rango (< 0,5 a 5.000 µg/l), asociándose valores elevados a procesos geoquímicos de origen natural (Lillo, 2008).

El As es muy tóxico para la salud humana, y no solamente en concentraciones altas (EAWAG, 2017). Una exposición crónica prolongada a As, provoca enfermedades a la piel, respiratorias, enfermedades cardiovasculares y diferentes tipos de cáncer. (Sancha y Castro, 2001; Ferrecio y Sancha, 2006). El último informe del Banco Mundial, llamado “Calidad desconocida: La crisis invisible del agua” (Damania et al., 2019), detalla el nivel de contaminación del agua potable en 72 países en el mundo, dentro de los cuales se encuentra el As.

Chile es un país de 4.300 km aproximadamente de longitud, con una anchura promedio de 177 km, que presenta una marcada heterogeneidad hídrica, en razón a sus factores hidrográficos, orográficos, climáticos, geológicos y, asimismo, de distribución de As en aguas subterráneas, razón por la cual es importante conocer los factores que lo controlan, en especial que existen concentraciones excedidas sobre la norma chilena de agua potable (10 µg/l), principalmente en el norte y centro del territorio. La presencia de As no es reciente en Chile, de hecho se encontraron restos de este metaloide en el cabello de momias de culturas atacameñas, que datan de miles años atrás.

El Trabajo Final de Máster, en adelante TFM, que se presenta a continuación, se centra en el As de origen natural en aguas subterráneas y termales, razón por la cual se discretizó la información existente para este tipo de aguas en diferentes partes del territorio.

## **2 OBJETIVOS**

El objetivo principal de este TFM es revisar el estado de conocimiento de la contaminación geogénica por As de forma general en Chile, planteando además, como objetivos secundarios los siguientes:

- a) Revisar el estado de conocimiento sobre el origen, condiciones geológicas y factores que controlan la distribución de As natural en las aguas subterráneas, así como los principales mecanismos que permiten su liberación y concentración en cantidades superiores que puedan afectar la salud humana.
- b) Integrar la información de concentraciones de As en fuentes termales y subterráneas en Chile, a nivel de Macrozonas (Norte, Centro y Sur).
- c) Identificar sectores donde se ha registrado, con datos y/o estudios, problemas de contaminación natural de As en acuíferos.
- d) Exponer la contradicción normativa de las aguas minerales destinadas a consumo humano en Chile, en relación al As.

## **3 METODOLOGÍA**

El As, a pesar de que es un metaloide nocivo en Chile, presente principalmente en las regiones del norte y centro, su información se encuentra disgregada y la que se dispone, se haya indiferenciada de las fuentes superficiales.

Para abordar el concepto de geoquímica del As y sus procesos, se utilizaron estudios generales enfocados en este tema (Smedley y Kinninburgh, 2002), (Fernández-Turiel et al., 2005), (Herath et al., 2006), (Lillo, 2008), (EAWAG, 2017), (Bundschuh, 2020).

El análisis de la situación de As en Chile, se realizó mediante una búsqueda exhaustiva de estudios realizados por la Dirección General de Aguas (DGA), entidad dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), y Universidades. Además, se realizó una búsqueda bibliográfica a través



de diferentes páginas web y bases bibliográficas, tales como: [www.google](http://www.google.com) scholar, [www.eawag.ch](http://www.eawag.ch), [www.gapmaps.org](http://www.gapmaps.org), [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), [www.springer.com](http://www.springer.com), y [www.dga.cl](http://www.dga.cl).

En este TFM se integraron las bases de datos de la DGA y universidades hasta el año 2020, elaborando una cartografía de distribución de As para tres macrozonas, creando y utilizando una geodatabase ArgGis, diferenciada en aguas subterráneas y fuentes termales.

Se homogeneizó toda la información existente en la unidad “ $\mu\text{g/l}$ ”, para así facilitar su comparación. Se elaboraron tablas con información de fecha de muestreo, ubicación en coordenadas UTM, tipo (aguas subterráneas y fuentes termales) y se discretizó la información de aguas embotelladas, antecedentes que se incorporarán en una plataforma abierta al público (GRAPHIC).

Por cada Macrozona, se sintetizó y entregó información de geología, climatología, hidrología, hidrogeología y condiciones de ocurrencia. Para ello, se elaboraron con Ilustrador, mapas de geología e hidrogeología para las tres macrozonas, con el fin de poder adaptar la información existente de la DGA a las macrozonas analizadas. Además, se construyeron figuras para presentar ejemplos de sectores de agua con As para diferentes usos en las tres macrozonas estudiadas.

Se elaboraron diagramas de cajas con Excel (Office 365 para Windows), para las aguas subterráneas, utilizando un universo de 273 datos, 184 (Macrozona Norte), 49 (Macrozona Centro) y 40 datos (Macrozona Sur). Para los diagramas de cajas de aguas termales, se consideró un universo de 145 datos, 35 datos en la Macrozona Norte, 32 datos distribuidos en la Macrozona Centro y 78 datos correspondientes a la Macrozona Sur.

Se analizó la normativa de agua potable y aguas minerales, con los resultados de estudios realizados en aguas embotelladas.

## 4 OCURRENCIA DE AS DE ORIGEN NATURAL

### 4.1 ROCAS, SEDIMENTOS Y SUELOS

Las concentraciones globales de As en algunos componentes de la geosfera se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Concentraciones de As en la Geosfera. (Adaptado de Tapia, 2014)

<b>Componente terrestre</b>	<b>Material</b>	<b>As (mg/kg)</b>
Corteza continental superior	Roca	4.8
Manto superior	Manto	21 – 32

La presencia natural de As en suelos, sedimentos y aguas se asocia a la concentración de As presente en rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas, el cual es movilizado al medio ambiente a través de procesos naturales como meteorización, actividad biológica y emisiones gaseosas volcánicas. En rocas volcánicas, el As se encuentra con valores medios de 7 mg/kg y en sedimentos se han registrado valores medios de 8 mg/kg, en la XV Región (Tapia et al., 2019). Las concentraciones de As en suelos varían, en general, en un rango de 1-10 mg/l (Smedley y Kinniburgh, 2002). Las rocas más ricas en As están relacionadas en su mayoría con depósitos minerales, pórfidos cupríferos, depósitos epitermales, salmueras y actividad geotermal. Como ocurre con las rocas, las concentraciones pueden ser mayores en suelos o sedimentos que se encuentren en áreas mineralizadas y con materiales ricos en sulfuros como la pirita, sulfuro muy común en los depósitos minerales de Chile.

Se han identificado diversos niveles de As en rocas sedimentarias, travertinos, donde se detectaron concentraciones elevadas de As en las estructuras del campo geotermal de Puchuldiza y los Géiseres de El Tatio, (Fernández- Turiel et al., 2005). Otros casos se presentan en precipitados salinos del desierto de Atacama (Tapia, 2018), evaporitas del Altiplano-Puna plateau (Risacher et al., 1999), depósitos epitermales de alta sulfidización en el yacimiento de El Indio, sedimentos de la cuenca del río Elqui (Oyarzún et al., 2004).

En el valle del río Copiapó en muestras de barro, que tienen concentraciones de As inferiores a 100 mg/kg. En el sur de Chile, en la VIII Región, se han identificado concentraciones promedio de As de 18,82 a 23,53 mg/ kg. En pórfidos cupríferos las concentraciones de As pueden ser elevadas y están relacionadas principalmente a la presencia de minerales como tennantita y enargita (Bundschuh, 2020).

## 4.2 AGUAS SUPERFICIALES

En la fase acuosa, puede encontrarse, como especie iónica en distinto estado de oxidación, As (III) o As (V). Así, se puede tener As en aguas superficiales (ríos, charcas, torrentes, suministro doméstico de agua, etc.) o en aguas subterráneas (acuíferos).

En general, la forma pentavalente del As (V) tiende a predominar en las aguas superficiales (Lillo, 2008). El As suele presentarse en concentraciones entre 0,1 a 0,8  $\mu\text{g/l}$  en ríos (Smedley, 2002; Tapia, 2014). Estas concentraciones pueden variar por factores como recarga, litología de la cuenca, drenaje de zonas mineralizadas, clima, actividad antropogénica como minería y vertidos urbanos o industriales.

En climas áridos, debido a procesos de evaporación, con consecuente aumento de la salinidad y pH, se favorece el aumento de As. Un ejemplo de ello, son las aguas del río Loa, con concentraciones extremadamente altas (190-21.800  $\mu\text{g/L}$ ). (Tapia, 2014). Procesos antropogénicos como la actividad minera y contaminación por vertidos también favorecen el incremento de la concentración de As, pero no son los únicos responsables de este incremento, la contaminación geogénica y procesos asociados juegan un rol importante en las concentraciones de As de las aguas superficiales.

## 4.3 ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS

Generalmente, el As inorgánico geogénico está presente en el agua por disolución natural de minerales que incluyen As en su composición. Bajo condiciones de reducción, generalmente en aguas subterráneas, predomina el As trivalente o arsenito As (III), pero no siempre es así,

pudiéndose encontrar ambos estados de oxidación. (Lillo, 2008). El estado de oxidación del As, y su movilidad están controlados por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y pH, siendo las más tóxicas las especies químicas de As (III). La movilidad del As es muy sensible a las condiciones de pH, en el rango de valores de 6,5 a 8,5, representativos de aguas subterráneas en condiciones oxidantes y reductoras (Smedley y Kinniburgh, 2002).

En la Figura 1 se puede observar que el valor del pH y del Eh, van a condicionar una mayor presencia de una especie acuosa de As determinada (Lillo, 2008).

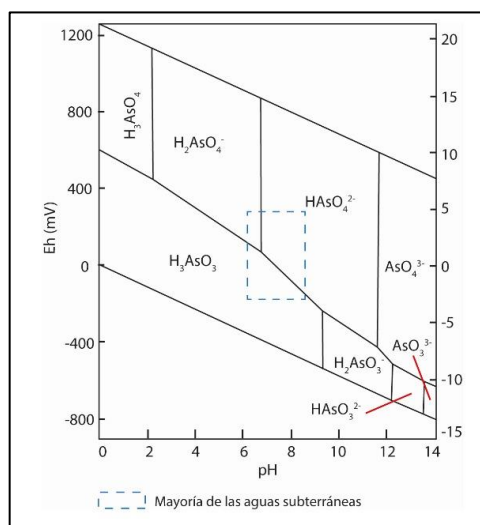


Figura 1: Diagrama Eh-pH de especies acuosas de As. (Adaptado de Lillo, 2008)

El As suele presentarse en concentraciones <0.5 hasta 5.000 µg/l (Smedley y Kinniburgh, 2002) en los acuíferos. Estas concentraciones no se restringen a determinadas condiciones, apareciendo en acuíferos relacionados a procesos geotermales, depósitos minerales o procesos antropogénicos (industria, urbanismo, actividad agrícola, agropecuaria, etc.).

La mayoría de los contenidos altos en As en acuíferos están ligados a procesos geoquímicos naturales (disolución-precipitación, adsorción-desorción, intercambio iónico, etc.), produciendo contaminación de origen natural o geogénica, en grandes áreas y en ambientes geológicos diversos, como formaciones volcánicas, volcano-sedimentarias, cuaternarias, metasedimentos con filones mineralizados, entre otros. Así, no existe un modelo geológico/hidrogeológico común para todas las ocurrencias, encontrándose As en ambientes geológicos muy variados.

## 5 ARSÉNICO Y NORMATIVA DE AGUAS EN CHILE

### 5.1 Norma de Agua Potable- NCH 409/2005

La norma chilena NCH 409 ha ido incorporando las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) con un desfase de 10 a 20 años, de acuerdo a la realidad chilena (Figura 2). Es así que, solo a partir de 2005 la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) fijó el límite para el agua potable en 10  $\mu\text{g/L}$  como indica la OMS, otorgando a las empresas sanitarias un plazo de diez años, el cual se dividió en dos períodos de adaptación de 5 años c/u, para que adecuaran sus procesos y así poder cumplir con la norma de calidad. Con un descenso de 50  $\mu\text{g/l}$  a 30  $\mu\text{g/l}$  en 2010 y de 10  $\mu\text{g/l}$  en 2015.

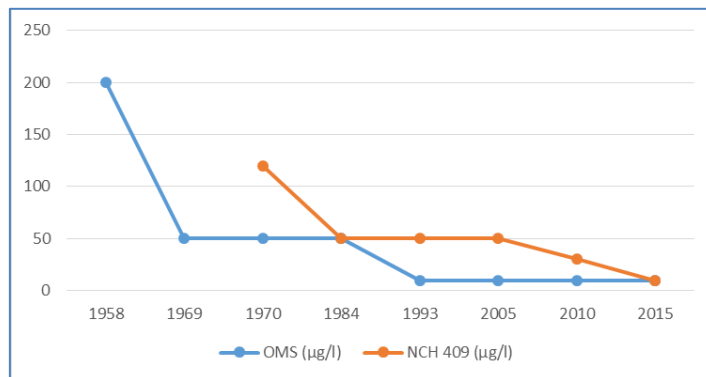


Figura 2: Gráfico Evolución Normas As OMS y Chile- Valor Máximo de As (Adaptado OMS, 2005 y NCH 409 2005)

### 5.2 Norma de Aguas Minerales- DS 106

Las aguas minerales, de acuerdo a lo señalado en el DS 106 (MINSAL, 1997), corresponden a aguas naturales que emanan del suelo con temperaturas inferiores a 18°C. Este tipo de aguas, cuando son envasadas y destinadas al consumo humano deben cumplir con condiciones similares a las exigidas en la NCH 409.

El límite para As permitido por el DS 106 para aguas minerales es de 50  $\mu\text{g/l}$ , lo cual es cinco veces mayor a lo indicado en la norma de agua potable, NCH 409 y por la OMS. Esto es sumamente contradictorio, ya que las aguas embotelladas, de acuerdo a lo indicado en el mismo DS 106, deben poseer características naturales de pureza que permitan el consumo humano, lo

que no ocurre en el caso del As por el riesgo que supone para la salud pública.

Chile tiene regulaciones menos restrictivas en relación a lo dictaminado por organismos internacionales. En 1994, se derogó la norma de calidad ambiental de As para estudiarla con más profundidad, pero a la fecha aún está en estudio.

## **6 ARSÉNICO GEOGÉNICO EN LAS AGUAS DE CHILE**

A modo de contextualización, se presenta cita textual de lo señalado en el estudio Gran Minería y Medio Ambiente (Sancha, 1998): *“las fuentes de contaminación están vinculadas a la particular geología regional (volcanismo cuaternario) que se manifiesta en los recursos hídricos, minerales y energéticos existentes. Esta condición natural por su origen acompaña y acompañará siempre a las poblaciones y faenas mineras de la zona norte de Chile (Antofagasta y Atacama) obligando de forma permanente a su conocimiento, vigilancia y control”*.

En los próximos apartados se presenta la información recogida en este TFM, estructurada de acuerdo al concepto de macrozonas que la Dirección General de Aguas-DGA, institución a cargo de promover la gestión y administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente, utilizó en el año 2017 para la elaboración del Atlas del Agua.

Las cuatro macrozonas identificadas corresponden a la Macrozona Norte, Macrozona Centro, Macrozona Sur, Macrozona Austral, de las cuales este TFM estudia las tres primeras.

En la Figura 3, se muestran las diferentes regiones que constituyen cada una de estas macrozonas.

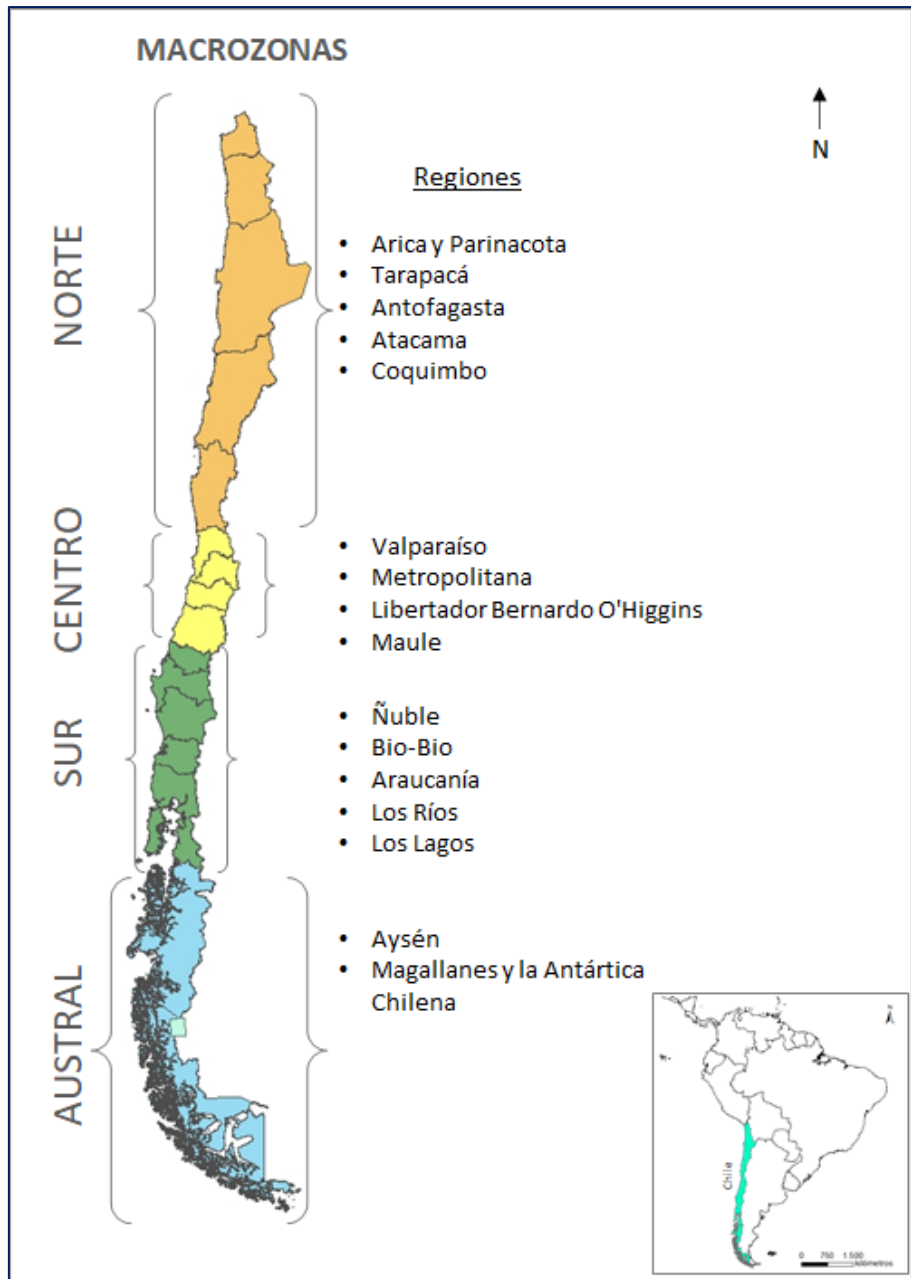


Figura 3: Macrozonas en Chile. (Adaptado de Atlas de Chile DGA, 2016)

### 6.1 MACROZONA NORTE

La Macrozona Norte incluye las Regiones de Arica y Parinacota (XV), Tarapacá (I); Antofagasta (II), Atacama (III) y Coquimbo (V).

### 6.1.1 Geología

La geología de la Macrozona Norte está constituida por las siguientes unidades (DGA, 1986):

- Rocas metamórficas (Pz): integradas por metareniscas, filitas, pizarras, esquistos, gneises y anfibolitas, de edad paleozoica, las que se distribuyen de forma muy reducida hacia el sector costero del sur de la Macrozona (Figura 4).
- Rocas plutónicas e hipabisales (Pzg): integradas por intrusivos graníticos de edad paleozoica, que corresponden al Basamento Impermeable de la Cordillera de la Costa, las que se distribuyen ampliamente en la parte sur hacia el W de la Macrozona y de forma discontinua hacia el N de ésta (Figura 4).
- Rocas plutónicas e hipabisales (Jtg, Jkg, Ktg): integradas por intrusivos graníticos de edad jurásica y cretácica, que corresponden al Basamento Impermeable de la Cordillera de la Costa, los que se distribuyen en la parte medio y central de la Macrozona (Figura 4).
- Rocas mixtas sedimentario volcánicas (Q, J): están compuestas por rocas sedimentarias-volcánicas con cubierta discontinua de depósitos no consolidados, de edad jurásica y cuaternaria. Se distribuyen en una franja costera en la parte superior (Figura 4).
- Rocas mixtas sedimentario volcánicas (J, K, T): compuestas por coladas, brechas e ignimbritas con intercalaciones de areniscas y conglomerados, de edades jurásica y cretácica, las que se distribuyen ampliamente en una franja central en la parte S, mientras que las jurásicas presentan una reducida distribución hacia la parte media. Las unidades que llegan al Terciario, se distribuyen en una franja central a la altura del paralelo 23° lat S (Figura 4).
- Rocas mixtas sedimentario volcánicas (T): están compuestas por coladas y brechas, con intercalaciones de lutitas, areniscas y conglomerados, de edad terciaria. Se distribuyen de forma discontinua hacia el oriente en casi la totalidad de la Macrozona (Figura 4).
- Rocas volcánicas fracturadas (TQ): integradas por coladas, tobas y brechas andesíticas con intercalaciones de sedimentos clásticos continentales ignimbríticos, riolíticos y dacíticos, del Terciario y Cuaternario. Se distribuyen en la parte norte hacia el E. El volcanismo en esta Macrozona se relaciona con el segmento norte de la SVZ (Figura 4).
- Depósitos no consolidados (Q): corresponden a depósitos de relleno cuaternario integrados por sedimentos fluviales, glaciales, aluviales y lacustres, los cuales se



distribuyen ampliamente en la Macrozona (Figura 4).

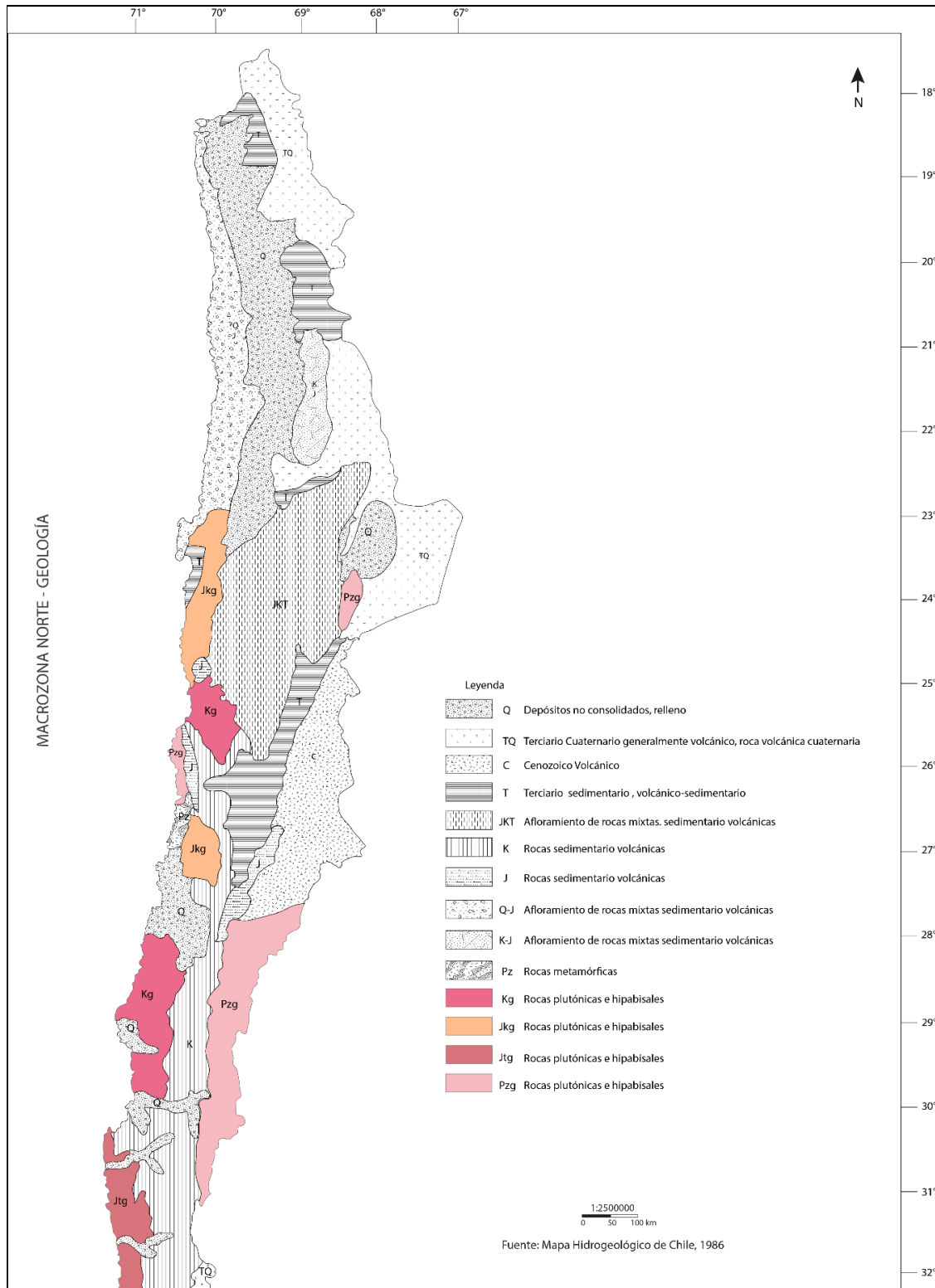


Figura 4: Mapa Geológico-Macrozona Norte. (Adaptado Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986)

### 6.1.2 Climatología

Según el Atlas del Agua (DGA, 2016), esta Macrozona presenta un clima árido a semiárido, con escasas precipitaciones que aumentan hacia la Región de Coquimbo. Corresponde al área geográfica más seca de Chile, con uno de los paisajes más áridos del mundo, en donde gran parte del territorio está cubierto por el Desierto de Atacama. Pese a estas condiciones los cursos de agua dan vida a valles, oasis, quebradas y salares que albergan vegetación y fauna acondicionada a la aridez.

### 6.1.3 Hidrología e Hidrogeología

#### a) Hidrología

##### i. Precipitación Macrozona Norte

El régimen dominante de precipitaciones según el Atlas del Agua (DGA, 2016) es muy seco a seco, con una precipitación promedio de 87 mm/año, siendo la región de Coquimbo en donde se producen las mayores precipitaciones de este sector y las regiones de Tarapacá, Antofagasta y Atacama en donde se presentan las menores precipitaciones durante el año, antecedentes que se incluyen en la Tabla 2.

Tabla 2: Precipitaciones Macrozona Norte. (Adaptado de DGA, 2016)

<b>Región</b>	<b>Precipitación (mm/año)</b>
Arica y Parinacota	132
Tarapacá	77
Antofagasta	45
Atacama	82
Coquimbo	222

ii. Escorrentía Macrozona Norte

La escorrentía en esta Macrozona es de 36,9 m<sup>3</sup>/s. En la Tabla 3 se presentan los datos de escorrentía por cada región.

Tabla 3: Escorrentía- Macrozona Norte. (Adaptado de DGA, 2016)

<b>Región</b>	<b>Escorrentía (m<sup>3</sup>/s)</b>
Arica y Parinacota	5,5
Tarapacá	6,4
Antofagasta	0,9
Atacama	1,9
Coquimbo	22,2

iii. Caudales Macrozona Norte

En el Atlas del Agua, se incluyen los períodos 2013-2014. Con el fin de actualizar esta información, se buscó en los registros de la DGA ([www.dga.cl](http://www.dga.cl)), detectándose que el último período con datos, corresponde al año 2019, los cuales se incluyen en la Tabla 4.

Los caudales en la Macrozona Norte según los datos observados en 13 estaciones DGA son del orden de 0,67-4,17 m<sup>3</sup>/s durante el período del año 2019.

De la Tabla 4, se observa que los mayores caudales anuales en los períodos 2013-2014 y 2019, corresponden a la estación Río Elqui en Algarrobal, con un caudal promedio entre períodos de 7,7 m<sup>3</sup>/s.

Tabla 4: Estaciones DGA y caudales - períodos 2013-2014 y 2019. (Adaptado de DGA (2013 a 2019))

Región	Estación	Período	
		2013-2014 m <sup>3</sup> /s	2019 m <sup>3</sup> /s
Arica y Parinacota	Río Lluta en Alcerreca	1,9	2,32
	Río Lluta en Panamericana	1,4	3,014
	San José en Ausipar	1,1	SD
Tarapacá	Río Coscaya en Saitoco	0,1	SD
Antofagasta	Río Loa en desembocadura	0,3	SD
	Río Loa antes de Represa Lequena	0,6	1,098
	Río Loa en Chacance	0,9	SD
	Río Loa en Finca	0,7	0,673
Atacama	Río Copiapó en La Puerta	2,6	1,95
	Río Huasco en Algodones	7,7	2,605
Coquimbo	Río Elqui en Algarrobal	11,2	4,17
	Río Grande en las Ramadas	4,2	1,08
	Río Choapa en Cuncumén	9,6	1,66

SD: Sin datos

## b) Hidrogeología

La Macrozona Norte está integrada por tres unidades hidrogeológicas, I, II y III (DGA, 1986).

- A. Unidad I, constituida por depósitos no consolidados y rocas sedimentarias terciarias y cuaternarias, de alta a baja permeabilidad, con permeabilidad primaria en formaciones porosas. Tiene dirección de flujo dominante-W, NE-SW y NW-SE. Presenta potencias de 100 m o superiores, con pozos de alto rendimiento. Se distribuye homogéneamente de norte a sur en la parte central del territorio en la XV, I Regiones y parte de la II Región, presentándose como depósitos fluviales, de forma discontinua en las regiones III y IV (Figura 5).

- B. Unidad II, constituida por rocas volcánicas fracturadas y carbonatadas cenozoicas y terciarias, de alta a baja permeabilidad, con permeabilidad secundaria en roca. Presenta direcciones de flujo dominantes y NE-SW. Se distribuye homogéneamente de norte a sur en la parte oriental del territorio en las XV, I y II Regiones (Figura 5).
- C. Unidad III, integrada por rocas volcánicas, volcanosedimentarias, plutónicas, hipabisales y metamórficas desde el paleozoico al cuaternario, de muy baja a nula permeabilidad. Presenta direcciones de flujo dominante NE-SW y EW. Se distribuye homogéneamente en toda la Macrozona (Figura 5).

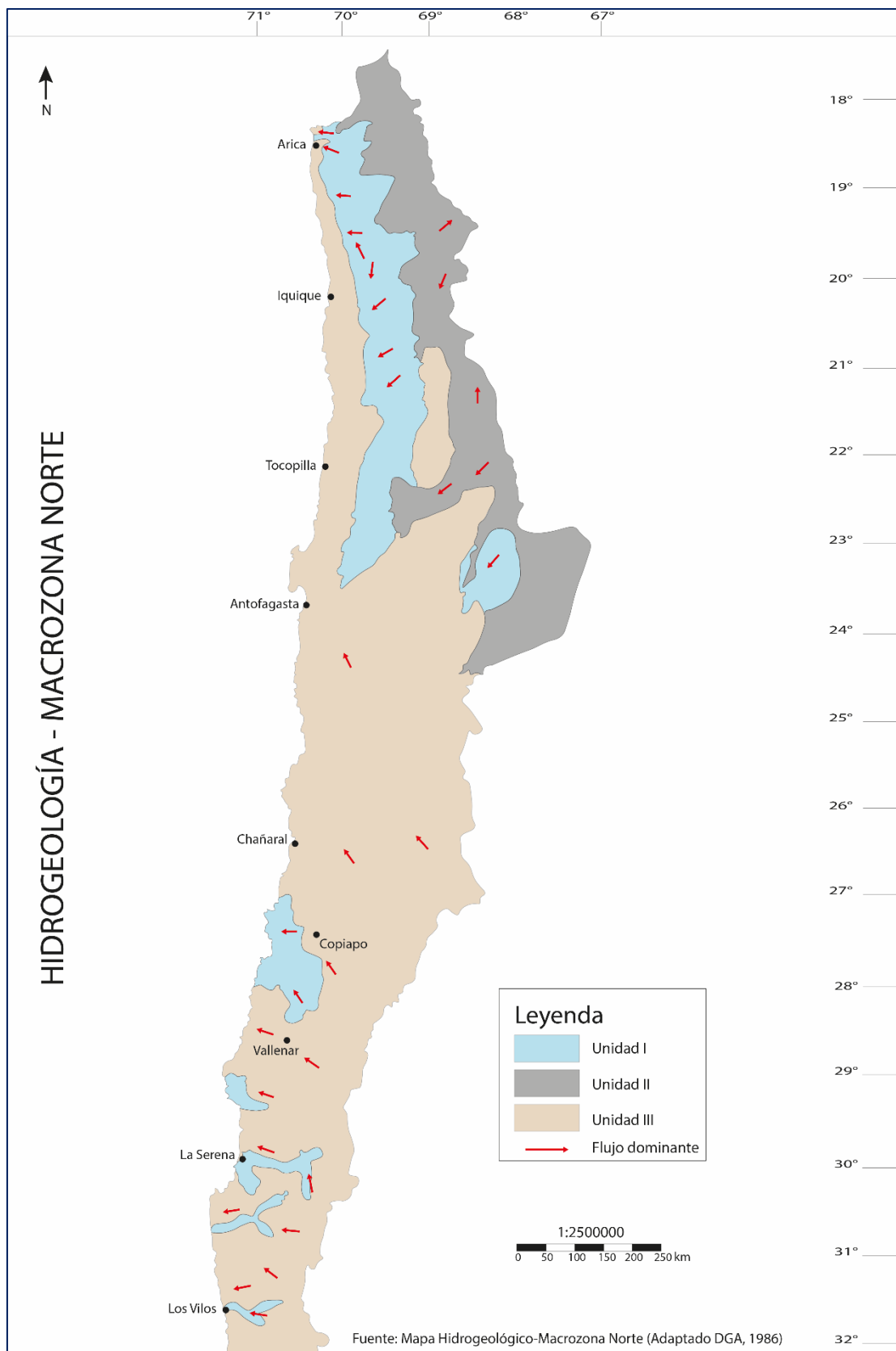


Figura 5: Mapa Hidrogeológico-Macrozona Norte (Adaptado DGA, 1986)

#### 6.1.4 Ocurrencia de Arsénico en las Aguas:

Las altas concentraciones de As presentes en el agua subterránea en esta Macrozona son de origen geogénico, es decir, están relacionadas con alguno de los procesos geológicos que han afectado y afectan a esta macrozona. El origen del As en el agua de la zona cordillerana se ha asociado al volcanismo e hidrotermalismo. La evidencia de la huella hidroquímica de estos procesos en el agua es indudable (alta temperatura, alta salinidad, concentraciones elevadas de As, B y F. (Fernández – Turiel et al, 2005).

El As se distribuye a lo largo de toda la Macrozona hasta la ciudad de La Serena, capital de la IV Región, restringiéndose en general en la zona cordillerana. Presenta varias manifestaciones termales, donde hay una huella hidroquímica altamente enriquecida en As.

La distribución de As en aguas subterráneas es muy alta y excedida de la norma principalmente en las regiones XV, I, II y la parte norte de la III. (Figura 6).

Las fuentes termales excedidas en As, superiores a 100  $\mu\text{g/l}$ , se distribuyen en casi toda la Macrozona hacia el sector más oriental. Las concentraciones máximas de As, se encuentran en las fuentes termales, con valores superiores a 10.000  $\mu\text{g/l}$  (Figura 6).

Esta Macrozona de condiciones hiperáridas, las aguas con anomalías en As son subterráneas y superficiales, siendo estas últimas de distribución más restringida, estando muchos de los ríos originados por manantiales termales en la alta cordillera. (Fernández- Turiel et al, 2005).

En la quebrada de Tarapacá, las aguas del río Camarones exceden los 500  $\mu\text{g/l}$  de As, llegando en ocasiones a 2.000  $\mu\text{g/l}$  y se han detectado pozos en el sector con concentraciones de 200 a 1.000  $\mu\text{g/l}$ . (Fernández – Turiel et al, 2005).

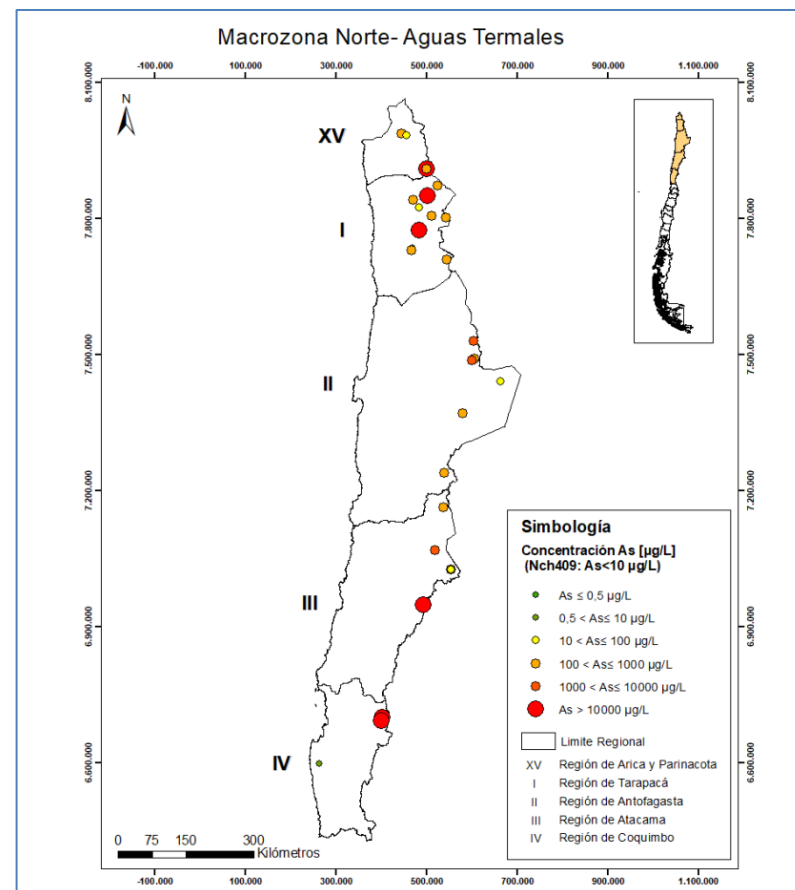
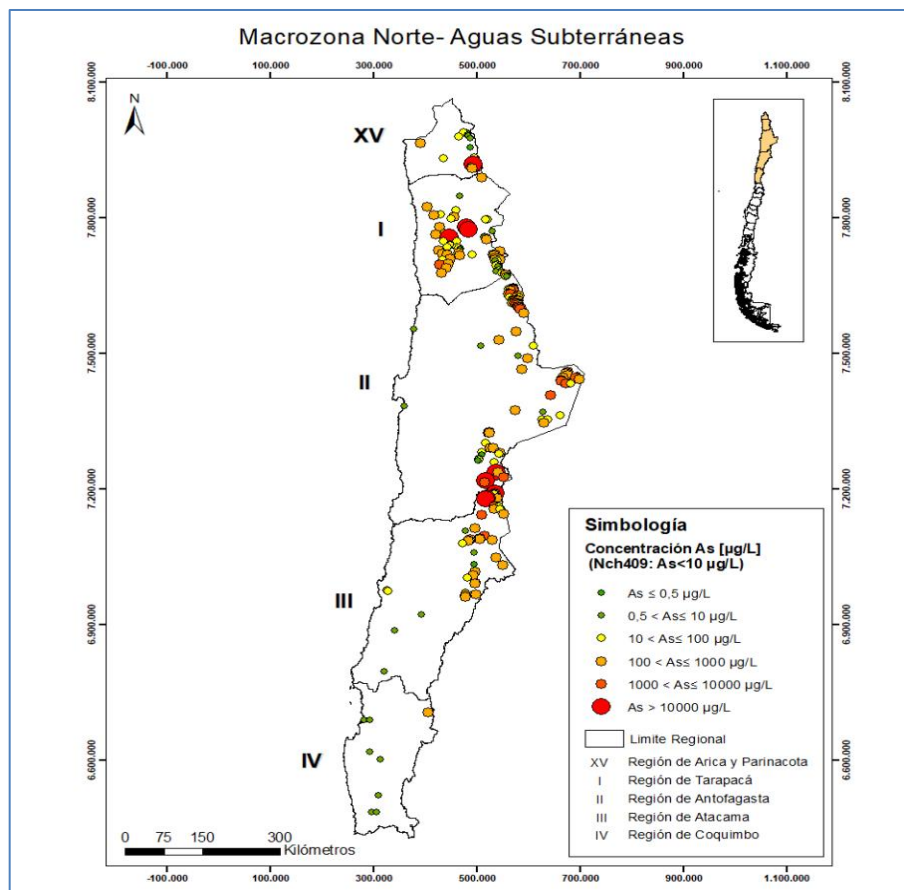


Figura 6: Distribución en Macrozona Norte de As en Aguas Subterráneas y Fuentes Termales (Elaborado a partir de datos de Henríquez, 1978; Hauser, 1997; Risacher et al., 1999; Romero et al., 2003; Oyarzún et al, 2004; Fernández – Turiel et al, 2005; Lillo, 2008; Bonatici, 2017; DGA, 2017; Lagos, 2017; Tapia et al., 2018; Vega et al, 2018; Tapia et al., 2019; Bundschuh, 2020; Nordstrom, 2020; www.dga.cl)



El río Loa tiene un contenido medio de As de 1.400  $\mu\text{g/l}$ , aportado por el río Salado que nace en El Tatio (Figura 7). Este constituye el campo geotérmico más alto del mundo (4.290 msnm) y el de mayor extensión en Sudamérica.

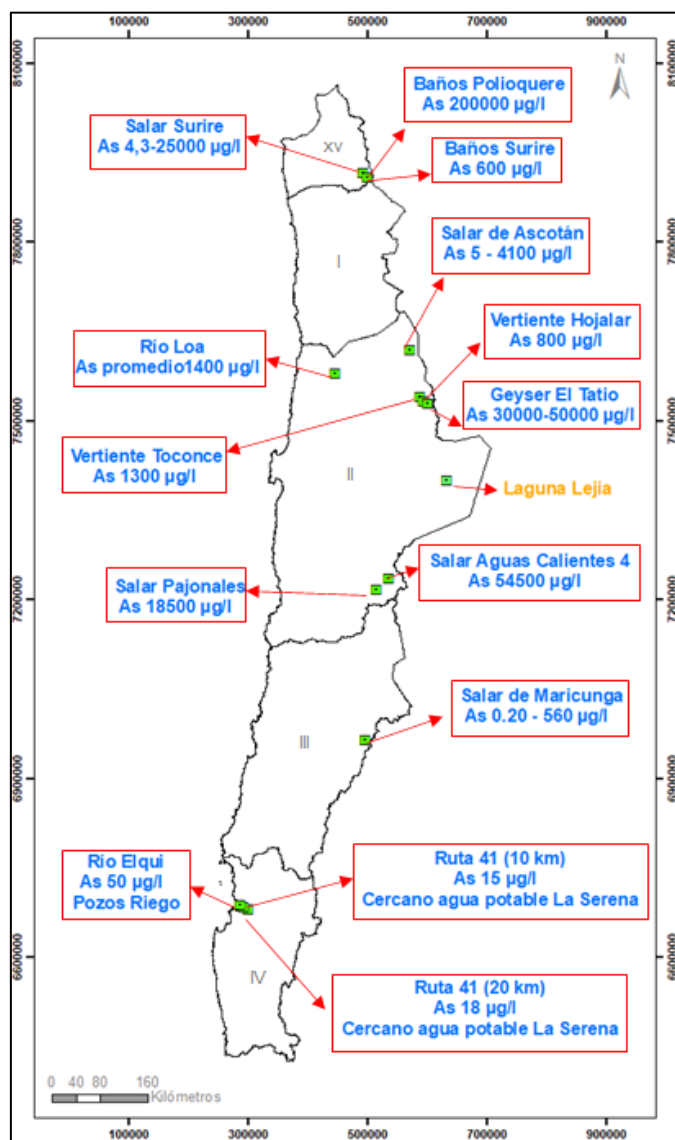


Figura 7: Sectores con As- Macrozona Norte (Elaborado a partir de datos de Hauser, 1997; Risacher et al., 1999; Oyarzún et al., 2004; Tapia et al, 2019; [www.dga.cl](http://www.dga.cl))

El campo geotermal de El Tatio, está constituido por estratovolcanes andesíticos e integrado por un centenar de manantiales, emplazándose en los niveles superiores de una depresión volcano-tectónica, denominada Graben El Tatio (Lagos, 2017). Se han detectado concentraciones de As  $>30.000-50.000 \mu\text{g/l}$  (Nordstrom, 2020), que se incorporan al agua durante procesos de

interacción agua-roca. Los géiseres del Tatio proveen la carga contaminante al río Loa, a través de retrabajamiento y erosión de los depósitos antiguos de terraza (Wilson, 2011). Estas concentraciones altas proporcionan una fuente adicional de As disuelto al río El Loa (Romero et al., 2003). Se trata de un acuífero potente, caracterizado por rocas volcánicas con fracturas de origen tectónico y diaclasas de enfriamiento, lo que condiciona la formación de este reservorio geotermal de tipo clorurado sódico. En general, las aguas del sector norte de El Tatio presentan altos contenidos de As, asociados a fluidos provenientes directamente desde el reservorio principal (por procesos *upflow*), sin evidencias de flujos laterales importantes ni diluciones con acuíferos superficiales (Lagos, 2017).

En la evolución petroquímica de estas formaciones ígneas, el As está muy concentrado en los últimos cristalizados magmáticos y durante el estadio pegmatítico se separan grandes cantidades de minerales arseníferos (arsenopirita y loellingita). En los yacimientos formados en contactos ígneos, se encuentra cobaltita. Estos minerales se combinan con azufre y es normal encontrarlos en las emanaciones volcánicas (Henríquez, 1978).

Las aguas de las vertientes Hojalar y Toconce son de grado geotérmico alto, asociado a un área de volcanismo, con concentraciones de As de 800 y 1.300  $\mu\text{g/l}$ , respectivamente (Tapia et al., 2018a), dando lugar a los ríos homónimos (Henríquez, 1978).

La unidad morfológica del altiplano está integrada principalmente por materiales piroclásticos ignimbríticos, donde, se han desarrollado aparatos volcánicos cuaternarios formados por efusiones andesíticas, basálticas y por sedimentos cuaternarios originados a expensas de los materiales piroclásticos (Henríquez, 1978).

En los baños de Surire, se detectaron concentraciones elevadas de As de 200.000  $\mu\text{g/l}$  (Hauser, 1997). Asimismo, en los salares de Ascotan y Surire, se han encontrado muestras de sulfuros de As asociados a yacimientos de boratos (Chong, 2000).

Los Baños Polloquere, Puchuldiza, Ojos de Ascotán, Géiseres de El Tatio, Baños del Toro presentan altas concentraciones de As, B y F.

En el altiplano de Antofagasta se ha detectado que hay un aumento de As en las aguas superficiales a causa de las precipitaciones que lavan por escorrentía superficial los terrenos volcánicos, y a lo largo de su recorrido se va produciendo dilución parcial en el As de la concentración original en la fuente de origen (Tapia et al., 2018; Henríquez, 1978).

En la región de Antofagasta, hay una secuencia volcanosedimentaria cuaternaria, donde se desarrolla un acuífero que presenta concentraciones excedidas de As entre 100 y 1.000  $\mu\text{g/l}$ , estando la mayor parte del As en el agua, como arsenatos. Son aguas con salinidad alta y con contenidos altos en B. El desarrollo de condiciones oxidantes en climas áridos facilita la presencia de As en el agua, si existen materiales que pueden aportar éste (Lillo, 2008).

En la parte norte de la III Región, se tienen concentraciones de As disueltas más altas en aguas superficiales, que provienen de fuentes naturales, con órdenes de magnitud mayores a los promedios mundiales en los ríos. En la fracción particulada, se infiere que el enriquecimiento de As es de origen geogénico, proveniente de salares, evaporitas neógenas y depósitos epitermales de la Cordillera de los Andes (Tapia et al., 2019).

En la zona norte de la Región de Atacama, las fuentes naturales de As podrían asociarse a cinturones evaporíticos, o al cinturón metalogénico de Maricunga, rico en depósitos de oro de alta sulfuración (Tapia et al., 2018 a).

En la Región de Coquimbo, la explotación del yacimiento aurífero El Indio, se cerró a mediados del año 2002 y a pesar de ello, la mineralización arsenical presente, ha seguido aportando As y otros contaminantes (Cu, Zn, Fe y  $\text{SO}_4$ ), debido a los procesos naturales exógenos que continúan actuando sobre las rocas alteradas y fracturadas. Asimismo, la quebrada de Marquesa ha recibido relaves de Talcuna (Oyarzún et al, 1998), material arrastrado en varias oportunidades como corrientes de lodo o aluviones que descargan al Río Elqui, por lo que los sedimentos del río y sus tributarios presentan concentraciones anómalas de As y Cu (Guevara et al, 2006). En la actualidad, en el sector de la Ruta 41 entre los km 10 y 20, durante el último año, se han registrado concentraciones de As en pozos, levemente excedidas de la Norma NCH 409, de 15 a 18  $\mu\text{g/l}$ , que se encuentran cercanos a las captaciones de agua potable de la ciudad de La

Serena. Por otro lado, de acuerdo a información entregada por parceleros, en pozos de riego de 35 m de profundidad, ubicados a 100 m del río Elqui y cercanos al aeropuerto, se detectaron 50  $\mu\text{g/l}$ . El río Elqui en sus orígenes presenta altas concentraciones de As en sus flujos superficiales y en las aguas subterráneas (Oyarzún et al., 2006; Vega et al., 2018).

Los ríos de las regiones XV, I y II (zona altiplánica) nacen de vertientes en rocas volcánicas fracturadas, por infiltración y recarga de aguas meteóricas, las cuales en su mayoría son termales y dependiendo del caudal, pueden llegar a formar géiseres o, por evaporación, salares (Henríquez, 1978). El origen del As en relación con el volcanismo cuaternario y la actividad hidrotermal se asocian a la Zona Volcánica Central de la Cordillera de los Andes, que incluye más de cincuenta volcanes que han estado activos durante el cuaternario y algunos de ellos aún lo son en la actualidad (Fernández- Turiel, 2005).

Prevalecen las condiciones oxidantes en los acuíferos, donde el As está mayoritariamente disuelto en el agua en forma de As (V), siendo la especie predominante  $\text{HAsO}_4$  para  $\text{pH} < 6.9$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$  para  $\text{pH}$  más elevado (Fernández- Turiel, 2005).

## 6.2 MACROZONA CENTRO

La Macrozona Centro incluye las Regiones de Valparaíso (V), Metropolitana (RM); del Libertador Bernardo O'Higgins (VI) y del Maule (VII).

### 6.2.1 Geología

La geología de la Macrozona Centro está constituida por las siguientes unidades (DGA, 1986):

- Rocas plutónicas e hipabisales (Pzg): integradas por intrusivos graníticos de edad paleozoica, las que se distribuyen en casi la totalidad de la Macrozona hacia el poniente (Figura 8).
- Rocas metamórficas (Pz): corresponden a rocas metamórficas de edad paleozoica, integradas por metareniscas, filitas, pizarras, esquistos, gneises y anfibolitas, las que se distribuyen en el extremo occidental hacia el S de la Macrozona (Figura 8).

- Rocas plutónicas e hipabisales (Jtg, Ktg): integradas por intrusivos graníticos de edad jurásica y cretácica, con una distribución menor en el N de la Macrozona (Figura 8).
- Rocas mixtas sedimentario volcánicas (J, K): compuestas por coladas, brechas e ignimbritas, con intercalaciones de areniscas y conglomerados, de edades jurásica y cretácica, las que se distribuyen ampliamente en una franja oriental cordillerana, mientras que las jurásicas presentan una reducida distribución hacia el N (Figura 8).
- Rocas mixtas sedimentario volcánicas (T): están compuestas por coladas y brechas, con intercalaciones de lutitas, areniscas y conglomerados, de edad terciaria. Se distribuyen de forma discontinua hacia el E (Figura 8).
- Rocas volcánicas (TQ): integradas por coladas y depósitos piroclásticos, dacíticos, andesíticos y basálticos, de edades terciaria y cuaternaria. Se distribuyen escasamente hacia el NE. Esta Macrozona se relaciona con el segmento norte de la SVZ (Figura 8).
- Depósitos no consolidados (Qv): corresponde al relleno cuaternario de origen volcánico, integrado por coladas y depósitos piroclásticos dacíticos, andesíticos y basálticos, los cuales presentan una distribución menor (Figura 8).
- Depósitos no consolidados (Q): corresponde a depósitos de relleno cuaternario integrado por sedimentos fluviales, glaciales, aluviales y lacustres, los cuales se distribuyen ampliamente hacia la costa en la parte norte y hacia el centro en el resto de la Macrozona (Figura 8).

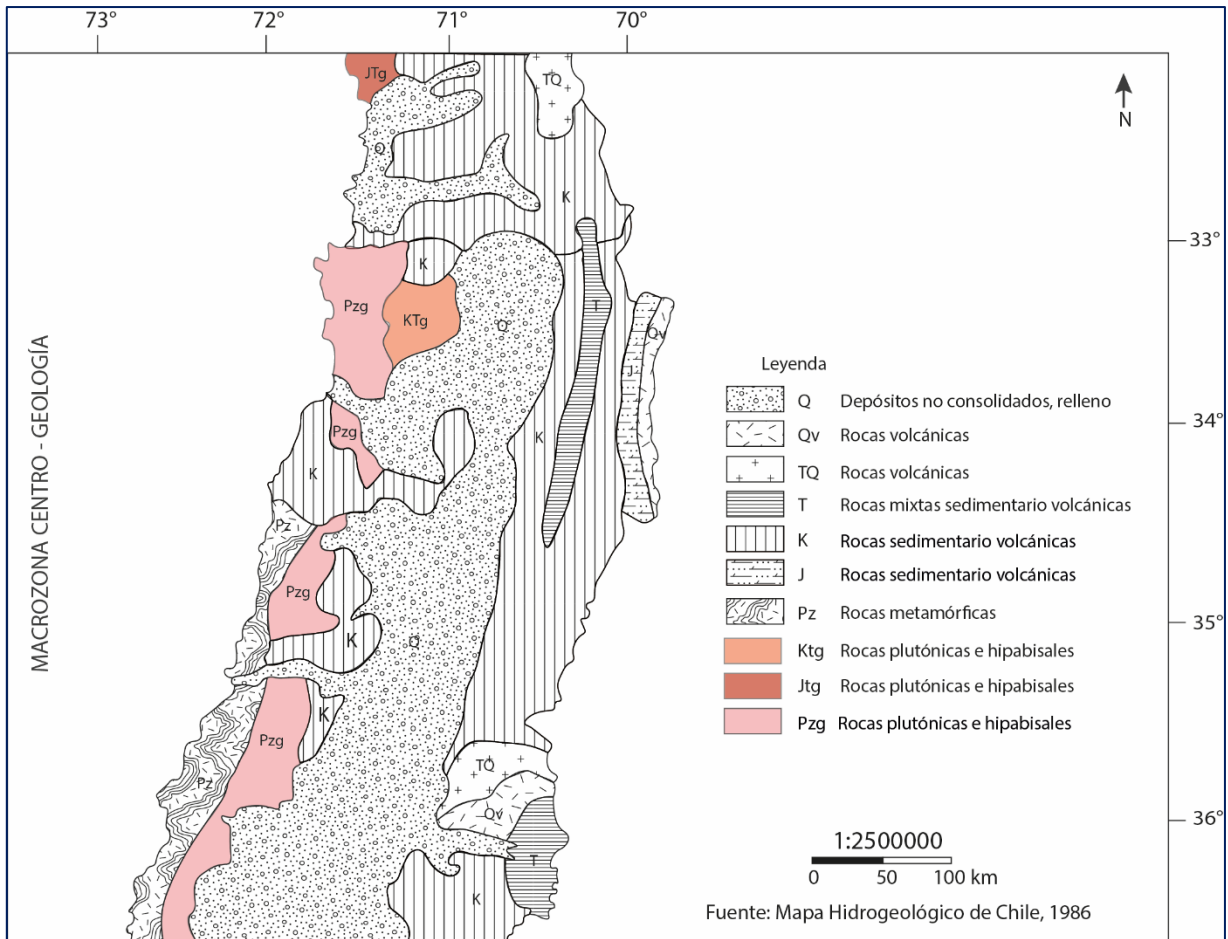


Figura 8: Mapa Geológico-Macrozona Centro (Adaptado Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986)

## 6.2.2 Climatología

Se caracteriza por un clima mediterráneo con precipitaciones moderadas, siendo el promedio anual de 943 mm/año las cuales se concentran en invierno, con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses (DGA, 2016). Esta Macrozona posee los suelos más fértiles de Chile, lo que permite la producción de variedades de frutas, hortalizas y flores destinadas a la exportación.

## 6.2.3 Hidrología e Hidrogeología

### a) Hidrología

#### i. Precipitación Macrozona Centro

El régimen dominante de precipitaciones según el Atlas del Agua Chile (DGA, 2016) es seco a normal, donde la precipitación promedio es de 943 mm/año, siendo la Región del Maule en donde se producen las mayores precipitaciones de este sector y la Región de Valparaíso donde se presentan las menores precipitaciones durante el año (Tabla 5).

Tabla 5: Precipitaciones Macrozona Centro. (Adaptado de DGA, 2016)

<b>Región</b>	<b>Precipitación (mm/año)</b>
Valparaíso	434
Metropolitana(RM)	650
O'Higgins	45
Maule	82

ii. Escorrentía Macrozona Centro

La escorrentía en esta Macrozona es de 1.116 m<sup>3</sup>/s. En la Tabla 6 se presentan datos de escorrentía por región.

Tabla 6: Escorrentía Macrozona Centro (Adaptado de DGA, 2016)

<b>Región</b>	<b>Escorrentía (m<sup>3</sup>/s)</b>
Valparaíso	41
Metropolitana (RM)	103
O'Higgins	205
Maule	767

iii. Caudales Macrozona Centro

En el Atlas del Agua (DGA, 2016), se incluyen los períodos 2013-2014. Con el fin de actualizar la información, se buscó en los registros de la DGA ([www.dga.cl](http://www.dga.cl)), detectándose que el último período con datos corresponde al año 2019, los que se incluyen en la Tabla 7.

Los caudales en esta Macrozona según los datos observados en 11 estaciones DGA son del orden de 0,076-55 m<sup>3</sup>/s durante el año 2019.

Los mayores caudales anuales observados en los años 2013-2014 se presentan en la estación Río Maule en Armerillo con un caudal de 252 m<sup>3</sup>/s. En el año 2019 los mayores caudales anuales se observan en la estación Río Maipo en El Manzano (Tabla 7).

Tabla 7: Estaciones DGA y caudales-períodos 2013-2014 y 2019. (Adaptado de DGA (2013 a 2019))

Región	Estación	Período	
		2013-2014 m <sup>3</sup> /s	2019 m <sup>3</sup> /s
Valparaíso	Río Sobrante en Piñadero	1,1	0,076
	Río Alicahue en Colliguay	1,4	0,15
	Río Aconcagua en Chacabuquito	33,1	10,82
Metropolitana	Estero Arrayán en La Montosa	1,6	0,4
	Río Mapocho en los Almendros	6,3	1,49
	Río Maipo en El Manzano	117,2	55
O'Higgins	Río Cachapoal en Pte. Termas Cauquenes	89	4,23
	Río Tinguiririca Bajo Los Briones	50,2	22,99
Maule	Río Teno después de la Junta con Claro	56,2	17,86
	Río Claro en Rauquén	83,6	41,15
	Río Maule en Armerillo	252	3,059

## b) Hidrogeología

La Macrozona Centro está integrada por dos unidades hidrogeológicas, I y III (DGA, 1986).

- A. Unidad I: constituida por depósitos no consolidados y rocas sedimentarias terciarias y cuaternarias, de alta a baja permeabilidad, con permeabilidad primaria en formaciones porosas. Presenta direcciones de flujo dominante EW, NE-SW y NW-SE. Tiene potencias de 60 m o mayores, con pozos de alto y mediano rendimiento. Se distribuye homogéneamente de N a S en la parte central del territorio en las V y VII Regiones (Figura 9).



- B. Unidad III: integrada por rocas volcánicas, volcanosedimentarias, plutónicas, hipabisales y metamórficas desde el paleozoico al cuaternario, de muy baja a nula permeabilidad. Presenta direcciones de flujo dominante EW, NE-SW. Se distribuye homogéneamente en toda la Macrozona (Figura 9).

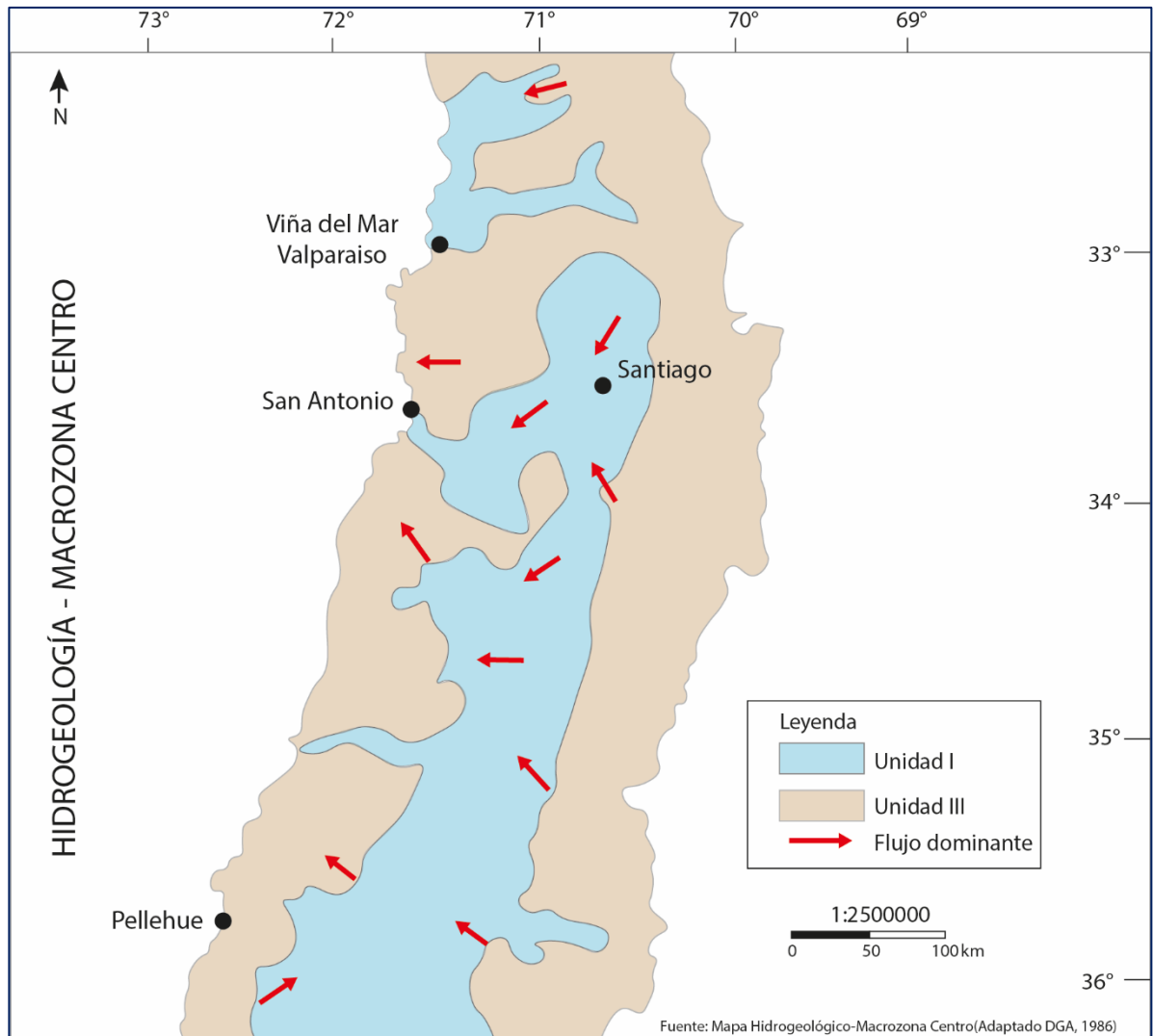


Figura 9: Mapa Hidrogeológico-Macrozona Centro (Adaptado de DGA, 1986)

#### 6.2.4 Ocurrencia de Arsénico en las Aguas

En base a todos los antecedentes recopilados se construyó la Figura 10 donde se detallan las ubicaciones y los rangos de concentraciones de As en Aguas Subterráneas y Termalés en la Macrozona Centro, indicando si éstas exceden o no el valor establecido por la norma.

De la Figura 10, se observa que las aguas subterráneas presentan valores superiores a 10 e inferiores a 100 ug/l. Los valores mayores de As en fuentes termales se encuentran en las regiones Metropolitana y V, siendo en esta última donde se registran los valores máximos (1.000-10.000  $\mu\text{g/l}$ ).

La surgencia de aguas termales se relaciona a actividad volcánica reciente o a fallas regionales, tales como la Falla Pocuro (ZFP) en la Macrozona Centro (Regiones V y Metropolitana).

En la Región de Valparaíso, en el sector de Campos Ahumada-Los Andes, se reconocen fenómenos de drenaje ácido natural, aguas con pH ácido, debido a la oxidación de sulfuros en procesos de interacción con aguas subterráneas (Treskow, 2019). La alteración supergénica de minerales como enargita, arsenopirita y rejalgar, estarían aportando As a las aguas, aunque no está presente en grandes cantidades (3,3 ug/l).

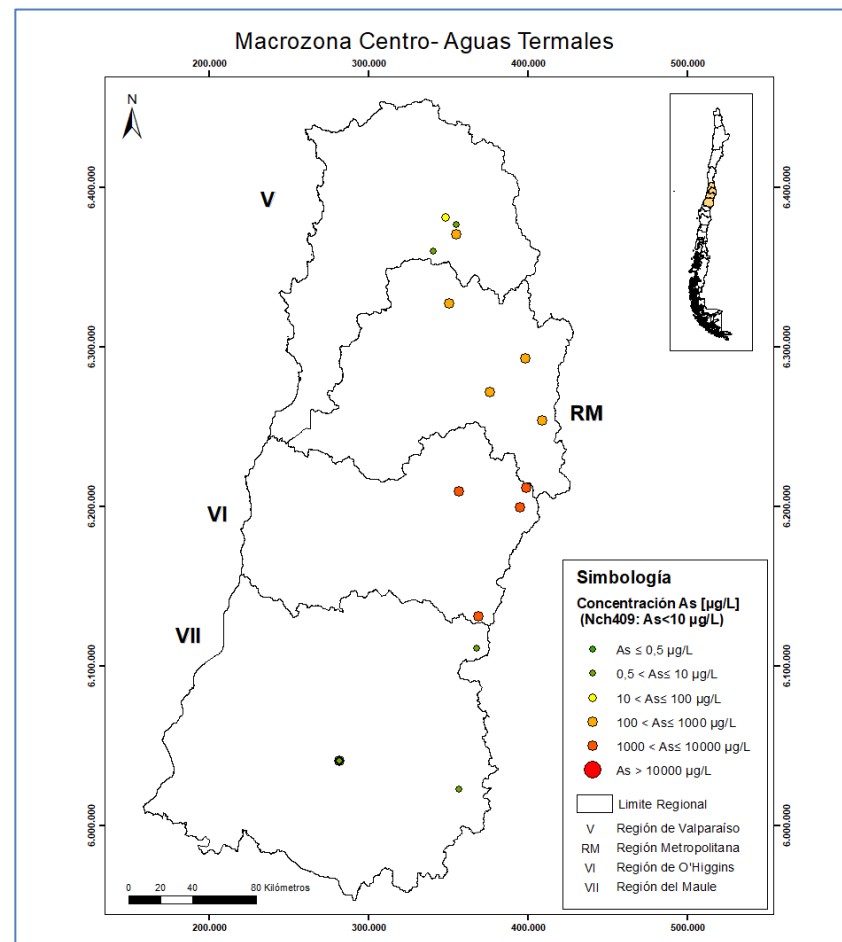
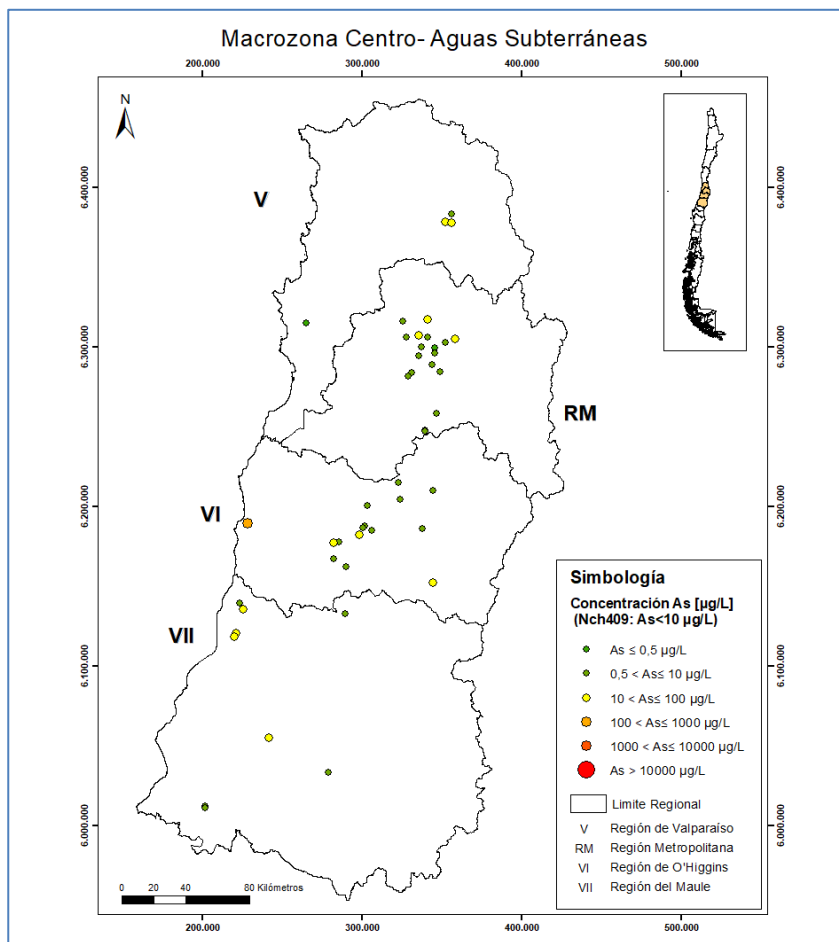


Figura 10: Distribución en Macrozona Centro de As - Aguas Subterráneas y Fuentes Termales (Según datos de Hauser, 1997; DGA, 2015; San Juan, 2015; DGA, 2016; Bonatici, 2017; Treskow, 2019; www.dga.cl)

En el piedemonte andino en Campos Ahumada existen diferentes manantiales termales que afloran en roca fracturada (Figura 11).

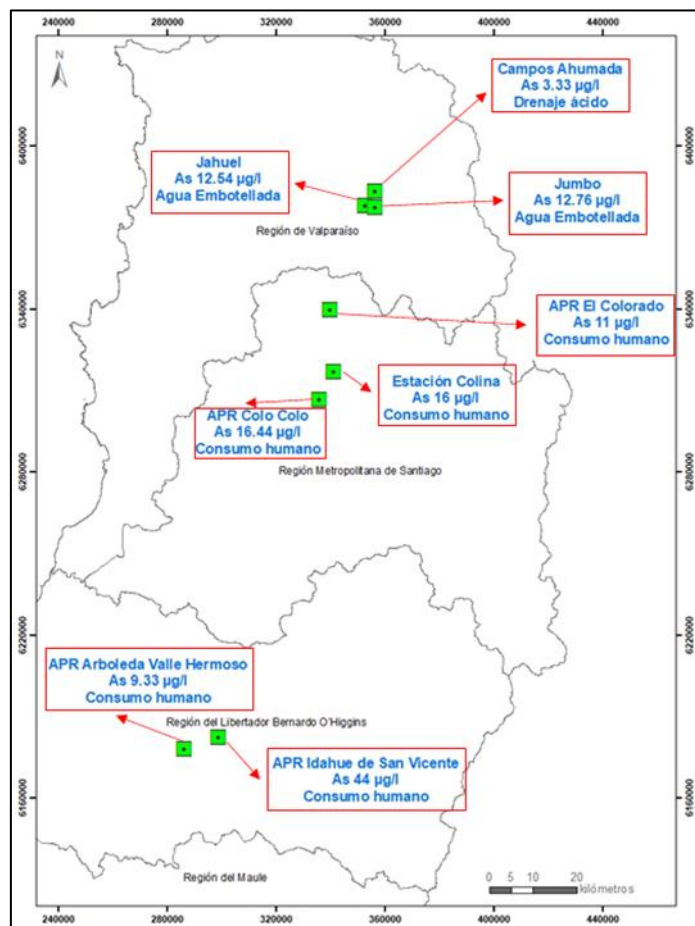


Figura 11: Sectores con As- Macrozona Centro (Según datos de Hauser, 1997; DGA, 2015; San Juan; 2015, DGA 2016; Bonatici, 2017; Treskow, 2019)

El potencial redox (Eh) varía entre 117,9 y 434,8 mV, son aguas duras, con alcalinidad baja. El As en manantiales varía entre 0,02 y 3,39 µg/l. La alteración supergénica de enargita, arsenopirita y rejalgar generan grandes cantidades de ácido y aportan As a las aguas. El agua de las precipitaciones, se infiltra a través de las fracturas, interactuando con las rocas base y las alteradas, generando drenaje ácido, aflorando después por fracturas y material no consolidado (Treskow, 2019).

En la cuenca del río Aconcagua, el agua subterránea utilizada para la producción de aguas embotelladas proviene del piedemonte andino, estando dos marcas, Jahuel y Jumbo, excedidas

en As de la norma de agua potable, 12,17  $\mu\text{g/l}$  y 12,76  $\mu\text{g/l}$ , respectivamente (Figura 11). La ocurrencia de As, en la captación donde se extraen las aguas embotelladas de Jahuel y Jumbo, puede provenir del sistema geotermal asociado a las termas de Jahuel, por disolución de minerales tipo pirita rica en As o arsenopirita en flujos ascendentes o cercanos al punto de donde se extraen las aguas. Estas aguas son sulfatadas, con pH neutro a básico y son sobrecalentadas por gases volcánicos rico en As, o pueden ser aguas superficiales que disuelven sulfuros con As, como piritas y arsenopiritas (Bonatici, 2017).

La surgencia de aguas termales se relaciona a actividad volcánica reciente o a fallas regionales, tales como la Falla Liquiñe –Ofqui en la Macrozona Sur (32°- 42°S).

En la Región Metropolitana (RM), en un estudio realizado por la DGA, en los años 2015 y 2016, se definieron tres sistemas acuíferos con concentraciones excedidas en As (11-20  $\mu\text{g/l}$ ) desde donde extraen los APR para consumo humano: Colo Colo, Estación Colina y Colorado, comunas de Curacaví, Lampa y Melipilla. (DGA, 2016). En Lampa, se detectaron valores de As, de 3 a 10 veces excedidos de la norma, asociados a la presencia de sulfuros como pirita y calcopirita (San Juan, 2015).

En la VI Región, la DGA realizó un estudio, donde se detectaron dos APR que superan la norma en As, Idahue de San Vicente, asociado a depósitos lacustres, principalmente limos y arcillas con frecuentes horizontes con alto contenido orgánico, lo que explica una condición de la presencia de As natural y La Arboleda Valle Hermoso (DGA, 2015), además el APR El Huique, con concentraciones de 20  $\mu\text{g/l}$  en el 2016. Los suelos ricos en materia orgánica, en un ambiente reductor pueden provocar la desorción de As por oxidación microbiana de aquella y la liberación de As contenido en los óxidos de Fe y Mn. Otro mecanismo por el que el As se puede liberar es por disolución reductiva de estos óxidos (Smedley y Kinniburgh, 2002; Lillo, 2008).

En esta Macrozona, el problema del As en las aguas subterráneas es menor debido a que la densidad de centros volcánicos es muy baja comparada con la Macrozona Norte. Sumado a esto, está que las precipitaciones son mayores e implican procesos de dilución (Henríquez, 1978).

### 6.3 MACROZONA SUR

La Macrozona Sur incluye las Regiones de Ñuble (XVI), del Biobío (VIII), de la Araucanía (IX), de Los Ríos (XIV) y de Los Lagos (X).

#### 6.3.1 Geología

La geología de la Macrozona Sur está constituida por las siguientes unidades (DGA, 1986):

- Rocas metamórficas (Pz): corresponden a rocas metamórficas de edad paleozoica, integradas por metareniscas, filitas, pizarras, esquistos, gneises y anfibolitas, las que se distribuyen ampliamente hacia el W (Figura 12).
- Rocas plutónicas e hipabisales (Pzg): integradas por intrusivos graníticos de edad paleozoica, las que se distribuyen en la parte norte hacia el W de la Macrozona (Figura 12).
- Rocas plutónicas e hipabisales (Jtg, Ktg): integradas por intrusivos graníticos de edad jurásica y cretácica, los que se distribuyen hacia el S y N de la Macrozona, respectivamente (Figura 12).
- Rocas mixtas sedimentario volcánicas (T): están compuestas por coladas y brechas, con intercalaciones de lutitas, areniscas y conglomerados, de edad terciaria. Se distribuyen en dos franjas discontinuas en la parte norte hacia el E y W en esta Macrozona y en una franja discontinua costera hacia el S (Figura 12).
- Rocas volcánicas (TQ): integradas por coladas y depósitos piroclásticos, dacíticos, andesíticos y basálticos, Se distribuyen prácticamente en toda la Macrozona hacia el E. El volcanismo se relaciona con el segmento sur de la SVZ (Figura 12).
- Depósitos no consolidados (Qv): corresponde al relleno cuaternario de origen volcánico, integrado por coladas y depósitos piroclásticos dacíticos, andesíticos y basálticos, las cuales se distribuyen discontinuamente hacia el E (Figura 12).
- Depósitos no consolidados (Q): corresponde a depósitos de relleno cuaternario integrado por sedimentos fluviales, glaciales, aluviales y lacustres, los cuales se distribuyen ampliamente en el sector centro de esta Macrozona (Figura 12).

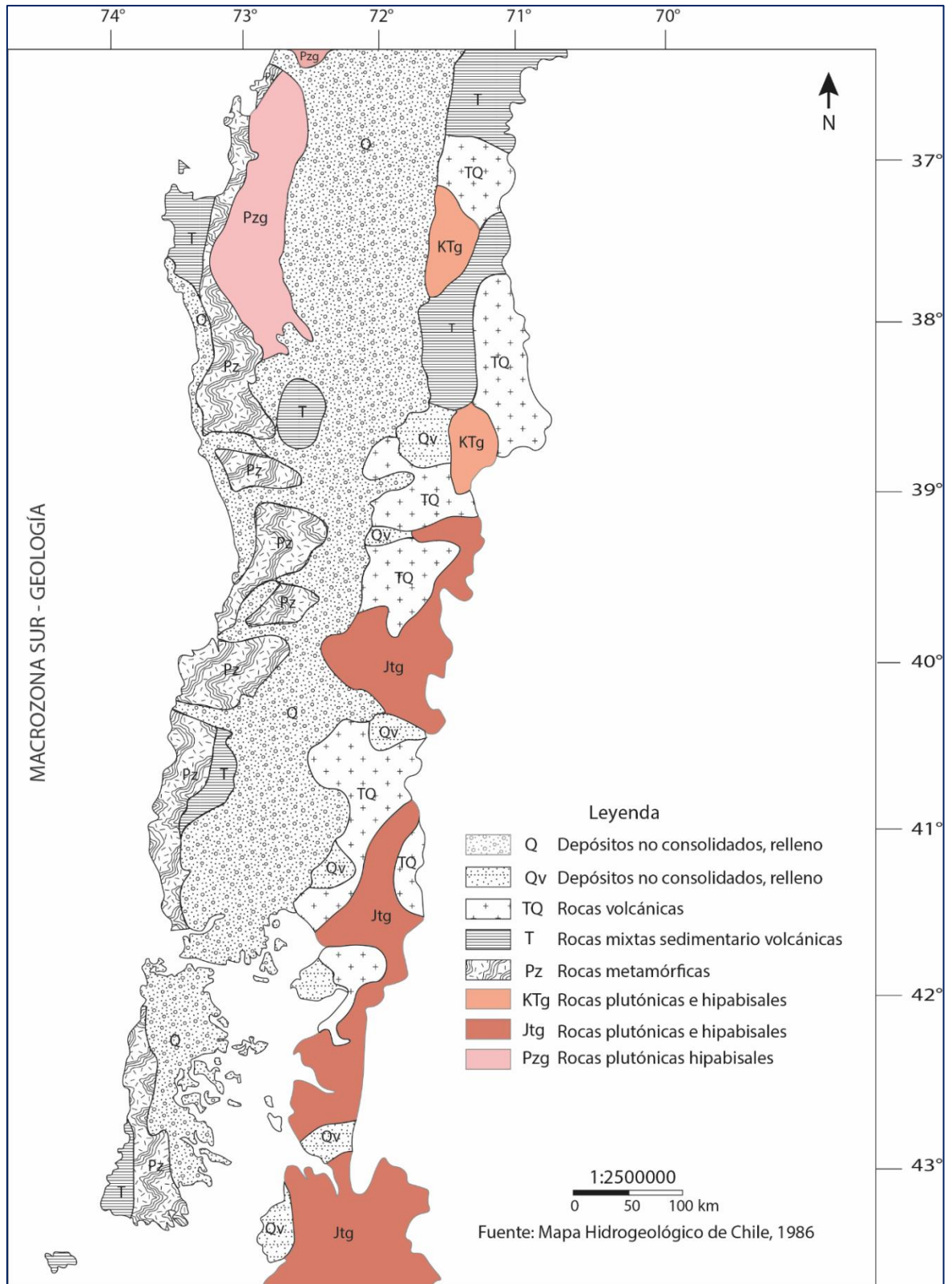


Figura 12: Mapa Geológico-Macrozona Sur. (Adaptado Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986)

### 6.3.2 Climatología

Se caracteriza por un clima templado lluvioso a marítimo lluvioso con abundantes precipitaciones que aumentan hacia el sur (DGA, 2016). En esta Macrozona se desarrolla el sector Agropecuario y la industria de Plantas de Celulosa para la exportación de madera debido a la presencia de extensas plantaciones forestales.

### 6.3.3 Hidrología e Hidrogeología

#### a) Hidrología

##### i. Precipitación Macrozona Sur

El régimen dominante de precipitaciones según el Atlas del Agua Chile (DGA, 2016) es seco a normal, donde la precipitación promedio es de 2.420 mm/año.

Tabla 8: Precipitaciones Macrozona Sur (Adaptado de DGA, 2016)

<b>Región</b>	<b>Precipitación (mm/año)</b>
Ñuble y Biobío	1.766
Araucanía	2.058
Los Ríos	2.656
Los Lagos	3.068

##### ii. Escorrentía Macrozona Sur

La escorrentía en esta Macrozona es de 7.834 m<sup>3</sup>/s. En la Tabla 9 se presentan datos de escorrentía por región presente en la Macrozona Sur.



Tabla 9: Escorrentía- Macrozona Sur (Adaptado de DGA, 2016)

<b>Región</b>	<b>Escorrentía (m<sup>3</sup>/s)</b>
Ñuble y Biobío	1.638
Araucanía	1.041
Los Ríos	1.046
Los Lagos	4.109

iii. Caudales Macrozona Sur

En el Atlas del Agua, se incluyen los períodos 2013-2014. Con el fin de actualizar esta información, se buscó en los registros de la DGA ([www.dga.cl](http://www.dga.cl)), detectándose que el último período con datos, corresponde al año 2019, los cuales se incluyen en la Tabla 10.

Tabla 10: Estaciones DGA y caudales - períodos 2013-2014 y 2019 (Adaptado de DGA, 2020)

<b>Región</b>	<b>Estación</b>	<b>Período</b>	
		<b>2013-2014 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>2019 m<sup>3</sup>/s</b>
Ñuble y Biobío	Río Ñuble en San Fabián N°2	100,3	SD
	Río Biobío en Rucalhue	412	340,853
Araucanía	Río Cautín en Cajón	134,6	90
	Río Toltén en Teodoro Schmidt	559,1	333,82
Los Ríos	Río Calle calle en Pupunahue	468,4	398,855
	Río Bueno en Bueno	354,8	250,95
Los Lagos	Río Puelo en Carrera Basilio	641	544,934
	Río Grande en San Pedro	26,4	24,925
	Río Futaleufú antes junta Río Malito	437,5	350,64

Los caudales en la Macrozona Sur según los datos observados en nueve estaciones DGA son del orden de 25-544 m<sup>3</sup>/s durante el año 2019.

Los mayores caudales anuales observados en los períodos 2013-2014 y 2019 se observan en la estación Rio Puelo en Carrera Basilio, con un caudal promedio entre períodos de 593 m<sup>3</sup>/s.

b) Hidrogeología

La Macrozona Sur está integrada por dos unidades hidrogeológicas, I y III (DGA, 1986).

- A. Unidad I: constituida por depósitos no consolidados y rocas sedimentarias terciarias y cuaternarias, de alta a baja permeabilidad, con permeabilidad primaria en formaciones porosas. Presenta direcciones de flujo dominante EW, NE-SW, NW-SE y en menor grado NS. Presenta potencias de 65 m a 120 m, con pozos de mediano a alto rendimiento. Se distribuye homogéneamente de norte a sur en la parte central de la Macrozona (Figura 13).
- B. Unidad III: integrada por rocas volcánicas, volcanosedimentarias, plutónicas, hipabisales y metamórficas desde el paleozoico al cuaternario, de muy baja a nula permeabilidad. Se distribuye homogéneamente en toda la Macrozona (Figura 13).

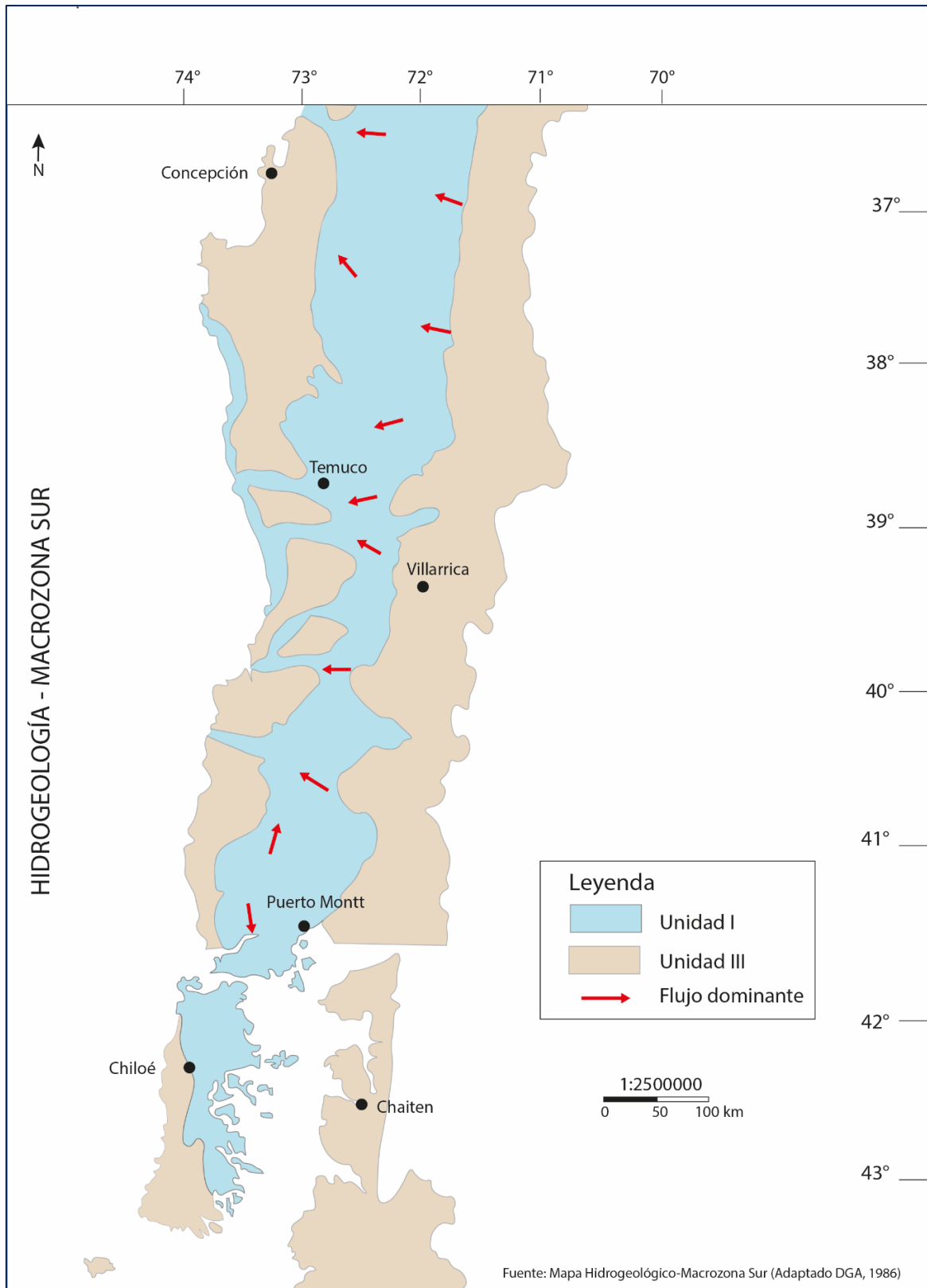


Figura 13: Mapa Hidrogeológico-Macrozona Sur (Adaptado DGA, 1986)

#### 6.3.4 Ocurrencia de Arsénico en las Aguas

En base a todos los antecedentes recopilados se construyó la Figura 14: , donde se detallan las ubicaciones y los rangos de concentraciones de As en Aguas Subterráneas y Termales en la Macrozona Sur, indicando si éstas exceden o no el valor establecido por la Norma Chilena NCH409.

Se observa que las fuentes termales se distribuyen homogéneamente en la parte oriental, excedidas en As sobre 100  $\mu\text{g/l}$ , mientras que la mayoría de las aguas subterráneas son inferiores a 100  $\mu\text{g/l}$ , localizándose en la Región de Los Ríos (Figura 14).

La surgencia de aguas termales se relaciona en esta Macrozona a actividad volcánica reciente o a fallas regionales, tales como la Falla Liquiñe –Ofqui.

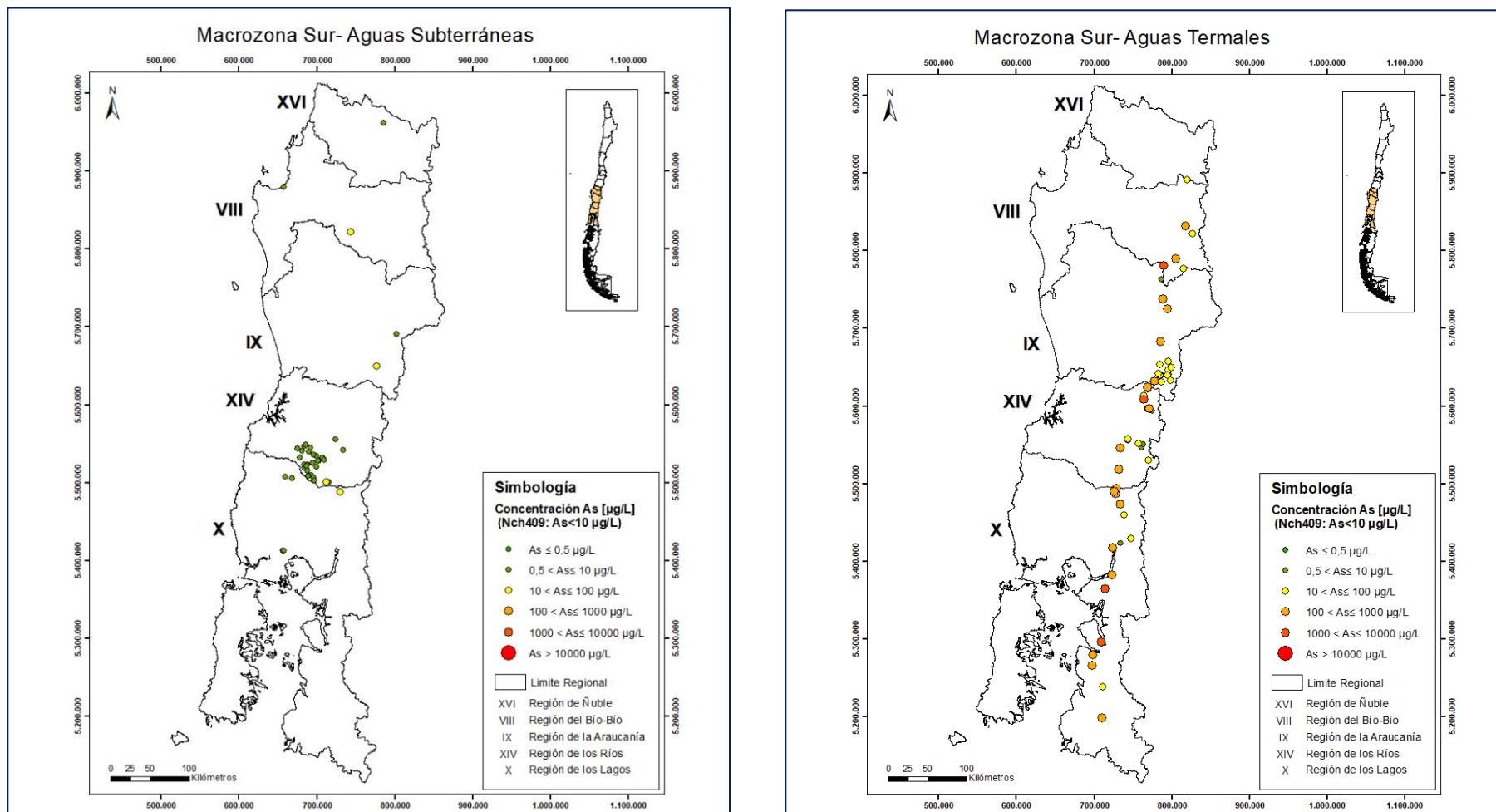


Figura 14: Distribución en Macrozona Sur de As -Aguas Subterráneas y Fuentes Termales (Según datos de Hauser, 1997; Lorca, 2005; Bonatici, 2017; Espinoza, 2017; DGA, 2020; www.dga.cl)

En la Región de la Araucanía, las concentraciones de As, son variables, desde 1  $\mu\text{g/l}$  en la termas Hipólito Muñoz a 1.299 ( $\mu\text{g/l}$ ) en Coñaripe, reconocidas estas últimas cercanas al volcán Villarrica. (Figura 15). En las rocas volcánicas y volcanosedimentarias, el As puede provenir de minerales portadores como arsenopirita o pirita arsenical, mediante procesos de interacción agua-roca, pero más cerca del volcán, donde la relación As/Cl es más alta la proveniencia podría ser desde gases volcánicos (Espinoza, 2017).

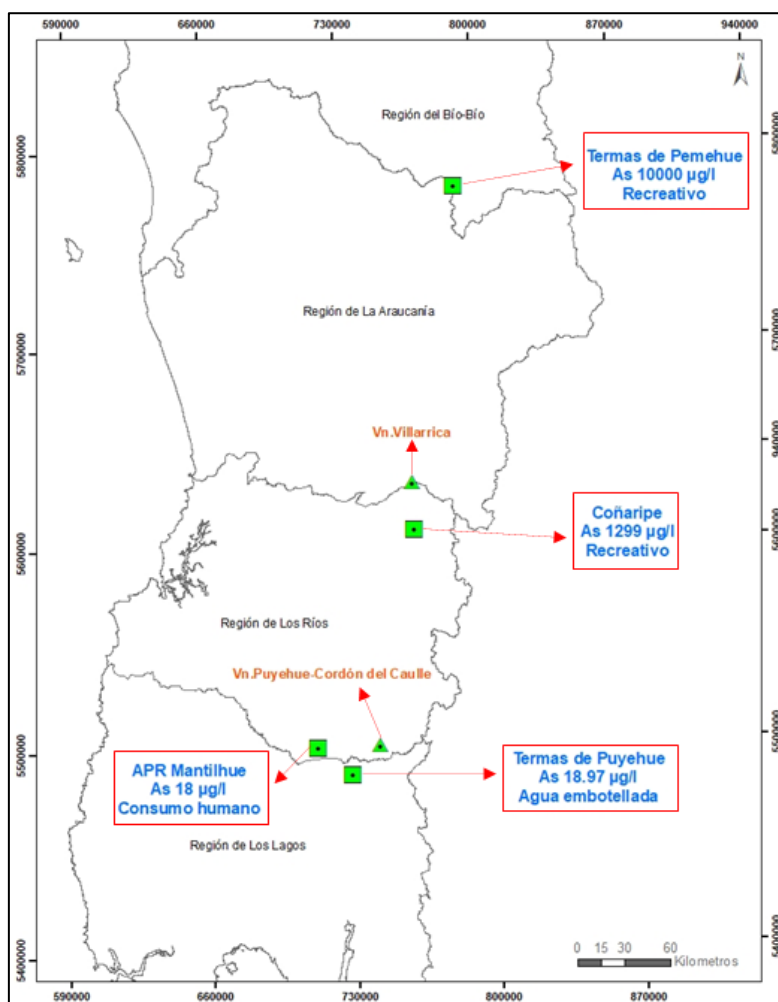


Figura 15: Sectores con As- Macrozona Sur (Según datos de Hauser, 1997; Bonatici, 2017; Espinoza, 2017; DGA, 2020)

En la Región de Los Ríos, en un estudio realizado por la DGA (DGA, 2020) en 28 localidades en la cuenca del río Bueno, se detectó en el sistema APR de la localidad de Mantilhue un valor de 18  $\mu\text{g/l}$  de As, el cual es superior al límite permitido de 10  $\mu\text{g/l}$  por la norma NCH 409 (Figura 15). El As se asocia a la gran cantidad de material piroclástico del cordón del Caulle.

El As de las aguas embotelladas Puyehue puede provenir del sistema geotermal Puyehue - Aguas Calientes, en rocas volcánicas fracturadas, levemente falladas a profundidades de 143 m. Estas aguas corresponden a aguas cloruradas/sulfatadas sódicas mezcladas con aguas meteóricas de aguas cloruradas con gases volcánicos oxidados (Bonatici, 2017).

La mayoría de las fuentes geotermales guarda una estrecha relación espacial con las zonas de falla Liquiñe-Ofqui y Vanteles-Melimoyu. Éstas constituyen vías de infiltración para las aguas meteóricas; el posterior calentamiento de éstas en profundidad, debido al elevado gradiente geotérmico local, favoreció su ascenso convectivo, portando elementos extraídos por lixiviación de los minerales, presentes en los granitoides del Batolito Norpatagónico (Hauser, 1989).

Las aguas de los sistemas geotermales tendrían mayoritariamente un origen meteórico, siendo los orígenes de tipo pluvial en las zonas bajas de la Cordillera de la Costa y Valle Central y de régimen mixto en las Cordillera de Los Andes y Altiplano (Hauser, 1997).

El As en las aguas embotelladas, se encuentra en estado de oxidación (+5) como arsenato (Bonatici, 2017).

#### 6.4 DISTRIBUCION DE ARSENICO EN CHILE

A nivel nacional , se observa que la presencia mayor de As en las aguas subterráneas es en la Macrozona Norte, con valores de 1.000 a 10.000  $\mu\text{g/l}$ , tendiendo a decrecer hacia el sur, posiblemente por el incremento de las precipitaciones y dilución y la ausencia de evaporitas ricas en As, salmueras y aguas salinas (Tapia et al., 2019).

Las fuentes termales presentan las mayores concentraciones de As ( $> 10.000 \mu\text{g/l}$ ), distribuidas en la Macrozona Norte hasta aproximadamente la altura de La Serena, disminuyendo los valores de As a rangos superiores a  $10 \mu\text{g/l}$  e inferiores a  $10.000 \mu\text{g/l}$  (Figura 16).

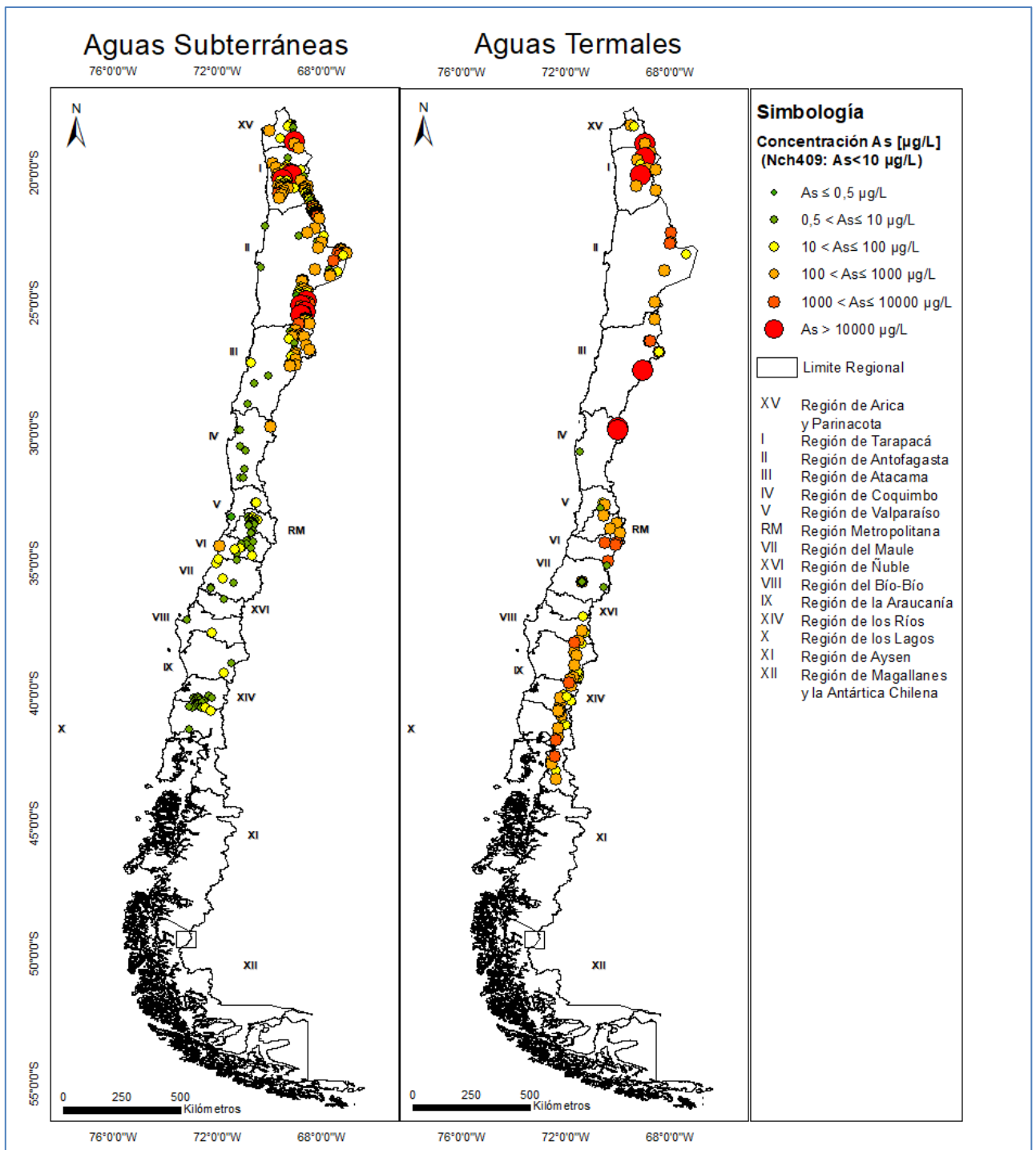


Figura 16: Distribución de As en Chile (Según datos de Henríquez, 1978; Hauser, 1997; Risacher et al., 1999; Romero et al., 2003; Oyarzún et al., 2004; Fernández – Turiel et al., 2005; Lorca, 2005; Lillo, 2008; DGA, 2015; San Juan, 2015; Bonatici, 2017; DGA, 2017; Espinoza, 2017; Lagos, 2017; Tapia et al., 2018; Vega et al., 2018; Treskow, 2019; Bundschuh, 2020; DGA, 2020; Nordstrom, 2020; www.dga.cl)



En la Macrozona Norte las aguas termales presentan las mayores concentraciones de As con concentraciones mínimas de 1  $\mu\text{g/l}$  y máximas de 1.500  $\mu\text{g/l}$ , con valores extremos que van desde los 3.000  $\mu\text{g/l}$  hasta los 200.000  $\mu\text{g/l}$ , (Baños de Polioquere- XV Región), dato que no fue considerado en el diagrama de caja (Figura 17), por tratarse de un demasiado valor muy extremo (atípico). La Macrozona Centro presenta concentraciones de As que varían entre 2  $\mu\text{g/l}$  y 570  $\mu\text{g/l}$  con valores aislados que van desde los 600 hasta los 4.500  $\mu\text{g/l}$  en los Baños Las Calerías, VI Región (Figura 17).

La Macrozona Sur presenta concentraciones de As que varían entre 1  $\mu\text{g/l}$  y 400  $\mu\text{g/l}$  con valores aislados que fluctúan entre 500 a 10.000  $\mu\text{g/l}$  en las termas de Pemehue- X Región (Figura 17).

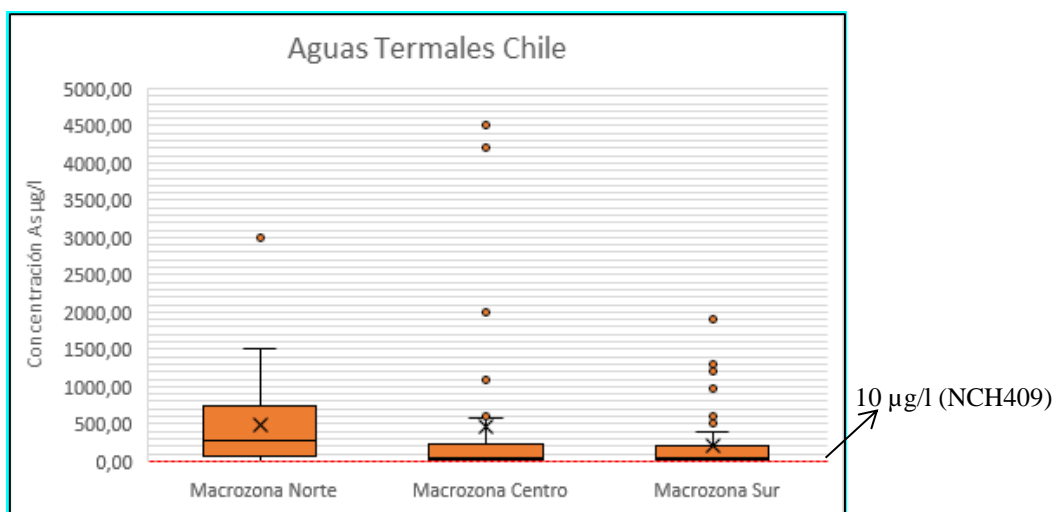


Figura 17: Diagramas de cajas – Aguas Termales en Chile (Según datos de Hauser, 1997; Risacher et al, 1999; Lorca, 2005; Espinoza, 2017; Bonatici, 2017; Tapia et al., 2019; DGA, 2020; www.dga.cl)

La Macrozona Centro presenta concentraciones de As que fluctúan entre 0,13  $\mu\text{g/l}$  y 29  $\mu\text{g/l}$  con valores aislados como 32  $\mu\text{g/l}$  y 105,92  $\mu\text{g/l}$ , este último corresponde a San Antonio de Petrel – Pichilemu-VI Región. La Macrozona Sur presenta concentraciones de As que varían entre 0,05  $\mu\text{g/l}$  y 6  $\mu\text{g/l}$ , con valores aislados (10 - 49  $\mu\text{g/l}$ ), este último valor corresponde al manantial Yelcho- X Región (Figura 18).

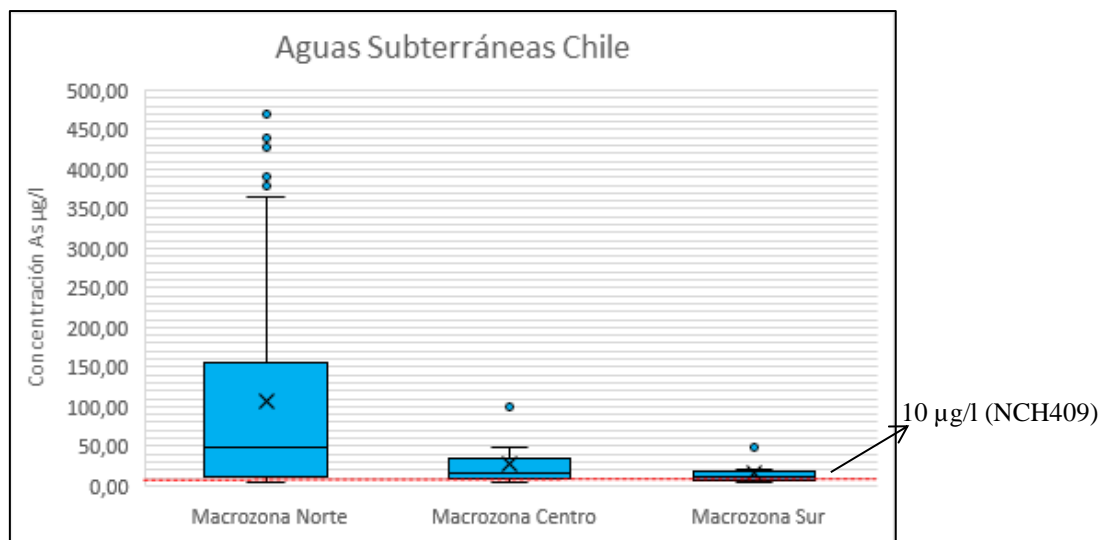


Figura 18: Diagramas de cajas – Aguas Subterráneas Chile (Según datos de Henríquez, 1978; Risacher et al., 1999; Romero et al., 2003; Oyarzún et al., 2004; Fernández – Turiel et al., 2005; Lillo, 2008; DGA, 2015; San Juan, 2015; DGA, 2016; Bonatici, 2017; DGA, 2017; Espinoza, 2017; Lagos, 2017; Tapia et al., 2018; Vega et al., 2018; Treskow, 2019; Bundschuh, 2020; DGA, 2020; Nordstrom, 2020; www.dga.cl)

## 7 CONCLUSIONES

- En Chile, el origen del As en las aguas está relacionado con procesos volcánicos e hidrotermales, en donde existen altas temperaturas, alta salinidad y altas concentraciones de As, superiores a  $10.000 \mu\text{g/l}$ , de B, las que pueden alcanzar valores de  $150.000 \mu\text{g/l}$  y de F, las que pueden ser del orden de miles de  $\mu\text{g/l}$ . Es por esto que las aguas superficiales y subterráneas cuyas cuencas hidrográficas se desarrollan en materiales volcánicos cuaternarios pueden estar contaminados con As. El volcanismo activo determina un alto gradiente geotérmico que incrementa, cuantitativa y cualitativamente, la lixiviación de grandes volúmenes de roca por el hidrotermalismo, cuyos solutos son transportados por las aguas y acumulados en éstas y en los medios sedimentarios relacionados con ellas.
- La circulación de aguas termales arsenicales se asocia a distintas formaciones rocosas independientemente de su edad, sometidas a una tectónica severa con desarrollo de zonas de fractura (por ejemplo, la ZFP) que facilitan la circulación de aguas. Así, los fluidos

geotermiales (agua/gases) presentan altas concentraciones de As, como en el campo geotermal de El Tatio (>30.000-50.000 µg/l).

- Las altas concentraciones de As en las aguas subterráneas (y superficiales) de Chile también se pueden asociar a la alteración supergénica de depósitos minerales (por ejemplo, pórfidos cupríferos), debido a la presencia de sulfuros metálicos que incluyen As en su composición, como enargita, pirita, etc. En estos entornos, los procesos de lixiviación y meteorización química de minerales arsenicales son acelerados por faenas mineras.
- Chile presenta diversas concentraciones de As geogénico que van desde inferiores a 0,5 µg/l medidos en análisis químicos en pozos y aguas embotelladas hasta valores muy superiores a 10.000 µg/l en salares.
- En la Macrozona Norte, las aguas subterráneas presentan las mayores concentraciones de As geogénico (1.000 µg/l hasta >10.000 µg/l) distribuidas en las Regiones XV, I, II y en el extremo NE de la III Región del territorio chileno, éstas se asocian principalmente a concentraciones medidas en salares presentes como el Salar de Surire, Pintados, Aguas Calientes, Atacama, Maricunga, entre otros. Se detectaron concentraciones de As excedidas de la Norma NCH 409 (10 µg/l) en pozos cercanos a los ríos Camarones y Elqui, en especial en este último, en pozos cercanos a la planta de abastecimiento de agua potable de la ciudad de La Serena, capital regional de la IV Región. En las Macrozona Centro y Sur se observan rangos de concentraciones inferiores a 0,5 µg/L hasta 1.000 µg/L. En el sector de Campo Ahumada, Macrozona Centro V Región, existe contaminación en aguas subterráneas por fenómenos de drenaje ácido natural, debido a la abundancia de minerales sulfurados y zonas de alteración hidrotermal.
- Las mayores concentraciones de As geogénico en las aguas termales, se distribuyen en la Macrozona Norte en las regiones XV, I, III, y IV, con valores superiores a 10.000 µg/L, que superan mil veces el límite de concentración de As para el consumo humano e incluso estos valores podrían ser nocivos para usos recreacionales. En las Macrozonas Centro y Sur las concentraciones son variadas en un rango < 0,5 a 10.000 µg/l.
- En la Macrozona Norte el As geogénico se encuentra principalmente en las aguas de Salares, los cuales se asocian a la actividad volcánica y procesos hidrotermales. En general, al igual que en el resto de las macrozonas, el As es asociado a actividad volcánica

reciente muy activa, geotérmica (fuentes termales) y a depósitos minerales.

- En todas las macrozonas estudiadas en Chile se han detectado concentraciones levemente excedidas de la norma de agua potable en diferentes APR, donde utilizan aguas subterráneas para el consumo humano en sistemas rurales, lo cual supone un grave riesgo para la salud humana.
- Por otro lado, el Decreto Supremo DS 106 permite el uso de aguas embotelladas que, legalmente, aplicando la norma NCH409 no pueden ser usadas para agua potable. Las aguas embotelladas Jahuel, Jumbo y Puyehue, de origen geogénico, tienen una amplia distribución nacional y estas exceden normas internacionales y la de agua potable para consumo humano.

## **8 RECOMENDACIONES**

- La escasa información de datos de As es una limitante y muchos de éstos, no se encuentran disponibles para ser consultados, en especial los análisis químicos de empresas sanitarias que proveen agua para consumo humano y por otro lado, la información no se encuentra procesada y no es continua en el tiempo, lo cual dificulta su análisis, por lo que se recomienda hacer proyectos de investigaciones tanto a nivel nacional como local, para conocer los procesos y fuentes de As, para así determinar adecuadamente procesos de mitigación o remediación.
- El fenómeno de drenaje ácido es de carácter local, pero dada la geología de Chile, donde hay gran abundancia de minerales sulfurados y con zonas de alteración hidrotermal, es muy probable que se generen o se estén generando procesos de drenaje ácido natural que contaminen las aguas con As, por lo que es importante estudiar la ocurrencia de este tipo de procesos.
- Dado lo nocivo que es el consumo de As en pequeñas cantidades y tiempos prolongados, y dado que el consumo de aguas embotelladas en Chile es cada vez más masivo, considerando un incremento de 18 a 38 litros per cápita en el período 2008-2018, es que, se recomienda redefinir el límite establecido de 50 µg/l a los valores definidos por estándares internacionales.

- Es importante comenzar a regular el uso de las aguas con fines de consumo humano y/o recreacionales, ya que actualmente en Chile, éstas son excluidas de todos los decretos que controlan el límite de As.
- Se requiere la implementación de una norma de calidad ambiental de As ya que Chile es uno de los mayores productores de desechos de As del mundo, debido al aumento en la producción de cobre.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- ATSDR (2009-2011). La Toxicidad del Arsénico. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/cambios\\_patogenicos.html#:~:text=El%20ars%C3%A9nico%20es%20una%20peque%C3%B1a,directamente%20con%20la%20respiraci%C3%B3n%20celular](https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/cambios_patogenicos.html#:~:text=El%20ars%C3%A9nico%20es%20una%20peque%C3%B1a,directamente%20con%20la%20respiraci%C3%B3n%20celular). Accedido en Marzo 2021.
- Bonaticci, G. (2017). El Agua que Bebemos, Memoria para Optar al Título de Geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Bundschuh, J (2020). Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research. 2010-2020. Critical Reviews in Environmental Science and Technology.
- Celis, R. (2015). Caracterización Geoquímica del Sistema Geotermal Termas de Puyehue – Aguas Calientes, Región de Los Lagos, Chile. Memoria para Optar al Título de Geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Chong, G. (2000). Los yacimientos de boratos de Chile. Rev. Geológica Chile v27 n.1 Santiago.
- Damania, R., Desbureaux, S., Rodella, A., Russ, J., Zaveri, E. (2019). Calidad Desconocida: La Crisis Invisible del Agua. Resumen. Grupo Banco Mundial. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/32245/211459ovSP.pdf?sequence=11&isAllowed=y>. Accedido en Julio 2020.
- Daniele, L., Cannatelli, C., Buscher, J., Bonateci, G. (2019). Chemical composition of Chilean bottled waters: Anomalous values and possible effects on human health. Science of Total Environment. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv).
- DGA (1986). Mapa Hidrogeológico de Chile Escala 1:1.000.000.

- DGA (2015). Diagnóstico de Calidad de Aguas Subterráneas de la Región del Lib. Bernardo O'Higgins. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. DGA Santiago.
- DGA (2016). Atlas del Agua: Chile 2016. Ministerio de Obras Públicas.
- DGA (2016). Diagnóstico de Calidad de Aguas Subterráneas en la Región Metropolitana- Complementario Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos Región Metropolitana de Santiago, elaborado por SGA S.A. DGA Santiago.
- DGA (2017). Diagnóstico de Calidad de Aguas Subterráneas de la Región de Coquimbo. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. DGA Santiago.
- DGA (2020). Diagnóstico de Calidad de Aguas Subterráneas de la Región de Los Ríos. Departamento de Conservación y Protección del Recursos Hídricos. DGA Santiago.
- EAWAG (2017). Geogenic Contamination Handbook, <https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Forschung/Menschen/Trinkwasser/Wrq/Handbook/geogenic-contamination-handbook-chapter2.pdf>. Accedido en Abril 2021.
- European Environment Agency (2018). European Waters Assessment of Status and Pressures 2018. web: <https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water>.
- Espinoza, A. (2017). Estadística Multivariante y Geotermometría Multicomponente de las Manifestaciones Termales del Área Pucón-Liquiñe, IX Región de La Araucanía y XIV Región de Los Ríos, Chile. Memoria para Optar al Título de Geóloga. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Fernández- Turiel, J.L., Galindo G., Parada, M.A., Gimeno, D., García-Valles, M., Saavedra, J. (2005). Estado Actual del Conocimiento sobre el As en el Agua de Argentina y Chile: Origen, Movilidad y Tratamiento.
- Ferreccio, C y Sancha, A.M. (2006). Arsenic Exposure and Its Impact on Health in Chile. Journal of Health Population and Nutrition.
- Guevara, S., Oyarzún, J., Maturana, C. (2006). Geoquímica de las Aguas del Río Elqui y de sus Tributarios en el Período 1975-1995: Factores Naturales y Efecto de las Explotaciones Mineras en sus Contenidos de Fe, Cu y As.
- Hauser, A. (1997). Catastro y Caracterización de las Fuentes de Aguas Minerales y Termales de Chile, Boletín N° 50, Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.

- Hauser, A. (1989). Fuentes termales y minerales entorno a la Carretera Austral, Regiones X y XI, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 16, 229-239. <http://dx.doi.org/10.5027/amdgeoB16n2-a06>.
- Hauser, A. (1999). Baños de Apoquindo: Caracterización, hidroquímica, modelo hidrotermal y alternativas de aprovechamiento, *Revista de Geografía Norte Grande*, 26, 23-36.
- Henríquez, H. (1978). Misión Relativa al Programa de Cooperación Subregional sobre Arsénico y otros Contaminantes en el Agua en Relación con el Volcanismo Cuaternario (Argentina, Bolivia, Chile y Perú). Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y El Caribe. Montevideo. Uruguay.
- Herath, I., Vithanage, M., Bundschuh, J., Maity J. P., Bhattacharya, P. (2016). Natural Arsenic in Global Groundwaters: Distribution and Geochemical Triggers for Mobilization.
- Lagos, B. (2017). Caracterización Geoquímica de las Aguas Geotermales de El Tatio: Implicancias en el Origen del Litio, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento Ciencias de La Tierra, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Concepción.
- Lillo, J. (2008). Peligros Geoquímicos: Arsénico de Origen Natural en las Aguas. [https://www.researchgate.net/publication/266597632\\_Peligros\\_geoquimicos\\_Arsenico\\_de\\_origen\\_natural\\_en\\_las\\_aguas](https://www.researchgate.net/publication/266597632_Peligros_geoquimicos_Arsenico_de_origen_natural_en_las_aguas). Accedido en Junio 2020.
- Lorca, X.(2005). Análisis de (As, Ca, F, Fe, Mn y Mg) en aguas minerales y termales de la Novena y Décima Región de Chile. Tesis de Grado presentada como parte de los requisitos para optar al Título de Químico Farmacéutico. Universidad Austral de Chile. Valdivia.
- MINSAL (1997). Decreto 106. Reglamento de Aguas Minerales. Ministerio de Salud, República de Chile.
- Nordstrom, K. (2020). ARSENIC HYDROGEOCHEMISTRY OVERVIEW: tectonics, lithology, hydrology, microbiology and chemistry, IGCP presentation UNESCO Project (707).
- OMS (2005). “Guías para la calidad del agua potable” Primer apéndice a la Tercera Edición.
- OMS (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Cuarta edición que incorpora la primera adenda.

- Oyarzún, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R., Oyarzún, J. (1998). Cu, Mn and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa quadrangle, Chile: The Talcuna and Arqueros districts. *Miner. Deposita*, 33, 547-559. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>.  
Accedido en Septiembre 2020.
- Oyarzún, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J., Maturana, H. (2004). Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio – Tambo district) vs. geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 84, 53-64.
- Oyarzún, R., Guevara, S., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H., Higuera, P., 2006. The As-contaminated Elqui river basin: A long lasting perspective (1975-1995) covering the initiation and development of Au-Cu-As mining in the high Andes of northern Chile. *Environ. Geochem Health*, 28, 431-443.
- Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C. (1999). *Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones-Chile, Volumen I Síntesis, Volumen II Estudio de Cuencas de la I Región, Volumen III Estudio de Cuencas de la II Región, Volumen IV Estudio de Cuencas de la III Región*. Convenio de Cooperación DGA-UCN-IRD.
- Romero, L., Alonso, H., Campano, P., Fanfani, L., Cidu, R., Dadea, C., Keegan, T., Thornton, I., Farago, M. (2003). Arsenic enrichment in waters and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile) *Applied Geochemistry*, 18,1399-1416.
- Sarricolea et al. (2017) *Clasificación climática según Köppen-Geiger*. Departamento de Geografía, Universidad de Chile.
- Sancha, A.M., (1998). *Estudio de Caso: Contaminación por Arsénico en el Norte de Chile y su Impacto en el Ecosistema y la Salud Humana*. Santiago, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Sancha, A.M., Castro, M. L. (2001). Arsenic in Latin America: Occurrence, Exposure, Health Effects and Remediation. In: Chappell, W.R., Abernathy, C.O., Calderon, R.L. *Arsenic Exposure and Health Effects IV*, Elsevier B.V., Amsterdam, 88-96.
- San Juan, R. (2015). *Caracterización Hidrogeoquímica de Recursos Hídricos de la Cuenca de Santiago*. Memoria para Optar al Título de Geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- SERNAGEOMIN (2002). *Mapa Geológico de Chile, escala 1: 1.000.000*.



- Smedley P., Kinniburgh D., (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517-568.
- Tchernitchin A., et al (2019). Desarrollo de los eventos de contaminación ambiental en Antofagasta desde 1950 hasta 2018. Efectos en salud.
- Tapia, J. (2014). Distribución de arsénico en las cuencas hidrológicas de la zona norte de la Región de Atacama. Seminario avances y desafíos en la problemática del arsénico en aguas de Chile y el mundo. Santiago, Chile.
- Tapia, J., Davenport, J., Townley, B., Dorador, C., Schneider, B., Tolorza, V., von Tümpling, W. (2018a). Sources, enrichment, and redistribution of As, Cd, Cu, Li, Mo, and Sb in the Northern Atacama Región, Chile: Implications for arid watersheds affected by mining. *Journal of Geochemical Exploration*.
- Tapia, J., González, R., Townley, B., Oliveros, V., Álvarez, F., Aguilar, G., Menzies, A., Calderón, M. (2018b). Geology and geochemistry of the Atacama Desert, Antonie van Leeuwenhoek, <https://doi.org/10.1007/s10482-018-1024-x>. Accedido en Agosto 2020.
- Tapia, J., Rodríguez, P., Castillo, P., González, R., Rodríguez, C., Valdés, A., Townley, B., Fuentes, G. (2019). Arsenic and Copper in Chile and the Development of Environmental Standards, 241- 285.
- Treskow, V. (2019). Drenaje Acido Natural: El Caso de Campos de Ahumada, Chile Central. Memoria para Optar al Título de Geóloga. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Vega, A., Lizama, K., Pasten, P. (2018). Water Quality: Trends and Challenges- Chapter 3.
- Wilson, L. (2011). Determination of Trace Element Provenance, Rio Loa Basin, Northern Chile. Thesis for degree of Master of Science in Chemistry, School of Western Caroline University.
- [www.dga.cl](http://www.dga.cl). Red Hidrométrica MOP. <http://snia.dga/BNAConsultas/reports>. Accedido entre septiembre 2020 a enero 2021.