

Distribución de arsénico en las cuencas hidrológicas de la zona norte de la Región de Atacama

J. Tapia¹

¹Departamento de Ingeniería en Minas
Universidad de Antofagasta

Avances y desafíos en la problemática del arsénico en aguas de
Chile y el mundo, 2014

Índice

- 1 El arsénico (As) en la Tierra
 - Concentraciones globales de As
 - La contaminación por As en Chile
 - El contexto del As en Chile
- 2 As en la zona norte de la Región de Atacama
 - Muestreo
 - Trabajo en curso
 - Trabajo futuro

Índice

- 1 El arsénico (As) en la Tierra
 - Concentraciones globales de As
 - La contaminación por As en Chile
 - El contexto del As en Chile
- 2 As en la zona norte de la Región de Atacama
 - Muestreo
 - Trabajo en curso
 - Trabajo futuro

El As en la Tierra

Concentraciones globales de As

<i>Lugar</i>	<i>Material</i>	<i>As</i>	<i>Referencia</i>
<i>Corteza continental superior</i>	<i>roca</i>	$4.8 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	[1]
<i>Manto superior</i>	<i>manto</i>	$21\text{--}32 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	[2]
<i>Aguas superficiales</i>	<i>agua</i>	$0.62 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	[3]
<i>Aguas termales</i>	<i>agua</i>	<i>más de</i> $10.000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	[4,5,6]

Anomalías de As a nivel global

<i>Motivo</i>	<i>Ejemplos</i>	<i>Referencia</i>
<i>Presencia natural (rocas)</i>	<i>Bangladesh e India</i>	[7]
	<i>La Pampa, Argentina</i>	[8]
	<i>La cuenca de Panonian, Rumania & Hungría</i>	[9]
	<i>Altiplano de Oruro, Bolivia</i>	[10]
	<i>Antofagasta, Chile</i>	[11]
<i>Fuentes termales</i>	<i>El Tatío, Chile</i>	[12]
	<i>Ischia & Phlegrean, Italia</i>	[13]
<i>Depósitos minerales</i>	<i>Distrito Ron Phibun, Tailandia</i>	[14]
	<i>Minería de Au, Ghana</i>	[15]

El As es un elemento único

La movilidad y especiación del As

- A nivel mundial, el As se encuentra en ambientes [4]:
 - reductores
 - oxidantes
 - mixtos
- Es móvil en [4]:
 - pH de agua dulce (pH 6.5-8.5)
 - condiciones oxidantes y reductoras => diferentes estados de oxidación (-3, 0, +3, +5)



Imagen 1. Laguna verde, terreno Atacama Marzo 2014 (por Andrés Villagrán)

El As es un elemento único

La movilidad y especiación del As

- Comúnmente es encontrado como:
 - As trivalente o arsenito $[\text{As(III)}]$
 - As pentavalente o arseniato $[\text{As(V)}]$
- Las formas orgánicas no son muy comunes, salvo en áreas afectadas por polución industrial [4]
 - Dimetil arsénico DMAA $[(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})]$
 - Monometil arsénico MMAA $[\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2]$
- La actividad microbiológica es capaz de movilizar y especiar este metaloide [16, 17].

Índice

- 1 El arsénico (As) en la Tierra
 - Concentraciones globales de As
 - La contaminación por As en Chile
 - El contexto del As en Chile
- 2 As en la zona norte de la Región de Atacama
 - Muestreo
 - Trabajo en curso
 - Trabajo futuro

Contaminación de As en el norte de Chile

Algunas características del As en el norte de Chile

- *La contaminación por As tiene una larga data en el norte de Chile [11, 18, 19, 20, 21].*
 - *Se encontraba presente en momias de la cultura Chinchorro, de 7.000 años de antigüedad [22].*
 - *Actualmente las tasas de cáncer de vejiga y pulmón son 4 a 5 veces mayores en ciudadanos de Antofagasta, que consumieron crónicamente As entre 1958 y 1970 [11, 23].*

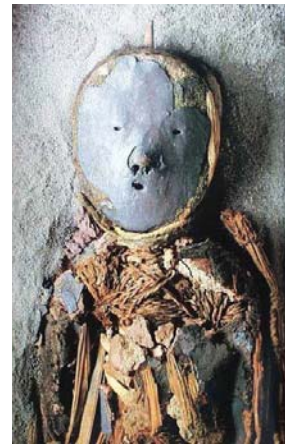


Imagen 2. Momias cultura Chinchorro. Fuente www.haciendoriquezas.com

Contaminación de As en el norte de Chile

Algunas características del As en el norte de Chile

- Estudios en el norte de Chile [12] han demostrado que la contaminación por As tiene componente:

- natural [12, 24]:
 - aguas termales
 - rocas volcánicas
- antropogénico (explotación de depósitos minerales) [12, 24, 25]:
 - enargita (Cu_3AsS_4)
 - tenantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$)
 - pirita-arsenopirita (FeS_2 - FeAsS)



Imagen 3. Aguas termales de Río Negro, terreno Atacama
Marzo 2014 (por Andrés Villagrán).

Índice

- 1 El arsénico (As) en la Tierra
 - Concentraciones globales de As
 - La contaminación por As en Chile
 - El contexto del As en Chile
- 2 As en la zona norte de la Región de Atacama
 - Muestreo
 - Trabajo en curso
 - Trabajo futuro

Las zonas volcánicas de la Cordillera de los Andes (datos de [26, 27, 28])

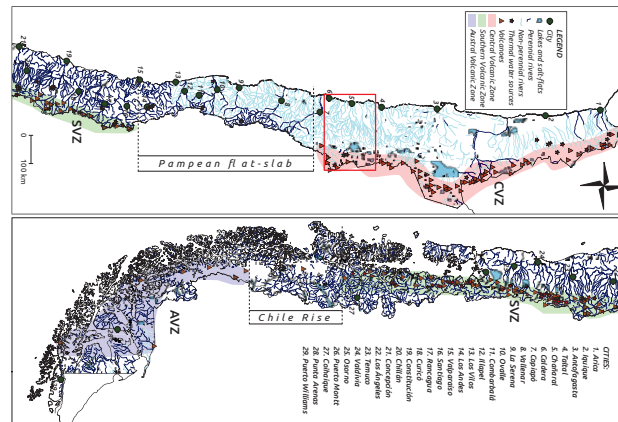


Imagen 4. Volcanes & aguas termales de Chile. Además se muestran la Zona Volcánica Central, Zona Volcánica Sur, Zona Volcánica Austral, Flat-slab Pampeano, Dorsal de Chile y Zona de Estudio (por Joseline Tapia).

Concentración de As en fuentes termales de Chile (a) N del flat-slab, (b) S del flat-slab (datos compilados de: [29, 30, 31])

		elevación	T	pH	As
		[m s.n.m.]	[°C]		[mg/L]
(a)	Promedio	3653	53	7.37	9.30
	Mediana	3935	45	7.58	0.46
	Mínimo	1470	25	5.40	0.02
	Máximo	4350	85	8.69	200.00
		elevación	T	pH	As
		[m s.n.m.]	[°C]		[mg/L]
(b)	Promedio	799	49	7.53	0.74
	Mediana	610	40	7.53	0.05
	Mínimo	10	17	2.10	0.00
	Máximo	3350	90	9.80	16.00

Contexto climatológico del As en Chile

Ambientes climáticos de Chile y As

- Climas de Chile [32]

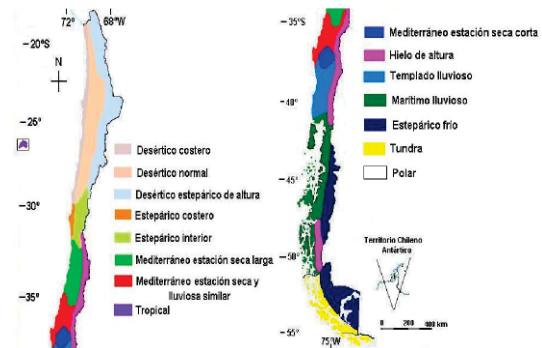


Imagen 5. Climas de Chile (Fuente Insunza 2012)

- Dry Andes & Wet Andes [33]

Contexto del As en el norte de Chile

Los principales estudios de As se encuentran en el norte de Chile

- *Los ambientes oxidantes de clima árido son los dominantes en Chile y Argentina, donde la especie dominante es la pentavalente [As(V)] [8, 34]*
- *Aumento de movilidad ante el aumento de pH [35]).*



Imagen 6. Canalización del Salar de Pedernales que drena agua salina hacia el río El Salado o de la Sal, terreno Atacama Marzo 2014 (por Andrés Villagrán).

Contexto del As en el norte de Chile

Los principales estudios de As se encuentran en el norte de Chile

- El río Loa => As de origen natural => 190 a $21,800 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ en aguas superficiales [36].
- Altas concentraciones de As correlacionan bien con la salinidad [36]; estos resultados contrastan con el comportamiento del As en climas áridos en La Pampa, Argentina [8].

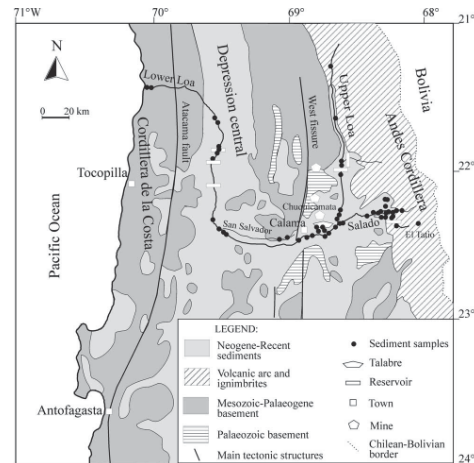


Imagen 7. Geología del río Loa. Fuente Romero et al. (2003) [12]

Contexto del As en el norte de Chile

Los principales estudios de As se encuentran en el norte de Chile

- La contribución de As de fuentes geotermales puede tener un rol significativo en la química de las aguas fluviales de este sector [6, 12, 36].
- Las aguas se caracterizan por un pH circum-neutral a alcalino (Tabla 1a).
- Favorece $\Rightarrow$ solución de elementos como B, F, V, Mo, Se & U [34].
- Fe y Mn tienden a formar óxidos e hidróxidos [34].

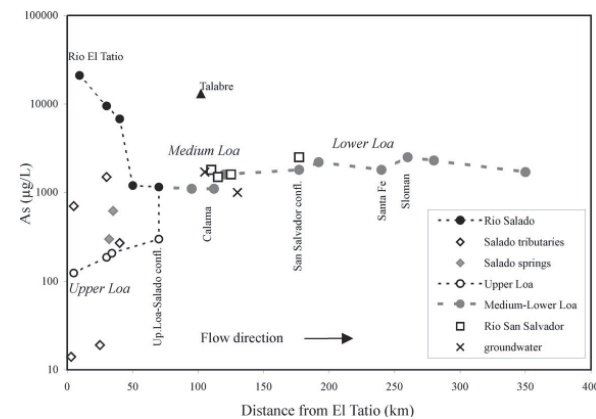


Imagen 8. Concentraciones de arsénico en función de la distancia a los Geysers del Tatio. Fuente Romero et al. (2003) [12]

Contexto del As en el norte de Chile

Los principales estudios de As se encuentran en el norte de Chile

- Estudios de SSP en río Loa => óxidos e hidróxidos de Fe & Mn, residual & carbonatos [12, 24].
- Esto coincide con zonas áridas del Altiplano de Bolivia [37] y con la mayoría de áreas que presentan As en ambientes oxidantes con pH circum-neutral a alcalino [4, 8].

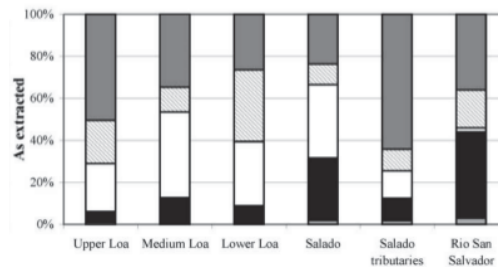


Imagen 9. Particionamiento en estado sólido (SSP) de sedimentos del río Loa. Fuente Romero et al. 2003 [12]

Contexto del As en el norte de Chile

Los principales estudios de As se encuentran en el norte de Chile

- Estudios recientes en el norte de Chile => bacterias epiliticas naturalmente presentes en la cuenca del río Camarones podrían aumentar la movilidad del As bajo pH circum-neutral [17].
- Adicionalmente, las bacterias podrían jugar un rol fundamental en la especiación del As una vez que éste se ha liberado [16, 17].

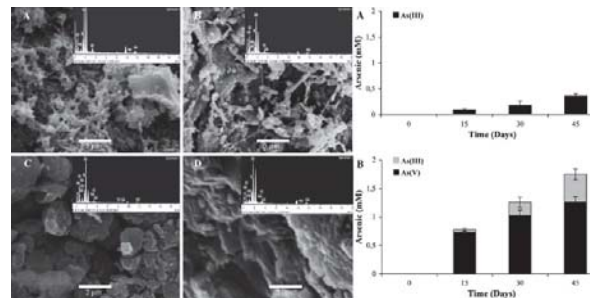


Imagen 10. Fuente Campos et al. (2011) [17].

Zona de estudio

Características del norte de la Región de Atacama

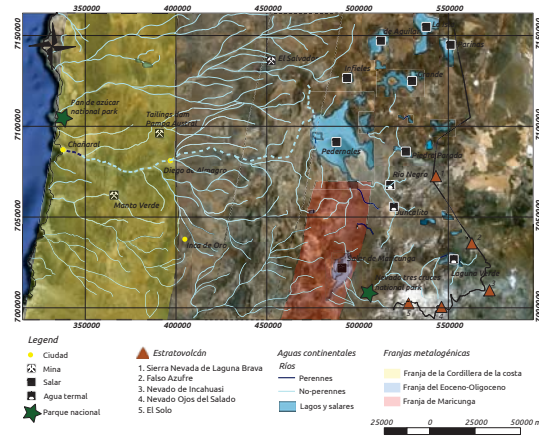


Imagen 11. Zona de estudio, sector norte de la Región de Atacama (por Joseline Tapia).

Hipótesis de trabajo y objetivos

Hipótesis & objetivos

Hipótesis

La naturaleza geológica - zona volcánica central, aguas termales, depósitos minerales - de la zona norte de la Región de Atacama podrían ser la fuente de las altas concentraciones de arsénico, implicando que los aportes antropogénicos no son relevantes. La movilidad y deposición de arsénico en este ambiente está controlada principalmente por salinidad, clima y actividad microbiológica.

Objetivo general

Determinar las fuentes y los procesos de dispersión exógena asociados con arsénico en el sistema hidrológico constituido por las aguas termales de Laguna Verde & Río Negro, el Salar de Pedernales y el río El Salado.

Hipótesis de trabajo y objetivos

Hipótesis & objetivos

Hipótesis

La naturaleza geológica - zona volcánica central, aguas termales, depósitos minerales - de la zona norte de la Región de Atacama podrían ser la fuente de las altas concentraciones de arsénico, implicando que los aportes antropogénicos no son relevantes. La movilidad y deposición de arsénico en este ambiente está controlada principalmente por salinidad, clima y actividad microbiológica.

Objetivo general

Determinar las fuentes y los procesos de dispersión exógena asociados con arsénico en el sistema hidrológico constituido por las aguas termales de Laguna Verde & Río Negro, el Salar de Pedernales y el río El Salado.

Índice

- 1 El arsénico (As) en la Tierra
 - Concentraciones globales de As
 - La contaminación por As en Chile
 - El contexto del As en Chile
- 2 As en la zona norte de la Región de Atacama
 - **Muestreo**
 - Trabajo en curso
 - Trabajo futuro

Muestreo

Muestreo y tipo de muestra campaña Marzo 2014

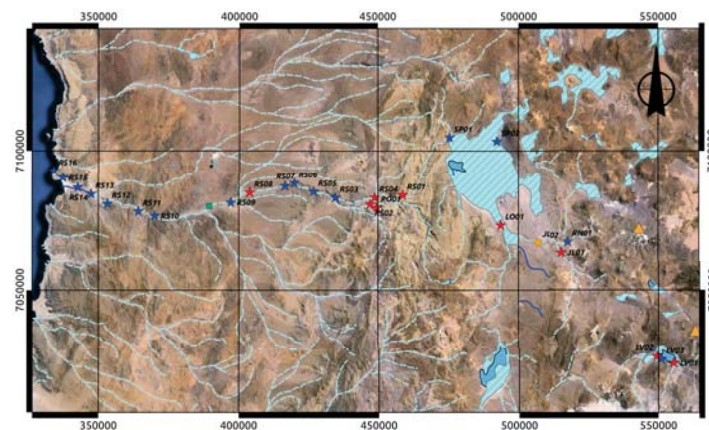


Imagen 12. Estrellas azules: agua; Estrellas rojas: agua & sedimento; Rombo naranja: sedimento. Cuadrado verde: desaparición del río El Salado (por Joseline Tapia).

Arsénico_{total} disuelto

Mapa de distribución de As_{total} en las aguas de la zona norte de la Región de Atacama

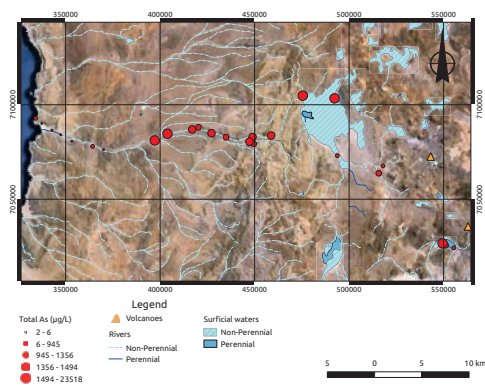


Imagen 13. As_{total} en muestras de agua filtrada y acidificada (ph 2) del río El Salado (por Joseline Tapia).

Índice

- 1 El arsénico (As) en la Tierra
 - Concentraciones globales de As
 - La contaminación por As en Chile
 - El contexto del As en Chile
- 2 As en la zona norte de la Región de Atacama
 - Muestreo
 - **Trabajo en curso**
 - Trabajo futuro

Material retenido en filtros de 0,45 μm Observaciones SEM => Río El Salado (RS08 izq; RS14 der)

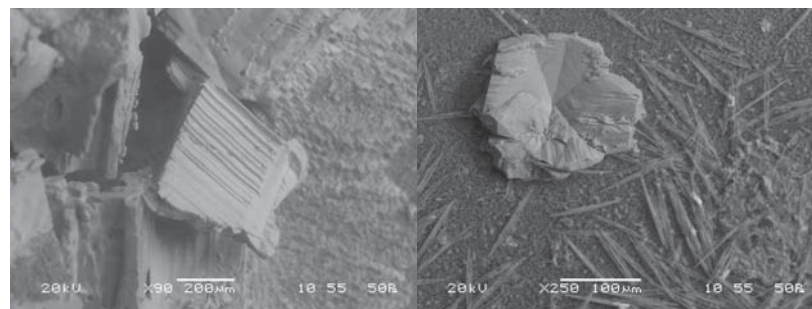


Imagen 15. Izquierda halita en RS08; Derecha halita y yeso en RS14 (por Eduardo Medina).

Material retenido en filtros de 0,45 μm

Observaciones SEM => Río Negro (RN01 diatomeas => Achnanthisdium)

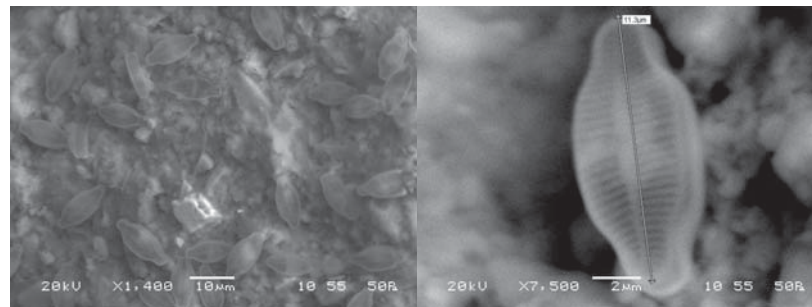


Imagen 16. Diatomeas en aguas termales de Río Negro RN01 (por Eduardo Medina).

Microbiología Reducción de As (ArsC)



Imagen 17. Microbiología, presencia de enzima ArsC (por Diego Cornejo & Cristina Dorador).

Índice

- 1 El arsénico (As) en la Tierra
 - Concentraciones globales de As
 - La contaminación por As en Chile
 - El contexto del As en Chile
- 2 As en la zona norte de la Región de Atacama
 - Muestreo
 - Trabajo en curso
 - Trabajo futuro

Especiación de As en aguas y sedimentos

- Especiación de As
- Determinación de matriz elemental de muestras

Especiación de As en aguas y sedimentos

- Especiación de As
- Determinación de matriz elemental de muestras

- Digestiones secuenciales
- Caracterización de óxidos e hidróxidos de Fe
- Determinación de minerales portadores de As

Sumario

- Las condiciones geológicas de la zona norte de la Región de Atacama son propicias para caracterizar el comportamiento del As en ambientes exógenos de clima hiper-árido.
- Las concentraciones de As disueltas en las cuencas hidrológicas de estudiadas son mayores a 700 mg/L al este de la localidad de Diego de Almagro.
- Perspectiva
 - Resta realizar estudios de fraccionamiento en estado sólido en sedimentos (a qué fracción lábil se asociaría el As)
 - Realizar campañas de muestreo en estaciones climáticas contrastantes (cambios en concentraciones de As y en comunidades microbiológicas que sintetizan As)

Agradecimientos

- Laboratorio de Química Bio-Inorgánica y Ambiental del Departamento de Química de la Universidad de Antofagasta => Domingo Román, Pedro Cortés, Juan Ávila
- Laboratorio de Investigación en Procesos de la Universidad de Antofagasta => M^a Elisa Taboada & Elsa Flores
- Laboratorio de Complejidad Microbiana y Ecología Funcional de la Universidad de Antofagasta => Cristina Dorador & Diego Cornejo
- Laboratorio de Paleomagnetismo del Departamento de Geología de la Universidad de Chile => César Arriagada

Lecturas complementarias I



RUDNICK, R. & GAO, S. 2003. *Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry*, **3**, 1-64.



WITT-ERICKSEN, G., PALME, H., O'NEILL, H., ALLEN, C. 2009. The geochemistry of the volatile trace elements As, Cd, Ga, In and Sn in the Earth's mantle new evidence from insitu analyses of mantle xenoliths. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, **73**, 1755-1778.



GAILLARDET, J., VIERS, J., DUPRÉ, B. 2003. Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry*, **5**, 225-272.



SMEDLEY, P.L. & KINNIBURGH, D.G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, **17**, 517-568.



McCLINTOCK, T., CHEN, Y., BUNDSCHUH, J., OLIVER, J., NAVONI, J., OLMOS, V., VILLAAMIL, L., AHSAN, H., PARVEZ, F. 2012. Arsenic exposure in Latin America: Biomarkers, risk assessments and related health effects. *Science of the Total Environment*, **429**, 76-91.

Lecturas complementarias II

-  LÓPEZ, D., BUNDSCHUH, J., BIRKLE, P., ARMIENTA, M.A., CUMBAL, L., SRACEK, O., CORNEJO, L., ORMACHEA, M. 2012. Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Science of the Total Environment*, **429**, 57-75.
-  SMITH, A.H., LINGAS, H.O., RAHMAN, M. 2000. Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. *Bull. WHO*, **78**, 1093-1103.
-  SMEDLEY, P.L., NICOLLI, H.B., MACDONALD, D.M.J., BARROS, A.J., TULLIO, J.O. 2002. Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry*, **17(3)**, 259-284.
-  ROWLAND, H., OMOREGIE, E., MILLOT, R., JIMENEZ, C., MERTENS, J., BACIU, C., HUG, S., BERG, M. 2011. Geochemistry and arsenic behaviour in groundwater resources of the Panonian Basin (Hungary and Romania). *Applied Geochemistry*, **26**, 1-17.

- ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ | ≡ ↺ 🔍 ↻

- ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡|≡ ↺ 🔍 ↻

- ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡|≡ ↺ 🔍 ↻

- ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡|≡ ↺ 🔍 ↻

Lecturas complementarias VII

 STERN, C. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Andean Geology*, **31**(2), p. 161-206.

 MUNIZAGA, F., HERVÉ, F., DRAKE, R., PANKHURST, R.J., BROOK, M., SNELLING, N. 1988. Geochronology of the Lake Region of south-central Chile (39°-42° S): Preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences*, **1**, 309-316.

 RAMOS, V. 2000. The southern Central Andes. In *Tectonic evolution of South America* (Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz-Filho, A., Campos, D.A., editors). International Geological Congress, Rio de Janeiro, 31, 561-604.

 HAUSER, A. 1989. Fuentes termales y minerales en torno a la Carretera Austral. Regiones X-XI Chile. *Revista Geológica de Chile*, **16**(2), 229-239.

 HAUSER, A. 1997. Catastro y caracterización de las aguas minerales y termales de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 50, 1-63.

Lecturas complementarias VIII



RISACHER, F., ALONSO, H., SALAZAR, C. 1999. *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III Regiones, Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, SIT n° 50.*



Insunza, J. 2012. *Climas de Chile. Apuntes de Meteorología Descriptiva, Universidad de Concepción, 421-451.*



LLIBOUTRY, L. 2008. *Glaciers of the Dry Andes. USGS website.*



FERNÁNDEZ-TURIEL, J.L., GALINDO, G., PARADA, M.A., GIMENO, D., GARCÍA-VALLES, M., SAAVEDRA, J. 2005. *Estado actual del conocimiento sobre el arsénico en el agua de Argentina y Chile: origen, movilidad y tratamiento. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea y IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Río Cuarto, 25-28 Octubre.*



DZOMBAK, & MOREL, 1990. *Surface complexation modelling-hydrous ferric oxide. John Wiley, New York.*



CÁCERES, L., GRUTTNER, E., CONTRERAS, R. 1992. *Water recycling in arid regions-Chilean case. Ambio, 21, 138-144.*



TAPIA, J. & AUDRY, S. 2013. Control of early diagenesis processes on trace metal (Cu, Zn, Cd, Pb and U) and metalloid (As, Sb) behaviors in mining- and smelting-impacted lacustrine environments of the Bolivian Altiplano. *Applied Geochemistry*, **31**, 60-78.