



RECURSOS HÍDRICOS REGIÓN DE TARAPACÁ

Diagnóstico y Sistematización de la Información



Imagen de portada: *Fertilidad para el pueblo* de Andrea Tirado (INTI), artista visual de la comuna de Camiña. La rana, símbolo de fertilidad y abundancia del agua en la cultura aymara, lleva a su vez una *chakana* o cruz andina en representación del pueblo.

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de alguna parte esta obra, incluyendo el diseño de la cubierta, sin contar con la autorización de los autores. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Ley N° 17.336).

© UNAP - Universidad Arturo Prat, 2013.

ISBN: 978 956 302 081 - 6

CIDERH, Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos

Calle Vívar 493, 3er Piso

Edificio Don Alfredo

Iquique, CHILE

Fono: (56)(57) 2 530800

email: contacto@ciderh.cl

www.ciderh.cl

Impreso en Chile.

RECURSOS HÍDRICOS REGIÓN DE TARAPACÁ

Diagnóstico y Sistematización de la Información



Autores

Elisabeth Lictevout

*Hidrogeóloga – Gestión Integrada de Recursos Hídricos
Dirección Científica*

Constanza Maass

Geógrafa

Damián Córdoba

Ing. Geólogo – Hidrogeólogo

Venecia Herrera

Dra. en Ciencias, mención Química

Reynaldo Payano

Ing. Civil – Dr. (c) en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos

Asistentes

Jazna Rodríguez

Ing. Civil Ambiental, Analista SIG

José Aguilera

Ing. Civil Ambiental egresado

Priscila Beltrán

Analista Química





Luz Ebensperger Orrego,
Intendente Región de Tarapacá.

Prólogo

La Región de Tarapacá está ubicada en pleno Desierto de Atacama, una de las zonas más áridas del planeta, por lo que el agua, además de ser un recurso no renovable, es un recurso de extremo valor para nuestra región. Y es por ello que como Gobierno Regional de Tarapacá consideramos que la creación del Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos, CIDERH, fue considerado un elemento primordial para enfrentar con claridad los desafíos en esta materia.

El Presidente Sebastián Piñera nos ha mandado para generar el desarrollo y el progreso en nuestras regiones, pero un desarrollo que vaya de la mano con el medio ambiente, con nuestros recursos, que son diferentes en cada zona de Chile. Nos entregó las facultades para, desde Tarapacá, encontrar las políticas públicas regionales que nos entreguen la información necesaria respecto del recurso hídrico y que, al mismo tiempo, nos permita protegerlo, sobretodo en esta zona en que resulta tan escaso.

Durante los últimos tres años no hemos estado ajenos a los problemas generados por la explotación ilegal de los pozos de agua subterránea y que, en este libro, se destaca como el principal aportador permanente de este recurso. Como autoridades, hemos fiscalizado constantemente esta situación a través de los servicios correspondientes, teniendo como norte la protección de nuestro patrimonio hídrico. Radica también en esto la importancia de contar con los datos que establezcan la clara existencia del recurso hídrico en la región.

Nuestra geografía es muy diversa y hemos sabido convivir con ella y aprovechar sus bondades. Y para continuar en esta senda, queremos tener un diagnóstico completo sobre los recursos hídricos de Tarapacá y este importante documento estará a disposición de todos los ciudadanos, como una manera de usar responsablemente el agua; y nosotros seremos los primeros en cumplir con ese compromiso que estableció este gobierno: un desarrollo sustentable en Tarapacá y en todo Chile.

Agradezco la colaboración de cada una de las personas que permitieron editar este trabajo investigativo, pero especialmente, de los tarapaqueños que aman esta tierra, y respetan y defienden el legado de esta región; una de las más áridas de este lado del planeta, pero que camina de forma pionera, a pasos agigantados hacia el ansiado desarrollo de Tarapacá y de nuestro querido país.

Abreviaciones y Símbolos

ARM	Media Residual Absoluta
BNA	Banco Nacional de Aguas
CE	Conductividad Eléctrica
CEAZA	Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas
CENIMA	Centro de Investigación en Medio Ambiente
CIAPEP	Curso Interamericano de Preparación y Evaluación de Proyectos
CIDERH	Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos
CMCC	Compañía Minera Cerro Colorado
CMDIC	Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi
CMQB	Compañía Minera Quebrada Blanca
CONICYT	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
COSAYACH	Compañía de Salitre y Yodo de Chile
DAA	Derechos de Aprovechamiento de Aguas
DAD-UNAP	Departamento Agricultura del Desierto - Universidad Arturo Prat
DEM	Modelos de Elevación Digital
DGA	Dirección General de Aguas
DGF	Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DICTUC	Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile
DICUC	Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile
DMC	Dirección Meteorológica de Chile
DR	Dirección de Riego
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
EIDAP-UC	Estación de Investigaciones Desérticas Alto Patache de la Pontificia Universidad Católica de Chile
ENAP	Empresa Nacional del Petróleo
GDB	Geodatabase
GGE	GeoGlobal Energy
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HMC	Haldeman Mining Company
ID_CDOC	Identificador del Centro de Documentación
IGM	Instituto Geográfico Militar
INN	Instituto Nacional de Normalización
IRH	Ingeniería y Recursos Hidráulicos
JICA	Japan International Cooperation Agency

Kh	Conductividad hidráulica horizontal
Kv	Conductividad hidráulica vertical
MOP	Ministerio de Obras Públicas
ND	Derecho de aprovechamiento.
NR	Derechos de aprovechamiento regularizados.
NRMS	Error cuadrático medio normalizado
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PEST	Parameter Estimation
PUC	Pontificia Universidad Católica de Chile
PSA	Plan de Seguimiento Ambiental
r^2	Coefficiente de Determinación
RMS	Error cuadrático medio
SCM	Sociedad Contractual Minera
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SENDOS	Servicio Nacional de Obras Sanitarias
SGA	Soluciones en Gestión Ambiental
SIG	Sistema de Información Geográfica
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios
SQM	Sociedad Química y Minera de Chile
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SERPLAC	Secretaría Regional de Planificación
SMA	Soil Moisture Accounting
s.n.m.	Sobre el nivel del mar
Ss	Almacenamiento específico
STD	Solidos Totales Disueltos
Sy	Rendimiento específico
UA	Usuario Antiguo (dicho de: Derecho de Aprovechamiento de Aguas).
UNAP	Universidad Arturo Prat
UCN	Universidad Católica del Norte
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USGS	United States Geological Survey
UTM	Proyección Universal Transversal de Mercator
WGS	World Geodetic System
\bar{x}	Media aritmética
σ	Desviación estándar

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de los actores públicos, privados y académicos que generan información sobre los recursos hídricos en la Región de Tarapacá.

Nuestro profundo reconocimiento está dirigido al equipo regional de la Dirección General de Aguas, especialmente a Javier Vidal como Director Regional, y a Pedro Carril, Juan Salas y Waldo Solar por su total disposición en entregar, no solamente, la información disponible sino también su conocimiento de la región.

Queremos destacar la muy buena disposición de todos los servicios públicos contactados en facilitar información: la Corporación Nacional de Fomento a la Producción (CORFO), el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI), la Comisión Nacional de Riego (CNR), la Corporación Nacional Forestal (CONAF), el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).

Nuestro agradecimiento a las empresas que respondieron a nuestras insistentes solicitudes y dedicaron tiempo en buscar y revisar minuciosamente la información disponible: Aguas del Altiplano, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Compañía Minera Cerro Colorado, Compañía Minera Quebrada Blanca, Compañía Minera SQM, Compañía Minera HMC, Compañía Minera Bullmine y las consultoras Servicios de Ingeniería SITAC y Geohidrología.

En la parte académica, agradecemos a la Universidad Arturo Prat, en especial a Emma Torres, Directora del Núcleo Central de Información Regional, por entregar su valioso conocimiento para la realización del Centro de Documentación y a Jorge Arenas, Académico de la Facultad de Recursos Naturales Renovables; a la Universidad de Chile, la Pontificia Universidad Católica de Chile, la Universidad Católica del Norte, la Estación de Investigaciones Desérticas Alto Patache y el Centro de Estudios de Humedales.

Finalmente, no podemos dejar de agradecer a todos quienes de una u otra manera apoyaron incondicionalmente a los autores durante las distintas etapas de este trabajo

Índice General

	Pág.		Pág.
Prólogo	5	4.1. Derechos de Aprovechamiento de Aguas subterránea.....	42
Símbolos y Abreviaciones	6	4.2. Derechos de Aprovechamiento de Aguas superficiales	42
Agradecimientos	9	4.3. Demanda comprometida	43
Índice General	10	Capítulo III. Análisis por zona	
Índice de Figuras	12	1. Zona Altiplánica	47
Índice de Tablas	14	1.1. Introducción.....	47
Resumen Ejecutivo	16	1.1.1. Estudios	47
Capítulo I. Introducción		1.1.2. Datos.....	48
1. Presentación CIDERH.....	23	1.1.3. Análisis de la información	50
2. Presentación del proyecto	24	1.2. Hidrografía.....	51
3. Metodología.....	24	1.3. Hidrología e Hidrogeología	52
3.1. Etapa I. Recopilación de la información.....	24	1.3.1. Hidrogeología	52
3.2. Etapa II. Revisión de la información	25	1.3.2. Hidrología	55
3.3. Etapa III. Sistematización de la información	26	1.4. Calidad del Agua	61
3.4. Etapa IV. Análisis crítico.....	26	1.5. Conclusión.....	66
3.5. Etapa V. Difusión y transferencia.....	26	2. Zona Pampa del Tamarugal	67
3.6. Etapa VI: Actualización	27	2.1. Introducción	67
4. Región de Tarapacá: ubicación y descripción demográfica	27	2.1.1. Estudios.....	67
Capítulo II. Análisis regional		2.1.2. Datos.....	67
1. Geología y geomorfología	29	2.1.3. Análisis de la información	68
1.1. Aspectos generales	29	2.2. Hidrografía.....	75
1.2. Evolución geológica	29	2.3. Hidrología e Hidrogeología	76
1.3. Tectónica y vulcanismo.....	32	2.3.1. Subcuencas de Aroma y Soga.....	76
1.4. Descripción de las principales unidades estratigráficas	32	2.3.2. Subcuenca de Tarapacá.....	76
1.5. Depósitos de interés económico.....	33	2.3.3. Subcuenca de Quipisca y Juan Morales	77
1.6. Cartografía geológica	34	2.3.4. Subcuenca de Quisma	77
1.7. La Pampa del Tamarugal.....	34	2.3.5. Subcuenca de Chacarilla	80
2. Hidrología e Hidrogeología.....	35	2.3.6. Subcuenca Ramada y Chipana.....	80
3. Calidad del agua	38	2.3.7. Acuífero Pampa del Tamarugal.....	80
4. Demanda y uso del agua	40	2.3.8. Cuenca Pampa del Tamarugal.....	83
		2.4. Calidad del agua.....	89
		2.5. Conclusión.....	92

	Pág.		Pág.
3. Zona Salar de Llamara - Río Loa	93	2.1. Estaciones de monitoreo	113
3.1. Introducción	93	2.1.1. Estación meteorológica	113
3.1.1. Estudios	93	2.1.2. Estación fluviométrica	113
3.1.2. Datos	94	2.1.3. Estación piezométrica	114
3.2. Hidrografía	96	2.1.4. Estación de calidad de agua	115
3.3. Hidrología e hidrogeología	98	2.1.5. Estación de agua de niebla	116
3.3.1. Subcuencas de Guatacondo, Maní, Mal Paso y otras	98	2.2. Delimitaciones Hidrográficas	116
3.3.2. Acuífero Salar de Llamara	98	2.2.1. Cuencas hidrográficas	116
3.3.3. Cuenca de Llamara	99	2.2.2. Acuíferos	117
3.4. Calidad del agua	102	2.2.3. Glaciares	117
3.5. Conclusión	103	2.3. Elementos con componente legal	118
4. Zona Camiña-Camarones	104	2.3.1. Pozos de extracción	118
4.1. Introducción	104	2.3.2. Peticiones de derechos de agua subterránea y derechos de agua superficial	118
4.1.1. Estudios	104	2.3.3. Evaluación de impacto ambiental	119
4.1.2. Datos	104	2.4. Coberturas cartográficas	119
4.2. Hidrografía	106	2.4.1. Cartas geológicas	119
4.3. Hidrología e hidrogeología	106	2.4.2. Cartas geomorfológicas	119
4.3.1. Hidrogeología	106		
4.3.2. Hidrología	106	Capítulo V. Conclusión y Recomendaciones	
4.4. Calidad del agua	107	Conclusión y Recomendaciones	147
4.5. Conclusión	107	Anexos	151
5. Zona Costera	108	Anexo 1: Fichas Síntesis por Zonas Hidrográficas	151
5.1. Introducción	108	Zona Altiplánica	151
5.1.1. Estudios	108	Zona Pampa del Tamarugal	165
5.1.2. Datos	109	Zona Llamara - Río Loa	185
5.2. Hidrografía	109	Zona Camiña - Camarones	193
5.3. Hidrología e hidrogeología	109	Zona Costera	199
5.4. Calidad del agua	110	Anexo 2: Bibliografía	206
5.5. Conclusión	110	Anexo 3: Glosario	216
Capítulo IV. Observatorio del agua			
1. Centro de Documentación	111		
2. Sistema de Información Geográfica web	112		

Índice de Figuras

N° de la Figura	Pág.	N° de la Figura	Pág.
1. Etapas metodológicas.	24	23. Mapa con valores medios anuales de caudal superficial (l/s) por estación según PUC (2009) y GSF Ing. (2010).	57
2. Documentación recopilada según tipo de institución.	25	24. Serie cronológica de caudales registrados en las estaciones de Piga en Collacagua (A) y Collacagua en Peñablanca (B).	58
3. Documentos recopilados por década.	25	25. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica en aguas del río Isluga (A), río Cariquima (B) y río Cancosa (C).	62
4. Proporción de expedientes sistematizados según estado de aprobación.	25	26. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica en aguas del río Collacagua en Peñablanca (A) y río Piga (B).	62
5. División política y administrativa de la Región de Tarapacá.	27	27. Delimitación de sectores Altiplano Norte y Altiplano Sur.	64
6. Corte geológico - Región de Tarapacá.	30	28. Diagrama de Piper para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales en el sector norte del Altiplano.	64
7. Principales unidades geomorfológicas de la Región de Tarapacá.	31	29. Diagrama de Piper para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales en el sector sur del Altiplano (ríos (A), lagunas (B)).	64
8. Red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA.	37	30. Concentración de sílice y litio en vertientes termales de Tarapacá.	66
9. Repartición de los DAA subterráneos por zona hidrográfica.	41	31. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona de la pampa del Tamarugal según DGA (2000).	67
10. Repartición del caudal total otorgado a DAA subterráneos por zona hidrográfica.	41	32. Zona hidrográfica de la Pampa del Tamarugal clasificadas según la cantidad de estudios existentes.	68
11. Repartición de los DAA superficiales por zona hidrográfica.	41	33. Mapa de estaciones de monitoreo vigentes públicas, privadas y académicas en la zona Pampa del Tamarugal.	69
12. Caudal otorgado a los usuarios con DAA subterráneo mayor a 20l/s en la región de Tarapacá.	42	34. Mapa de cuencas y subcuencas hidrográficas de la Pampa del Tamarugal delimitadas según distintas fuentes.	75
13. Número de pozos y caudal otorgado por categoría de pequeños y grandes usuarios.	43	35. Serie cronológica de caudales registrados en las vertientes Resbaladero (A), Miraflores (B) y Concova (C).	79
14. Zonas hidrográficas.	45	36. Ubicación de los pozos de monitoreo de la DGA en el acuífero Pampa del Tamarugal y variación del nivel estático en el periodo de registro.	82
15. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona altiplánica según DGA (2000).	47	37. Serie cronológica de la variación del nivel estático en el pozo JICA 3.	83
16. Unidades hidrográficas altiplánicas clasificadas según la cantidad de estudios existentes.	48	38. Serie cronológica de la variación del nivel estático en los pozos de Chacarilla (A) y La Calera 3 (B).	83
17. Mapa de estaciones de monitoreo vigentes, de carácter público, privado y académico en la zona altiplánica.	49	39. Mapa con valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudal superficial (l/s) en estaciones de monitoreo DGA.	84
18. Mapa de unidades hidrográficas de la zona altiplánica delimitadas según distintas fuentes.	52		
19. Mapa de conexiones probadas y no probadas (con flechas).	53		
20. Mapa con valores medios anuales de precipitación (mm/año) y evaporación (mm/año) por estación según PUC (2009) y GSF (2010).	54		
21.A. Serie cronológica de los registros de precipitación media anual en las estaciones de Collacagua.	55		
21.B. Serie cronológica de los registros de precipitación media anual en las estaciones de Enquelga (B).	56		
22. Serie cronológica de evaporación mensual registrada en la estación de Collacagua.	56		

N° de la Figura	Pág.	N° de la Figura	Pág.
40. Serie cronológica de caudales registrados en la estación Tarapacá en Sibaya.	84	57. Mapa de estaciones de monitoreo y valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudal superficial (l/s) en la zona Camiña - Camarones.	105
41. Caudales de recarga de las subcuenca al acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente).	85	58. Serie cronológica de los caudales registrados en la estación fluviométrica de Camiña.	106
42. Evolución de la demanda en el acuífero Pampa del Tamarugal.	88	59. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas del río Camiña.	107
43. Repartición por usos de los DAA en el acuífero Pampa del Tamarugal.	88	60. Delimitación de unidades hidrográficas de zona costeras según DGA (2000).	108
44. Evolución de la demanda en el acuífero de Pica.	89	61. Zona hidrográfica costeras clasificadas según la cantidad de estudios existentes.	109
45. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica, en aguas de la quebrada Aroma (A), río Coscaya en Saitoco (B) y quebrada Tarapacá en Laonsana (C).....	89	62. Mapa de estaciones de monitoreo con sus respectivos valores medios anuales de precipitación (mm/año) en la zona costeras.	110
46. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas de las quebradas y las aguas termales de la Pampa del Tamarugal.	91	63. Centro de documentación.	111
47. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas de algunos pozos de la Pampa del Tamarugal (A) y algunos pozos JICA (B).	92	64. Tipos de documentos del Centro de Documentación.	111
48. Delimitación de unidades hidrográficas de Llamara – Río Loa según DGA (2000).	93	65. Catálogo en línea del Centro de Documentación.	112
49. Zona hidrográfica Llamara - Río Loa clasificadas según la cantidad de estudios existentes.	94	66. Despliegue de ventana informativa.	112
50. Mapa de estaciones de monitoreo y valores medios anuales de precipitación en la zona Llamara – Río Loa.	94	67. Mapa de las estaciones meteorológicas.	120
51. Mapa de valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudales superficiales (l/s) en la zona Llamara – Río Loa.	99	68. Mapa de las estaciones fluviométricas.....	122
52. Serie cronológica de los caudales registrados en la estación fluviométrica de Guatacondo en Copaquire.	100	69. Mapa de las estaciones piezométricas.	124
53. Caudales de recarga de las subcuenca al acuífero Salar de Llamara (por fuente).	100	70. Mapa de estaciones de calidad de aguas.	126
54. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales de la cuenca del Salar de Llamara.	102	71. Mapa de estaciones de monitoreo de agua de niebla.	128
55. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona Camiña - Camarones según la DGA (2000).	104	72. Mapa delimitaciones de unidades hidrográficas.	130
56. Zona hidrográfica Camiña - Camarones clasificadas según la cantidad de estudios existentes.	105	73. Mapa de límites de acuíferos.	132
		74. Mapa de Glaciares.	134
		75. Mapa de pozos de extracción.....	136
		76. Mapa de peticiones y derechos de aguas.	138
		77. Mapa de evaluaciones de impacto ambiental.....	140
		78. Mapa de cartas geológicas.	142
		79. Mapa de cartas geomorfológicas.....	144

Índice de Tablas

N° de la Tabla	Pág.	N° de la Tabla	Pág.
1. Población total de la región de Tarapacá por comunas.	28	17. Características del modelo hidrogeológico desarrollado por DICUC (1988).	70
2. Estratigrafía característica de la Pampa del Tamarugal.	33	18. Características del modelo hidrogeológico realizado por JICA (1995).	70
3. Estudios hidroquímicos por zona hidrográfica.	38	19. Características del modelo hidrogeológico realizado por DSM Minera S.A. (2002).	71
4. Evolución de las temáticas en los estudios analizados en función del tiempo.	39	20. Características del modelo hidrogeológico realizado por Rojas (2005).	72
5. Resumen de los DAA de naturaleza subterránea y superficial aprobados con el caudal otorgado en la región de Tarapacá por zona hidrográfica.	42	21. Características del modelo hidrogeológico realizado por DICTUC (2007b).	73
6. Lista de las unidades hidrográficas que integran cada zona según DGA (2000).	46	22. Características del modelo realizado por Rojas et al, 2010.	74
7. Características del modelo hidrológico probabilístico (estocástico) desarrollado en las cuencas altiplánicas.	50	23. Características del modelo hidrogeológico en el acuífero de Sur Viejo realizado por DICTUC (2008).	74
8. Características del modelo hidrogeológico del salar de Coposa.	51	24. Balance hídrico de la subcuenca de Aroma (por fuente).	76
9. Balance hídrico por sub - subcuencas de la DGA.	59	25. Balance hídrico de la subcuenca Tarapacá (por fuente).	77
10. Balance hídrico de la cuenca Salar del Huasco (por fuente).	60	26. Parámetros hidrológicos de la subcuenca Quipisca y Juan Morales (por fuente).	77
11. Balance hídrico del Salar de Coposa (por fuente).	60	27. Balance hídrico de la subcuenca de Quisma (por fuente).	79
12. Balance hídrico del Salar de Michincha (por fuente).	61	28. Balance hídrico de la subcuenca Chacarilla (por fuente).	80
13. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en ríos del Altiplano.	61	29. Balance hídrico de la subcuenca Ramada y Chipana (por fuente).	80
14. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos en estaciones de monitoreo de calidad de agua de la DGA en ríos andinos.	63	30. Recarga al acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente).	85
15. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y las concentraciones de As y B en las vertientes y los salares del Altiplano.	65	31. Comparación de la evaporación desde los salares de la Pampa del Tamarugal y del Salar de Llamara (por fuente).	87
16. Valores de temperatura, salinidad, acidez, clasificación geoquímica y concentraciones de As y B en aguas termales del Altiplano.	65	32. Evolución de la tasa de evapotranspiración de los Tamarugos (según fuente).	87
		33. Descarga del acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente).	89
		34. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en	

N° de la Tabla	Pág.	N° de la Tabla	Pág.
		estaciones de monitoreo DGA en quebradas y aguas termales en la Cuenca Pampa del Tamarugal.	90
35. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en aguas termales de la cuenca de la Pampa del Tamarugal [162].	91	48. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en estaciones de monitoreo DGA en la Quebrada de Camiña.	107
36. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en la cuenca Pampa del Tamarugal (aguas de las quebradas y ríos).	91	49. Estaciones meteorológicas.	114
37. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y las concentraciones de arsénico y boro en la "Pampa del Tamarugal-Subcuencas-Aguas Pozos.	92	50. Estaciones fluviométricas.	115
38. Balance hídrico del acuífero Pampa del Tamarugal, (por fuente).	92	51. Estaciones piezométricas.	115
39. Características del modelo hidrogeológico del acuífero de Llamara, realizado por DICTUC (2007c).	95	52. Estaciones de calidad de agua.	116
40. Características del modelo hidrogeológico realizado por DICTUC (2004).	96	53: Superficie glaciar Sillajhuay según autor.	118
41. Características del modelo hidrológico realizado por DICTUC (2006b) en la cuenca del Salar de Llamara.	97	54. Catálogo de atributos de la capa de estaciones meteorológicas.	121
42. Características del modelo hidrológico realizado por DICTUC (2006a) en el río Loa.	97	55. Catálogo de atributos de la capa de estaciones fluviométricas.	123
43. Caudales de recarga de las diferentes subcuencas al acuífero Salar de Llamara en l/s (por fuente).	100	56. Catálogo de atributos de la capa de estaciones piezométricas.	125
44. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en estaciones de monitoreo DGA en la quebrada Guatacondo.	102	57. Catálogo de atributos de la capa de estaciones de calidad de aguas.	127
45. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en el "Salar de Llamara y desembocadura del río Loa".	103	58. Catálogo de atributos de las estaciones de monitoreo de agua de niebla.	129
46. Balance hídrico del acuífero Salar de Llamara.	103	59. Catálogo de atributos las capas de unidades hidrográficas.	131
47. Parámetros hidrológicos de recarga y descarga según fuente en la		60. Catálogo de atributos de las capas de límites de acuíferos.	133
		61. Catálogo de atributos de la capa de glaciares.	135
		62. Catálogo de atributos de la capa de pozos de extracción.	137
		63. Catálogo de atributos de la capa de peticiones de DAA subterránea y de la capa de DAA superficial.	139
		64. Catálogo de atributos de la capa de evaluaciones de impacto ambiental.	141
		65. Catálogo de atributos de la capa de cartas geológicas.	143
		66. Catálogo de atributos de la capa de cartas geomorfológicas. ..	145

Resumen Ejecutivo

La presente publicación corresponde al informe final del proyecto *“Diagnóstico y sistematización de la información de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá”*, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) durante el año 2012. El objetivo fue generar un diagnóstico completo y preciso del conocimiento y de la información existente sobre los recursos hídricos de la región con el fin de identificar las brechas de conocimiento para orientar el trabajo futuro de investigación y transferir este conocimiento a todos los usuarios públicos, privados y académicos.

Con este proyecto se han generado dos productos destacados: un análisis crítico de la cantidad y calidad de la información disponible a nivel regional y por zona hidrográfica y una herramienta de gestión y transferencia de la información, el *“Observatorio del agua”*. Este último está integrado por dos elementos: un Centro de Documentación especializado en los recursos hídricos de la región con un catálogo en línea y un *SIG web (Sistema de Información Geográfica web)* el cual presenta espacialmente la información referida a estaciones de monitoreo hídrico, unidades hidrográficas, coberturas cartográficas, elementos hidrológicos e hidrogeológicos, pozos de extracción y derechos de aprovechamiento de agua (DAA).

La metodología consistió en una recopilación exhaustiva de estudios, datos y cartografías, su revisión y sistematización en un sistema de información geográfica y fichas técnicas, el análisis de la información existente a nivel regional y por zona hidrográfica, tanto de la calidad como de la cantidad de información. A continuación, se exponen los principales resultados del proyecto:

1. Se recopilaron 306 documentos, desde 1893 hasta 2012, procedentes de fuentes públicas, privadas y académicas. La etapa de revisión consistió en la realización de 211 fichas priorizando los documentos más importantes y en la trazabilidad de la información (fuente de información, fechas y metodologías, disponibilidad y accesibilidad).
2. La Región de Tarapacá se caracteriza por sus cuencas cerradas o endorreicas, tanto en el Altiplano (cuencas altiplánicas) como en la Depresión Central (cuenca Pampa del Tamarugal), limitadas al norte y al sur por cuencas exorreicas que desembocan al mar (Camiña y Río Loa). Esta característica, añadida a la condición de clima árido, en el cual la evaporación supera ampliamente la precipitación, ha condicionado y condiciona un funcionamiento hidrológico e hidrogeológico único en el cual dominan ambientes evaporíticos (salares) y napas subterráneas con recarga lateral que conforman el único recurso permanente. Las condiciones meteorológicas, geomorfológicas y geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas condicionan ecosistemas vulnerables ya que el equilibrio hidrológico que resulta de un sistema en estado natural (las entradas al sistema igualan las salidas a largo plazo) se rompe significativamente al cambiar una variable como el aumento de las descargas.
3. La Región de Tarapacá está constituida por cuatro grupos de cuencas, consideradas en este trabajo como zonas hidrográficas: las cuencas altiplánicas endorreicas (algunas compartidas con Bolivia), la cuenca endorreica de la Pampa del Tamarugal (constituida por ocho subcuencas), las cuencas exorreicas que definen el límite norte y sur de la región (cuenca de Camiña, cuenca del río Loa y subcuenca del Salar de Llamara) y las cuencas costeras arreicas. Por otro lado, la región se caracteriza por cinco elementos geomorfológicos: Litoral y Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera, Altiplano y Cordillera de los Andes.
4. Se puede considerar que existe un buen nivel de conocimiento de la geología y geomorfología a nivel regional, en particular la geología del Cenozoico, período en el cual la región adquiere su aspecto actual y empieza a formarse la Pampa del Tamarugal. Aun así, la región no cuenta con el 100% de su superficie con cartografía geológica y geomorfológica a escala superior a 1:100.000.

5. La Región de Tarapacá es, en su mayor parte, una zona árida con precipitaciones casi nulas en el Litoral, en la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, que aumentan gradualmente con la altura en la Precordillera hasta alcanzar en el Altiplano un promedio anual alrededor de 150 – 180 mm. Por otro lado, la evaporación juega un papel predominante en el balance hídrico ya que supera ampliamente las precipitaciones al alcanzar un promedio entre 2.000 y 3.000 mm/año en el Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, y entre 1.000 y 2.000 mm/año en el Altiplano.
6. **El agua superficial en forma de precipitaciones y escurrimientos superficiales, sólo se materializa en el Altiplano y en la Precordillera;** alcanza la Depresión Central de forma esporádica durante eventos hidrometeorológicos extremos. El conocimiento de los recursos hídricos superficiales se basa en (y se limita) al análisis estadístico de los datos generados por las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA). Si bien existen estaciones de monitoreo instaladas por compañías mineras, más algunas estaciones de instituciones académicas, escasamente han sido analizadas en conjunto. **Esta información se considera parcial, tanto espacial como temporalmente** ya que existen cuencas y subcuencas sin monitoreo y pocas estaciones con registro continuo. Por otra parte, no se logran medir los caudales generados durante los eventos extremos ni se ha estudiado la relación entre compartimentos hidrológicos (aguas superficiales-subterráneas). **La evaporación, la evapotranspiración y la escorrentía constituyen variables hidrológicas poco conocidas** a la fecha, lo que afecta directamente la estimación de la recarga (escorrentía) y del balance hídrico (evaporación, evapotranspiración) en general.
7. **El agua subterránea constituye el principal recurso hídrico permanente,** característico de muchas zonas áridas del mundo. La DGA monitorea mediante 39 pozos los acuíferos Pampa del Tamarugal y Salar del Huasco. Las Compañías Mineras, en el marco de sus compromisos ambientales y mediante programas de monitoreo, generan datos hidrogeológicos de los acuíferos en los cuales extraen agua para sus faenas. No obstante, excepto el acuífero Pampa del Tamarugal y los acuíferos de las cuencas altiplánicas Lagunilla, Coposa y Minchincha, existe un vacío de información hidrogeológica en la mayoría de las cuencas y subcuencas, respecto a los límites de los acuíferos, los flujos subterráneos y la evolución de los niveles piezométricos. No se ha dado suficiente importancia al conocimiento de la geología de los acuíferos de la región (Pampa del Tamarugal, Pica, Salar de Llamara y los acuíferos aluviales de las quebradas). Los estudios hidrogeológicos se focalizaron en definir la recarga y, en menor medida, los volúmenes disponibles con un grado de incertidumbre alto debido a la ausencia de datos. Todos los acuíferos con extracciones en la región muestran un balance negativo (las descargas superan la recarga), si bien tal afirmación no se puede cuantificar ya que no se dispone de información actualizada, y existen incertidumbres en la estimación de la recarga y descargas. Esta situación se materializa con un descenso continuo y paulatino de los niveles de los acuíferos, sin embargo no existe una visión clara de la evolución de dichos niveles ni una predicción de la evolución a corto, medio y largo plazo. El descenso de los niveles del agua subterránea, de manera general, se caracteriza también por el desmejoramiento de la calidad del agua aunque esta consideración no ha sido estudiada en la región. Por otro lado, se ha estimado que gran parte de los recursos hídricos subterráneos de la región se generaron durante una fase húmeda comprendida entre los 17.000 y 11.000 años y/o de crecidas durante el Holoceno (últimos 11.000 años), por lo que en la región de Tarapacá se está haciendo uso de recursos no renovables de agua.
8. La estimación del consumo de agua (extracciones) y de los respectivos usos, basada en la información contenida en el Catastro Nacional de Agua de la DGA, muestra un alto grado de incertidumbre debido a que la información se encuentra incompleta y desactualizada. Dicha incertidumbre afecta la estimación de la descarga, y por ende, el balance hídrico de las cuencas y cuerpos de agua. Esto restringe considerablemente una gestión eficiente de los recursos hídricos. En la Región de Tarapacá, en el 2012, existen **2.298 solicitudes de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) subterráneas, de las cuales 766 (33%) han sido aprobados a la fecha, los cuales corresponden a un total de 928 puntos de captación con un caudal total otorgado de 7.503 l/s. Por otro lado, existen 425 solicitudes de DAA superficiales que corresponden a un total de 776 puntos de captación.** Asimismo, se desconoce el uso asignado a cada DAA en muchos casos (no especificado en el proceso de solicitud de un DAA), desconociéndose a su vez las transacciones de DAA que ocurren después del otorgamiento (propietario actual del DAA). En la Región de Tarapacá, el usuario con el caudal otorgado más alto es la empresa sanitaria, seguido por las Compañías Mineras Doña Inés de Collahuasi, Sociedad Química y Minera de Chile S.A. (SQM), Quebrada Blanca y Cerro Colorado, siendo por lo tanto el rubro Minero el primer usuario de la región.
9. **Los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Región de Tarapacá presentan un amplio intervalo de valores de salinidad natural, así como elementos tóxicos y/o nocivos para la salud.** Los valores de salinidad encontrados varían entre 50 a 350.000 mg/l (contenido de Sólidos Totales Disueltos - STD). Las elevadas concentraciones de Arsénico (As) registradas en los puntos de la red de monitoreo de la DGA, sobrepasan el máximo establecido permitido por la normativa vigente. En la región, se identifican áreas con elevadas concentraciones de As, B y Mn, principalmente en

todas las aguas del Altiplano y en las quebradas de Camiña, Aroma, Chacarilla y Guatacondo particularmente en el pozo de la Colonia de Pintados. Asimismo, la región se caracteriza por sus aguas sulfatadas. Por otro lado, en el sector de Pica y Matilla, las aguas han sido clasificadas de excelente calidad de acuerdo a la legislación vigente. En los reportes de calidad de las aguas termales de la región, se señalan concentraciones importantes de Sílice (SiO_2) y Litio (Li) como elementos asociados a la actividad termal. La distribución de estos elementos de origen natural (volcanismo de la cordillera de los Andes) es altamente heterogénea, con ríos o cuerpos de agua de muy buena calidad (zona de Pica y Canchones) además de ciertos ríos altiplánicos (río Llacho o Charvinto).

Zona Altiplánica

10. **Las cuencas altiplánicas tienen recursos superficiales y subterráneos ambos fuertemente vinculados a un ecosistema vulnerable** (bofedales, humedales y salares) con un alto valor socioeconómico, cultural y paisajístico. En sus estados naturales, presentan un equilibrio entre los diferentes compartimentos hidrológicos (superficial – subterráneo) y los ecosistemas (fauna – vegetación). Esta característica tiene consecuencias directas sobre las posibilidades de aprovechamiento de los recursos hídricos de las cuencas altiplánicas, ya que un aumento de la descarga afectará directamente el equilibrio natural del sistema. Su uso está restringido al mínimo para asegurar la conservación del ecosistema.
11. De un total de diez cuencas altiplánicas, sólo cuatro cuentan con estudios (Lagunilla, Salar del Huasco, Salar de Coposa y Salar de Minchincha) correspondientes a la mitad sur del Altiplano, y donde los tres grandes proyectos de extracción de cobre extraen el agua necesaria para los respectivos procesos mineros. Casi todas las cuencas poseen estaciones meteorológicas de la DGA (salvo la cuenca “Entre salares Huasco y Coposa”), aunque no todas cuentan con estaciones fluviométricas de la DGA vigentes (Río Cariquima, Salar de Coposa, Salar de Minchincha, Entre salares Huasco y Coposa) y solo una cuenca tiene estaciones piezométricas de la DGA (Salar del Huasco). Muchos estudios se dedicaron a analizar estadísticamente las variables hidrológicas (meteorológicas y fluviométricas) registradas en las estaciones de la DGA. Existen estimaciones del balance hídrico y modelos hidrogeológicos en Lagunilla, Salar del Huasco, Salar de Coposa y Salar de Minchincha.
12. Las conexiones hidrogeológicas (subterráneas) entre cuencas han sido objeto de estudios; si bien las conexiones entre las cuencas altiplánicas (entre las cuencas Lagunilla y Salar del Huasco, entre las cuencas Salar de Minchincha y Salar de Coposa y entre las cuencas Salar de Coposa y Empexa)

han sido bastante bien definidas, la conexión entre el Salar de Huasco y la zona de Pica y del acuífero Pampa del Tamarugal nunca ha sido probada, más bien se estima muy poco probable. La conexión hidrogeológica entre el Salar de Coposa y la Depresión Central ha sido descartada. Aun así, la complejidad de los flujos profundos en el contexto geológico de la región, añadida a la complejidad de evidenciar tales flujos, hace necesario la realización de estudios con el uso de tecnologías más costosas (geofísica, análisis isotópicos) para comprobar tales conexiones.

13. Las cuencas de Lagunilla, Salar de Coposa y Salar de Minchincha tienen un balance hídrico negativo, dado que la descarga por extracciones de agua para el uso minero supera la recarga natural. La cuenca Salar del Huasco presenta un balance hídrico positivo que se interpreta como un caudal potencialmente saliente hacia otras cuencas. Las cuencas al norte de Lagunilla se consideran en estado natural (equilibrio entre descargas y recarga). Es necesario tomar en cuenta que subsisten incertidumbres en la estimación de las variables hidrológicas particularmente de la evaporación y la escorrentía, lo que influye en el cálculo del Balance Hídrico.
14. Las aguas se caracterizan por presentar mayor proporción de Sodio (Na^+) y Sulfato (SO_4^{2-}), particularmente en los sectores de los volcanes de Isluga al norte e Irrupuntucu al sur. En el río Collacagua y en las vertientes Norte y Ermitaño del acuífero Salar del Huasco predominan altos contenidos de Calcio (Ca^{2+}) y Bicarbonato (HCO_3^-). Las aguas termales presentan salinidad y pH variables y altos contenidos de Arsénico (As) y Boro (Br).
15. La zona altiplánica presenta 2,5% del total de DAA subterráneos aprobados de la región (19 DAA) exclusivamente dedicados a uso minero (2.289 l/s otorgado). Por otra parte, en esta zona se localizan el 18% de los DAA superficiales de la región (71 DAA).

Zona Pampa del Tamarugal

16. La información meteorológica, fluviométrica e hidrogeológica de la cuenca Pampa del Tamarugal es muy deficiente en cuanto a la cantidad de información y su repartición espacial: dos subcuencas de un total de ocho (Quebradas de Tarapacá y Quipisca-Juan Morales) registran datos meteorológicos desde más de una década (no obstante en la Quebrada de Aroma se registran datos desde Enero 2012). Sólo una subcuenca registra datos de caudal superficial (Quebrada de Tarapacá). Los estudios se han focalizado sobre el sector de Pica-Matilla y el sector de Puchuldiza (que pertenece a la subcuenca de Aroma) en donde se localiza un campo geotérmico de interés económico. La hidrogeología del acuífero Pampa del Tamarugal ha sido estudiada de una manera más integral por dos estudios JICA-DGA (1995) y DICTUC (2006).

17. La cuenca Pampa del Tamarugal contiene escasos recursos superficiales concentrados en las quebradas afluentes que sostienen una agricultura de subsistencia, y que alcanzan la Depresión Central después de eventos de precipitación en la Precordillera y el Altiplano. La cuantificación de estos caudales es problemática y sujeta a gran incertidumbre por la limitación tecnológica y/o localización de las estaciones fluviométricas. Por otro lado, existe incertidumbre sobre el porcentaje de las precipitaciones que se infiltra, escurre y evapora (la mayoría de los estudios admite un 20% de infiltración de manera general).
18. El acuífero Pampa del Tamarugal contiene recursos subterráneos importantes, los cuales sostienen gran parte del desarrollo socioeconómico de la región. Este acuífero se recarga lateralmente por flujos superficiales que provienen de las precipitaciones que ocurren en la Precordillera y el Altiplano y que circulan preferentemente por las quebradas; y por flujos subterráneos. El agua, una vez infiltrada, circula de manera subterránea por los abanicos aluviales. Los flujos subterráneos, de dirección preferencial este-oeste, se encuentran cortados en el límite oeste de la Pampa del Tamarugal por la barrera impermeable de la Cordillera de la Costa (rocas de edad primaria y secundaria) y cambian de dirección a norte-sur, aunque probablemente una parte de los flujos en la parte norte del acuífero se dirija hacia el norte. En el límite oeste y sur de la Pampa del Tamarugal, el nivel del agua se encuentra a poca profundidad (<10 metros). Este fenómeno da origen a los salares de la Pampa del Tamarugal (Salares de Zapiga, Pintados y Bellavista). En la literatura, se mencionan flujos subterráneos profundos provenientes de las cuencas cerradas altiplánicas aunque este fenómeno nunca fue probado. Elementos estructurales impermeables de dirección norte-sur cortan el flujo este-oeste de la Precordillera y generan vertientes termales (oasis de Pica, Mamiña y Chuzmisa) debido a la circulación del flujo a gran profundidad.
19. La recarga del acuífero Pampa del Tamarugal ha sido estimada por diferentes estudios entorno a los 1.000 l/s. Si bien este resultado genera un consenso general, todavía existen discrepancias en la estimación de los diferentes parámetros que controlan la recarga (debido principalmente a la insuficiencia de datos) y sobre el funcionamiento de la recarga en sí (flujos entrantes, flujo subterráneo profundo) debido a la escasez de estudios en las quebradas afluentes.
20. Se realizaron tres mapas piezométricos del acuífero (1960, 1993 y 2006) más una campaña de medición de niveles en 1982. La comparación de la información muestra un descenso generalizado en la parte norte y central de la Pampa (mayor en Huara y Canchones), más estable en el sur y con ciertos aumentos puntuales. La mayoría de los pozos de la red de monitoreo de la DGA muestran un descenso del nivel estático del acuífero. El descenso máximo medido es de - 4,71m en el pozo Salar de Pintados – Tirana, entre 1988 y 2011. A pesar de este descenso generalizado, se distinguen siete pozos cuyo nivel estático muestra un ascenso, con el máximo registrado en el pozo Chacarilla (+ 12,62 m entre 1992 y 2011). Casi todos los pozos que muestran un ascenso están ubicados en el sector sur y central, preferencialmente en el sector oriental del acuífero Pampa del Tamarugal, en donde efectivamente ocurre la recarga.
21. De acuerdo con las estimaciones, la Quebrada de Tarapacá aporta el mayor caudal al acuífero Pampa del Tamarugal (entorno a 300 l/s) seguido por la Quebrada de Aroma (entre 250 y 300 l/s) y la Quebrada de Chacarilla (en torno a 150 l/s). Las tres subcuencas aportarían alrededor del 80% del caudal de recarga a la Pampa del Tamarugal.
22. Se realizaron varios modelos numéricos del acuífero Pampa del Tamarugal los cuales han contemplado una discretización en capas y secciones diversas, obteniendo resultados de diferente índole respondiendo principalmente a las consideraciones de la modelización. Aun así, no se considera la geología como un factor determinante en las características hidrogeológicas del modelo.
23. Por otro lado, las aguas subterráneas de la Pampa del Tamarugal presentan una gran variabilidad espacial de la salinidad: en los sectores de La Huaica, La Tirana, Canchones y Colonia de Pintados, la salinidad es baja, mientras que en los sectores de Dolores, Negreiros y Cala-Cala la concentración en sales es alta, debido fundamentalmente a los procesos de evaporación de las aguas sulfatadas y cloradas-sódicas que allí se localizan. Asimismo, en el sector norte del salar de Bellavista se encuentran las aguas con la mayor salinidad registrada.
24. La descarga artificial fue estimada en 2.325 l/s en el 2008 (DICTUC) aunque en el 2012, existen 335 DAA subterráneos aprobados en el acuífero Pampa del Tamarugal con un caudal total otorgado de 3800 l/s. El uso principal del recurso es doméstico (empresa sanitaria). Es necesario tener en cuenta que existen altas incertidumbres en la estimación del consumo real.
25. Las descargas naturales del acuífero la constituyen la evaporación, que si bien ha sido medida en varios estudios, sólo lo ha sido de forma puntual; la evapotranspiración de los Tamarugos, sujeto a discrepancias entre los estudios y los flujos salientes al sur (hacia el acuífero Sur Viejo) y oeste (hacia el acuífero La Noria) del acuífero.
26. El balance hídrico del acuífero Pampa del Tamarugal muestra una tendencia a un déficit creciente desde la década de 1980, considerando que en 1960 el acuífero Pampa del Tamarugal se encontraba en estado natural (equilibrio). A

la fecha, no existe una proyección de la evolución de la disponibilidad del recurso hídrico del acuífero.

Zona Llamara - Río Loa

27. La subcuenca Salar de Llamara, igual que la Pampa del Tamarugal, contiene recursos subterráneos con recarga lateral desde la Precordillera a través de las quebradas de Guatacondo, Mani, Mal Paso y otras. La información hidrogeológica sobre el acuífero Salar de Llamara proviene únicamente de los estudios generados en el marco de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) generados para la Compañía Minera SQM, principal usuario del agua del acuífero Salar de Llamara. Por otra parte, la presencia de instalaciones de las Compañías Mineras Quebrada Blanca y Dona Inés de Collahuasi en la parte alta de las quebradas de Mani y Guatacondo, han generado información geológica, hidrológica e hidrogeológica en estas zonas.
28. LA DGA monitorea la pluviometría y el caudal superficial en la parte alta de la Quebrada de Guatacondo. No existe monitoreo hidrogeológico del acuífero Salar de Llamara por parte de la DGA.
29. Los estudios hidrogeológicos del acuífero Salar de Llamara se han realizado en base a datos escasos y muy localizados, tanto de niveles de pozos como de caudal superficial y precipitación. Las incertidumbres en la caracterización hidrológica e hidrogeológica identificadas para la Pampa del Tamarugal se repiten en el caso del Salar de Llamara y se incrementan debido a la poca distribución espacial de los datos.
30. La recarga del acuífero Salar de Llamara ha sido estimada de 550 a 600 l/s. El aporte más importante proviene, según las estimaciones, de las quebradas de Mani y Mal Paso (>200 l/s). La estimación de la recarga y del volumen disponible está sujeto a un grado elevado de incertidumbre debido a la insuficiencia de datos en la mayor parte de la cuenca.
31. A la fecha el balance hídrico del acuífero Salar de Llamara es negativo aunque no exista una cuantificación actualizada disponible. Previo al inicio de las extracciones (2006), el sistema endorreico se encontraba en equilibrio natural (entradas = salidas a largo plazo).
32. Las aguas de la Quebrada de Guatacondo sobrepasan las concentraciones máximas permisibles en Arsénico, Boro y Manganeso.
33. El acuífero Salar de Llamara presenta los valores de salinidad más altos de las Depresión Central de la región de Tarapacá (valores superiores a los más altos del acuífero Pampa del Tamarugal). El agua de los puquios son salmueras; presentan altos contenidos de sales y de iones específicamente los tóxicos (Arsénico, Boro, etc.).

34. En la cuenca Salar de Llamara existen nueve pozos con derechos otorgados, con un total de 260 l/s, de los cuales siete pertenecen a SQM y uno a la minera Septentrión.

Zona de Camiña - Camarones

34. La cuenca de Camiña desemboca al mar y constituye el límite norte de la región de Tarapacá. Esta cuenca ha sido la menos estudiada de la región.
35. Contiene recursos superficiales que sostienen actividades agrícolas, además de recursos subterráneos en los depósitos sedimentarios que conforman la Quebrada de Camiña y el río Camiña. Se registran datos meteorológicos y fluviométricos en la parte alta de la cuenca.
36. El valor medio de precipitación sobre la cuenca varía, según las fuentes, entre 61 y 87 mm/año.
37. Existen 127 DAA superficiales aprobados en la Cuenca de Camiña. Se registran dos pozos de extracción con un caudal total de 3,5 l/s.
38. Las aguas del río Camiña presentan Arsénico (0,60 mg/l) por sobre las normas de consumo humano y riego. La conductividad es adecuada para el consumo humano (900 μ S/cm).

Zona Costera

39. Las cuencas costeras siempre han sido consideradas escasas en recursos hídricos y por ello no han sido objeto de estudios. No obstante, las cuencas costeras albergan recursos hídricos (niebla costera, acuífero de La Noria, presencia de vertientes costeras), que aunque sean escasos ameritan ser caracterizados. De hecho, las cuencas costeras fueron objeto de varios estudios geomorfológicos debido al interés particular que suscita el gran acantilado de la costa y las espectaculares dunas que se forman. La presencia de la estación de Investigaciones Desérticas Alto Patache del Centro del Desierto de Atacama de la Universidad Católica de Chile (EIDAC-PUC) generó numerosos estudios sobre los oasis de niebla.
40. En las cuencas costeras la precipitación es casi nula y la evaporación es del mismo orden de magnitud que en toda la región, con un valor medio anual en Cuya de 2.191 mm/año.
41. La niebla costera genera una cantidad de agua que logra formar los denominados "oasis de niebla" y que ha sido estimada en la estación de Alto Patache en 10 l/m²/día (entre 1997 y 2001) aunque la heterogeneidad espacial y temporal de la niebla es muy alta.
42. No existe información de la calidad del agua en las cuencas costeras de la región de Tarapacá. Sin embargo, en la EIDAC-PUC se recolectan aguas de nieblas costeras cuyos análisis muestran una acidez importante (pH=3,1) que se atribuye a la contaminación por formación de ácido sulfúrico en la atmósfera. Una de las causas posible es la emisión

de estos contaminantes desde industrias y plantas de energía localizadas en el centro y norte del país.

43. Existen 14 DAA subterráneos en la subcuenca Pampas El Carmen y de La Unión, con un caudal total otorgado de 27 l/s, diez de los cuales son pozos ubicados en el acuífero de La Noria (con un caudal total otorgado de 18 l/s).

Este informe genera un diagnóstico completo y preciso del conocimiento y la información existente sobre los recursos hí-

dricos de la Región de Tarapacá. Mejorar el conocimiento y el acceso a la información sobre el agua contribuirá sin duda al uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos de la región de Tarapacá. Además, se espera generar una experiencia que beneficie la gestión integrada de los recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas, orientando futuros trabajos de investigación, además de transferir este conocimiento a todos los usuarios públicos, privados y académicos tanto a nivel regional como nacional.

Iquique, marzo 2013



Elisabeth Lictévout

*Hidrogeóloga – Gestión Integrada de Recursos Hídricos
Dirección Científica*

Capítulo III

Análisis por Zona

El presente capítulo presenta un análisis de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá de acuerdo a cinco zonas hidrográficas (figura 14):

1. Altiplánica
2. Pampa del Tamarugal
3. Llamara-Río Loa
4. Camiña-Camarones
5. Costera

Las zonas corresponden a un conjunto de unidades hidrográficas agrupadas de acuerdo a características geográficas e hidrológicas comunes, que fueron definidas para facilitar el análisis y la presentación de los resultados. Las unidades hidrográficas que integran cada zona (tabla 6) corresponden a las cuencas, subcuencas y sub-subcuencas delimitadas oficialmente por la Dirección General de Aguas (DGA) [120].

El análisis se basa a menudo en delimitaciones de cuencas más recientes [102; 256] por ser más correctas de un punto de vista hidrográfico e hidrológico. Sin embargo, ninguna de estas delimitaciones integra completamente la región y no se ajustan entre ellas. Por lo cual no se utilizaron como base para la presentación del estudio.



Figura 14. Zonas hidrográficas

Tabla 6. Lista de las unidades hidrográficas que integran cada zona según DGA (2000).

ZONA	ID_SC	SUBCUENCA	ID_SSC	SUB-SUBCUENCA
ALTIPLÁNICA	0104	Entre Estero Sencata y río Sacaya	01040	Estero Sencata
			01041	Quebrada Manque
			01042	Río de Cariquina
			01043	Salar Coipasa - limite Bolivia
			01044	Río Sacaya
	0105	Salar del Huasco	01050	Río Collacagua
			01051	Salar del Huasco
	0106	Entre Salares Huasco y Coposa	01060	Quebradas de Carcas y de Napa
0107	Salar de Coposa	01070	Salar de Coposa	
0108	Salar de Michincha	01080	Salar de Michincha	
PAMPA DEL TAMARUGAL	0170	Pampa del Tamarugal	01700	Pampa del Tamarugal
	0171	Quebrada de Soga	01710	Quebrada de Soga
	0172	Quebrada de Aroma	01720	Quebrada de Aroma
	0173	Quebrada de Tarapacá	01730	Quebrada de Paca, del Infiernillo, de Tarapacá, de Linga
	0174	Quebradas de Quipisca	01740	Quebradas de Chipisca y de Choja
	0175	Quebradas Juan Morales, Sagasca y el Tambillo	01750	Quebradas Juan Morales, Sagasca y el Tambillo
	0176	Quebrada de Quisma	01760	Quebrada de Quisma
	0177	Quebrada de Chacarilla	01770	Quebrada de Chacarilla
	0178	Quebrada de Ramada	01780	Quebrada la Ramada
	0179	Quebradas de Cahuisa y de Chipana	01790	Quebradas de Cahuisa y de Chipana
LLAMARA RIO LOA	0210	Río Loa Alto (bajo junta río Salado)	02110	Río Loa Bajo junta estero Chela
	0211	Río Loa Medio (entre Salado y quebrada de Barrera)	02112	Río Loa entre río San Salvador y quebrada Amarga
			02113	Salar de Llamara
0212	Río Loa Bajo (entre quebrada amarga y desembocadura)	02120	Río Loa entre quebrada Amarga y desembocadura	
CAMIÑA - CAMARONES	0150	Río Camarones antes junta quebrada de Chiza	01501	Río Caritaya
			01502	Río Camarones entre estero Veco, río Caritaya y quebrada de Chiza
	0151	Quebrada de Chiza	01510	Quebrada de Chiza
	0152	Río Camarones bajo	01520	Río Camarones entre quebrada de Chiza y desembocadura
	0160	Costeras entre río Camarones y quebrada Camiña	01600	Costeras entre río Camarones y quebrada Camiña
	0161	Quebrada Camiña Baja entre cota 2.000 y bajo quebrada Tiliviche	01610	Quebradas de Camiña y Tiliviche
01611			Quebrada Camiña Baja entre cota 2.000 y bajo quebrada Tiliviche	
COSTERA	0180	Entre quebrada Tiliviche y Pampa Orcoma	01800	Entre quebrada Tiliviche y Pampa Orcoma
	0181	Pampas Orcoma y Perdiz	01810	Pampas Orcoma y Perdiz
	0182	Pampas el Carmen y de la Unión	01820	Pampas el Carmen y de la Unión
	0183	Salar de Soronel y Pampa Blanca	01830	Salar de Soronel y Pampa Blanca
	0184	Pampa de las Zorras y Salar Grande	01840	Pampa de las Zorras y Salar Grande

1. ZONA ALTIPLÁNICA

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. Estudios

Los primeros estudios realizados sobre los recursos hídricos del Altiplano de la I región de Tarapacá (figura 15), datan aproximadamente de los años setenta. Se pueden distinguir tres tipos de estudios:

- Análisis estadísticos de las variables hidrológicas registradas en las estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA) [115; 177; 179; 180; 248; 256; 265].
- Estudios hidrológicos e hidrogeológicos generados por los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) de los proyectos mineros en las cuencas de Lagunilla, Salar de Coposa y Salar de Minchincha.
- Estudios hidrológicos e hidrogeológicos de la cuenca Salar del Huasco, generados por el interés que suscitaron los recursos hídricos superficiales y subterráneos de esta cuenca desde décadas atrás hasta el presente [1; 125; 256; 193; 314].



Figura 15. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona altiplánica según DGA (2000).

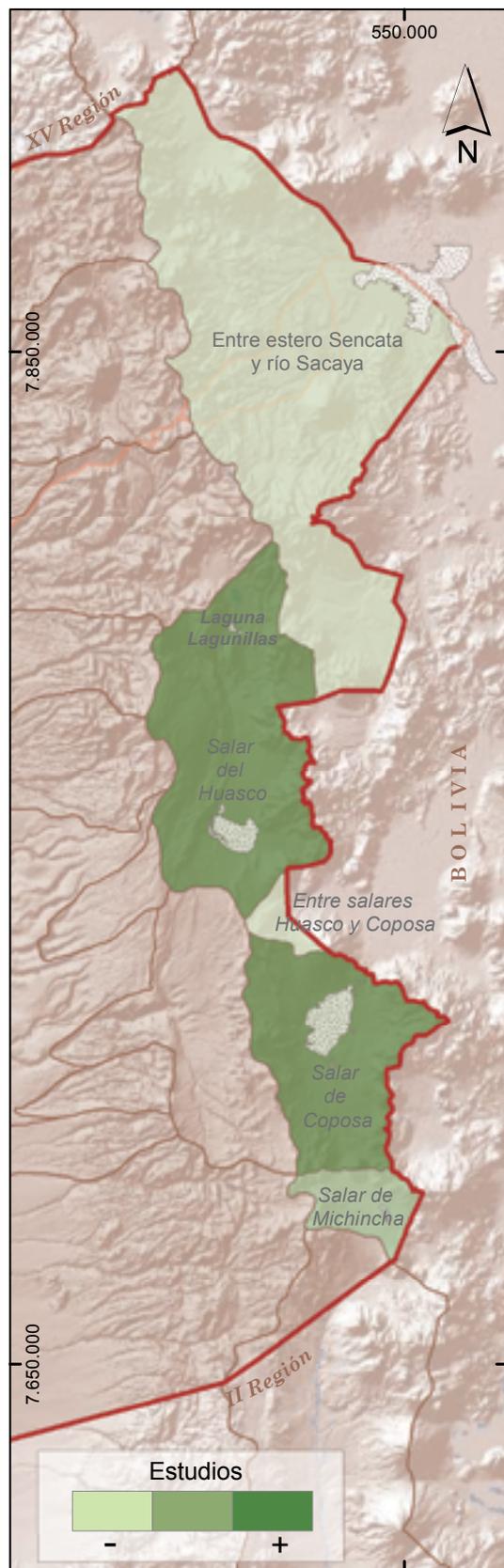


Figura 16. Unidades hidrográficas altiplánicas clasificadas según la cantidad de estudios existentes.

Entre los estudios existentes, se destaca el estudio realizado en el año 2009 por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) y la DGA: "Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Aguas en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III", el cual recopiló y analizó junto a la información generada en el marco del estudio, la información hidrológica e hidrogeológica del Altiplano del norte de Chile.

Se observa una diferencia espacial en la cantidad de estudios por cuencas entre el norte y el sur del Altiplano (figura 16). En la mitad norte del Altiplano (entre el límite administrativo con la XV región y Lagunilla), el único estudio que aporta información hidrológica de las cuencas es el "Balance Hidrológico de Chile" realizado por la DGA en 1987. La mitad sur del Altiplano de la I región (entre Lagunilla y el límite administrativo con la II región) ha sido bien estudiada por la necesidad de abastecer de agua a los procesos productivos de los grandes proyectos de extracción de cobre que se instalaron en los años noventa.

1.1.2. Datos

Redes de monitoreo

Existen diferentes redes de monitoreo pertenecientes a instituciones públicas, privadas y académicas (Capítulo IV). No obstante, los datos utilizados por la gran mayoría de los estudios provienen de los registros de la red de monitoreo de la DGA.

En el marco del presente trabajo, se inventariaron en las cuencas altiplánicas un total de (figura 17):

- 22 estaciones meteorológicas vigentes, de las cuales diez pertenecen a la red de la DGA.
- 11 estaciones fluviométricas vigentes, de las cuales siete pertenecen a la red de la DGA y cuatro a la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC).
- 432 pozos de monitoreo (observación) vigentes, aunque solo dos pertenecen a la red de la DGA (construidos durante el estudio JICA del año 1995 [193] y localizados en la cuenca Salar del Huasco). Más de 400 pozos de monitoreo pertenecen a la Compañía Minera Collahuasi en las cuencas Salar del Huasco, Salar de Coposa y Salar de Minchincha.
- 91 estaciones de calidades de agua vigentes, las cuales competen a la Compañía Minera Cerro Colorado (CMCC), Compañía Minera Quebarada Blanca (CMQB), DGA y CMDIC.

La mayoría de las unidades hidrográficas cuentan con estaciones meteorológicas de la DGA¹, sin embargo no todas cuentan con estaciones fluviométricas DGA vigentes (Río Cariquima², Salar de Coposa, Salar de Minchincha, Entre salares Huasco y Coposa) y solo una cuenca cuenta con estaciones piezométricas de la DGA (Salar del Huasco).

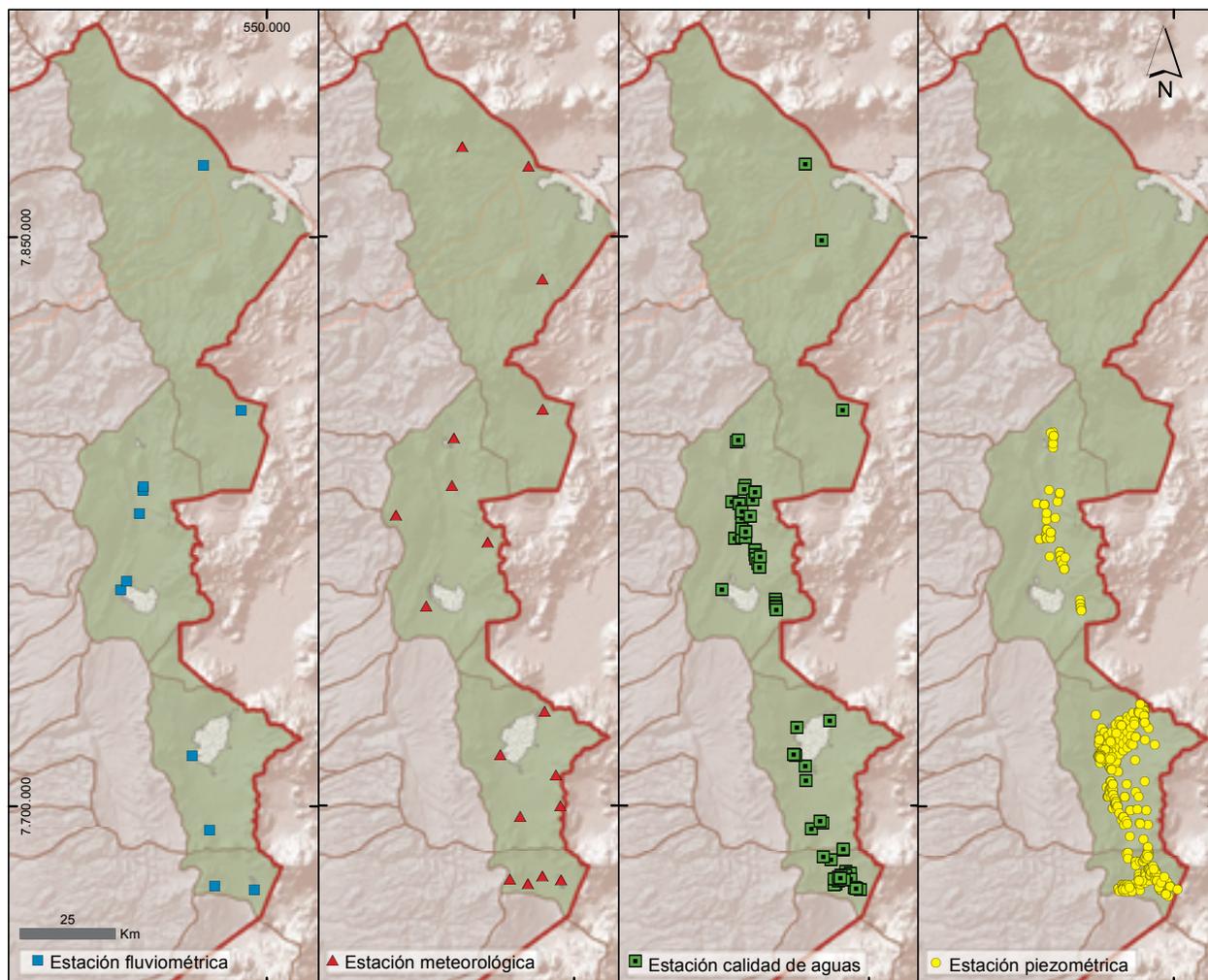


Figura 17. Mapa de estaciones de monitoreo vigentes, de carácter público, privado y académico en la zona altiplánica.

Las estaciones meteorológicas de la DGA, por lo general, solo registran la precipitación salvo las estaciones ubicadas en la cuenca Salar del Huasco, instaladas en el año 2007 en el marco del estudio de la PUC [256]. Estas estaciones registran temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. Las estaciones de la Universidad Arturo Prat (UNAP), CMCC y CMDIC registran mas parámetros tales como evaporación, viento, radiación solar, etc.

Las estaciones fluviométricas y piezométricas recogen los datos de caudal superficial y nivel del agua subterránea respectivamente, considerando en ocasiones la calidad de las aguas en sus registros.

El registro pluviométrico más largo (temporalmente) se encuentra en la estación de Collacagua (desde 1961) y los registros fluviométricos de la DGA se iniciaron en los años ochenta en el río Collacagua excepto un registro del periodo 1959-1995 en la estación no vigente "Piga en Ojos de Agua" (afluente del río Collacagua). Los registros piezométricos en la zona Altiplánica son más recientes (a partir del año 2000).

Campañas de terreno

En algunos estudios se realizaron campañas de terreno para generar datos hidrológicos e hidrogeológicos propios y específicos [1; 193; 271; 256], además de los EIA de las compañías mineras.

¹ Sólo la cuenca "Entre salares Huasco y Coposa" no tiene estación meteorológica de la DGA.

² Según la delimitación PUC, 2009.

1.1.3. Análisis de la información

Análisis estadístico

En varios estudios se realizaron análisis estadísticos de las variables hidrológicas registradas por las estaciones de monitoreo meteorológicas y pluviométricas de la DGA con el objetivo de calcular valores medios anuales de las diferentes variables que permitieron establecer balances hídricos en las zonas de interés [115; 177; 179; 180; 248; 256; 265].

En el "Balance Hidrológico de Chile", DGA (1987) se entregan valores medios de precipitación, evaporación y escorrentía para todas las cuencas altiplánicas. La estimación de la precipitación se realiza en base a pluviómetros y trazado de mapas de Isoyetas; la estimación de la evapotranspiración y/o evaporación se realiza en base a fórmulas teóricas o empíricas. Los valores medios de escorrentía se calculan en base a las mediciones en estaciones pluviométricas. En general, los valores de precipitación estimados son más altos que en otros estudios.

Modelos hidrológicos e hidrogeológicos

La zona altiplánica cuenta con dos modelos hidrológicos realizados en los años 1983 [179] y 2010 [141] (tabla 7). En el estudio "Evaluación de los Recursos de Agua Superficiales de la Provincia de Iquique", realizado en 1983 por Ingeniería y Recursos Hidráulicos (IRH), se procesó el resultado del análisis

estadístico de los datos de precipitación y caudal registrados en las estaciones DGA para generar un modelo probabilístico, con el objetivo de establecer una metodología para estimar los caudales en cauces sin monitoreo. Se generaron curvas de duración y caudales medios en todas las cuencas del área de estudio. Por otro lado, GCF Ing. Ltda. (2010) ha tenido como objetivo principal el desarrollar una metodología que permita la estimación de recargas en cuencas con influencia altiplánica (Altiplano y Precordillera sobre los 1500 m s.n.m.). A partir de un modelo conceptual que representa el mecanismo de recarga de las aguas subterráneas en las cuencas de la zona de interés, se desarrolló un modelo matemático para el cálculo de la recarga. Se ha podido demostrar que la estimación de las recargas en las cuencas con influencia altiplánica del norte de Chile es complejo y la necesidad de realizar estudios más detallados.

Asimismo, se realizaron varios modelos hidrogeológicos en las cuencas de Lagunilla, Salar del Huasco [3], Salar de Coposa [17; 19; 99] y Salar de Minchincha [17; 19].

A continuación, se analizan dos tipos de modelos; 1) un modelo hidrológico probabilístico (estocástico) para la determinación de la recarga en cuencas altiplánicas y precordilleranas del norte de Chile (tabla 7) [141]; y 2) un modelo hidrogeológico (determinístico) del Salar de Coposa (tabla 8) [99]. Las características de estos modelos se exponen a continuación:

Tabla 7. Características del modelo hidrológico probabilístico (estocástico) desarrollado en las cuencas altiplánicas.

FUENTE		GCF Ingenieros Ltda. (2010). <i>Metodología para la Estimación de Recarga de Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica en el Norte De Chile, XV, I, II y III Regiones. SIT N°221.</i> Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas de Chile.			
DESCRIPCIÓN DEL MODELO		Primero se realizó un modelo estocástico multivariado para la estimación de las recargas en el norte de Chile, a partir del análisis de 25 cuencas (de las cuales 6 se encuentran en la región) bajo influencia altiplánica bien distribuidas. Este modelo se ha basado en un modelo conceptual regional. La superficie del modelo se ha discretizado en cuatro zonas de acuerdo a la distribución en las precipitaciones. El objetivo principal consistió en determinar coeficientes experimentales en las zonas estudiadas para determinar la recarga en otras zonas no contempladas en el proceso de modelización. Para llevar a cabo esto, fue necesario determinar el valor de la temperatura, evaporación, caudal de escorrentía superficial de salida, permeabilidad, entre otros en cada una de las cuencas.			
CUENCA	Modelo hidrológico aplicado en 25 cuencas del norte de Chile.	ÁREA MODELIZADA	36.991,3 km ² correspondientes a cuencas ubicadas en la Regiones XV, I, II y III.		
CALIBRACIÓN		Se ha realizado un análisis de sensibilidad respecto a la evaporación, el coeficiente de evaporación y la permeabilidad. Se aplicaron los coeficientes obtenidos en las cuencas estudiadas pero asumiendo desconocido el caudal de escorrentía superficial de salida. Los resultados de dicho procedimiento se contrastaron con los valores medidos, obteniendo un valor de $r^2=0,722$.			
PARÁMETROS					
Kh (m/s)	Kh/Kv	Ss (l/m)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
$3,9 \cdot 10^{-8}$ a $1,0 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	13 – 2904 (Resultado)	Evaporación (Datos de varias estaciones)

Tabla 8. Características del modelo hidrogeológico del salar de Coposa.

FUENTE		DICTUC (2005c). <i>Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar de Coposa</i> . Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO		Modelo numérico (determinístico) realizado en Visual Modflow en estado estacionario y transitorio. El modelo considera como límites una frontera lateral impermeable que impide la circulación del flujo a través de él, a excepción del sector de entrada del flujo subterráneo proveniente desde el sur (cuenca Salar de Michincha) y el sector de descarga subterránea hacia el noreste en dirección al salar de Empexa en Bolivia.				
ACUÍFERO		Salar de Coposa	ÁREA MODELIZADA	880 km ²		
TAMAÑO DE CELDA		50 x 50m – 100 x 200m	Nº CAPAS	3	Nº CELDAS	144.000
CALIBRACIÓN		El valor final de la permeabilidad se obtuvo como resultado del proceso de calibración del modelo en régimen permanente. Este proceso consistió en hacer funcionar el modelo en régimen natural (sin extracciones) bajo condiciones de recarga media y sobre un largo horizonte de tiempo (500 años), reproduciendo los niveles estáticos en 57 de los 83 pozos de observación con los que cuenta el modelo, cuyos registros fueron tomados antes de junio de 1998. El valor de r^2 de esta calibración fue de 0,767. Seguidamente el valor final del coeficiente de almacenamiento, se obtuvo como resultado del proceso de calibración del modelo en régimen no permanente. Este proceso consistió en hacer funcionar el modelo bajo condiciones reales de explotación durante el periodo enero de 1990 – agosto de 2004, es decir, 176 meses de periodo de estrés, comparando los resultados con los niveles históricos en los 83 pozos de observación del modelo.				
PARÁMETROS						
Kh (m/d)	Kv (m/s)	Kh/Kv	Ss (l/m)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
0,118 (1 ^{ra} capa); 0,01-100 (2 ^{da} capa); 0,04-100 (3 ^{ra} capa).	Igual que Kh (1 ^{ra} y 3 ^{ra} capa); 0,04 – 100 (2 ^{da} capa).	1 (1 ^{ra} y 3 ^{ra} capa); 2-10 (2 ^{da} capa)	0,002 en el estrato inferior	Sy: 0,1 – 12 para los 3 estratos	208,6 (recarga superficial inicial), 391,84 (recarga lateral), 200 (recarga subterránea desde Michincha)	Evaporación: 1.814,35 mm/año; afloramientos en vertiente Jachucoposa como límite tipo dren; salida subterránea hacia Empexa: 50 l/s.

En el caso del primer modelo señalado (tabla 7), este se considera como un gran intento por estimar el valor de la recarga en las cuencas con influencia altiplánica, aunque el valor de r^2 no es lo suficientemente bueno para garantizar el éxito de los resultados obtenidos. Para ello, sería pertinente aplicar la metodología seguida en dicho proceso de modelización, pero incluyendo las cuencas no consideradas en la simulación, debido especialmente a la ausencia de un sistema de monitoreo de caudales en las mismas. Es por ello, que se considera necesario la aplicación de una red de monitoreo en dichas cuencas y así reformular dichos coeficientes para la región.

En el modelo hidrogeológico (tabla 8), se resalta que el primer proceso de calibración definió la recarga superficial en 204,1 l/s, mientras que en los otros tipos permanecen constantes. Por otro lado, las descargas del sistema (tales como la evaporación) se ha determinado en 683,4 l/s, el afloramiento en la vertiente Jachucoposa en 61,3 l/s y la descarga subterránea hacia Empexa en 50 l/s. El error de cierre del balance obtenido es de 0,15%. Del segundo proceso de calibración se han alcanzado los mismos valores de Ss y Sy previamente definidos. El error de cierre del balance obtenido es de 3,76%.

Aunque el error de ajuste (tabla 8) tanto en los balances como en el proceso de calibración es bueno, sería aconsejable caracterizar de forma más realista el valor del escurrimiento subterráneo desde el acuífero del salar de Michincha hacia el salar de Coposa. Asimismo, el valor de la recarga lateral, ya que en el primer proceso de calibración se observa que los niveles obtenidos del modelo son sensibles a la recarga superficial, así como a los valores de las descargas, por lo que si se asume esta consideración, se puede estar infra o supra valorando dichos parámetros por asumir desde el inicio valores poco realistas.

1.2 HIDROGRAFÍA

La hidrografía del Altiplano ha sido descrita en varios estudios desde el punto de vista regional, del norte de Chile y nacional [179; 200; 235]. El estudio más reciente [256] incluye una redefinición de las cuencas y una descripción de la hidrografía y de las principales características del relieve. Se delimitaron las divisorias de agua en base a Modelos de Elevación Digital (MED) de 90 x 90 m de resolución del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y otras fuentes de información³.

³ Coberturas digital SIG de la DGA y PUC; Mapa hidrográfico de Chile del IGM 1984; Definición de cuencas DGA (2000); Mapa hidrográfico de Chile, CORFO (1971); Imágenes satelitales, Landsat (1990) e imágenes satelitales Google Earth [256].

La definición y delimitación hidrográfica de las cuencas altiplánicas difiere según las fuentes (figura 18 y *Capítulo IV, Delimitaciones hidrográficas*). La definición oficial de la DGA (2000) delimita cinco cuencas altiplánicas; PUC (2009) define diez cuencas altiplánicas de las cuales algunas se localizan en su totalidad en territorio chileno y otras compartidas entre Chile y Bolivia (seis cuencas de un total de diez son compartidas con Bolivia): Río Todosantos, Río Isluga, Río Cariquima, Quebrada de Umo Kahu, Río Cancosa (de acuerdo a la delimitación DGA (2000), conforman una sola cuenca "Entre estero Sencata y Río Sacaya"), Laguna Lagunillas, Salar del Huasco (que conforman en la delimitación DGA (2000) la cuenca Salar del Huasco), Quebrada Carcas, Salar de Coposa y Salar de Minchincha (figura 18).

Las cuencas se describen hidrográficamente por su área; altura media, máxima y mínima; pendiente media; grado de red hidrográfica⁴. Según PUC (2009), la cuenca Río Cariquima tiene la altura máxima más alta (5.982 m s.n.m.) y la cuenca Río Todos Santos tiene la altura media más alta (4.550 m s.n.m.). La cuenca de mayor extensión es la del Río Cancosa (2.048 km²).

Las cuencas altiplánicas son cuencas hidrográficas cerradas (endorreicas) en las cuales no fluye agua superficial fuera de la cuenca. Por lo general, los escurrimientos principales del Altiplano presentan un régimen permanente, como es el caso de los ríos Isluga, Cariquima, Ocacucho, Sacaya, Cancosa y Collacagua. En las cuencas Salar de Coposa y Salar de Minchincha, los principales cuerpos hídricos superficiales son las lagunas asociadas a los salares además de cursos esporádicos correspondientes a los aportes de la precipitación en las cuencas.

En la región existe un sólo glaciar blanco o de montaña, ubicado en el Cerro Sillajhuay aunque no se incluye en el "Inventario de Glaciares de los Andes Chileno desde los 18° a los 32° de latitud Sur" de la DGA (1986). Lobos (2009) constata la disminución de la superficie del glaciar en un 45% en 20 años (1989-2008). Los glaciares rocosos no han sido objeto de estudio aunque existe una delimitación realizada el año 2011, por el departamento de glaciología de la DGA (*Capítulo IV, Glaciares*).

1.3. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

1.3.1. Hidrogeología

En la mitad norte del Altiplano, de Isluga a Lagunilla, la única fuente de información en materia de hidrogeología es el "Mapa Hidrogeológico de Chile" de IPLA Ltda. (1986). En la mitad sur desde Lagunilla a Minchincha, la necesidad de abastecer con agua a los grandes proyectos mineros llevó a la realización de muchos estudios que tienen el mérito de generar una gran cantidad de datos e información, mejorando el conocimiento hidrológico e hidrogeológico de la parte sur del Altiplano.

Por lo general, las cuencas altiplánicas albergan dos acuíferos principales: un acuífero superior definido por depósitos cuaternarios vinculados a ríos y salares; y un acuífero inferior definido por material volcánico andesítico con permeabilidad secundaria por fracturas. Las cuencas que presentan un río en régimen permanente tienen acuíferos libres a semi-confinados en los depósitos aluviales de los ríos.



Figura 18. Mapa de unidades hidrográficas de la zona altiplánica delimitadas según distintas fuentes.

Los flujos subterráneos entre cuencas altiplánicas (conexiones hidrogeológicas) (figura 19) han sido identificados entre las cuencas de Lagunilla y Salar del Huasco [271]; entre la cuenca Salar de Minchincha y Salar de Coposa [17; 19; 99]; entre la cuenca Salar de Coposa y Salar de Empexa [17; 19; 99]. Las conexiones entre cuencas altiplánicas y la depresión central han sido descritas en varios estudios, particularmente la conexión entre el Salar del Huasco y la Pampa del Tamarugal - Pica [193; 197; 271] aunque se considera no probada hasta la fecha.

Salar del Huasco

Las unidades y características hidrogeológicas del Salar del Huasco están bien definidas. Se distinguen las siguientes unidades acuíferas:

- Un acuífero superior de tipo no confinado definido por depósitos sedimentarios cuaternarios (depósitos recientes y unidad superior de la Formación Collacagua), constituido por arenas y gravas [193; 1; 314], de poca potencia pero cubriendo toda la extensión de la depresión estructural [256].
- Un acuífero intermedio definido por sedimentos terciarios (unidades media e inferior de la Formación Collacagua) [256] con intercalaciones de arcillas, limos y gravas [1; 314].
- Un acuífero inferior definido en el basamento volcánico fracturado (Ignimbrita del Huasco y estratovolcanes de la Formación Sillillica) [1]. La Ignimbrita del Mioceno al oeste de la cuenca se pone en contacto por fallamiento normal con rocas volcánicas del Mioceno superior–Plioceno hacia el este [256].

Existe una heterogeneidad regional de las Ignimbritas del Huasco en su composición, grados de fracturación, estado de oclusión y relleno de las discontinuidades [314]. Las diaclasas más antiguas pueden estar cerradas por presencia de rellenos, lo cual puede significar diferencias de conductividades hidráulicas o existencia de una tectónica importante y reciente [314].

Los flujos subterráneos escurren predominantemente en sentido norte-sur con algunos aportes en sentido noreste-suroeste en el sector de Pampa Sillillica, y este-oeste en Pampa Rinconada, siempre con descarga en el salar. El gradiente hidráulico general es de $3,8 \times 10^{-3}$ con diferencias locales: $2,5 \times 10^{-3}$ desde el sector de Sillillica Norte hasta el salar; aumenta a $5,5 \times 10^{-3}$ entre el Caserío Collacagua y Sillillica Norte; baja a sólo $8,0 \times 10^{-4}$ en la zona de Pampa Rinconada [256].

JICA (1995) define para el acuífero una extensión de 126 km² con un almacenamiento total de 465 Mm³. El espesor varía entre 130 m y 210 m. Las constantes del acuífero se estimaron en $2,60 \times 10^{-3}$ cm/s para la permeabilidad (k) y 0,99 l/s/m

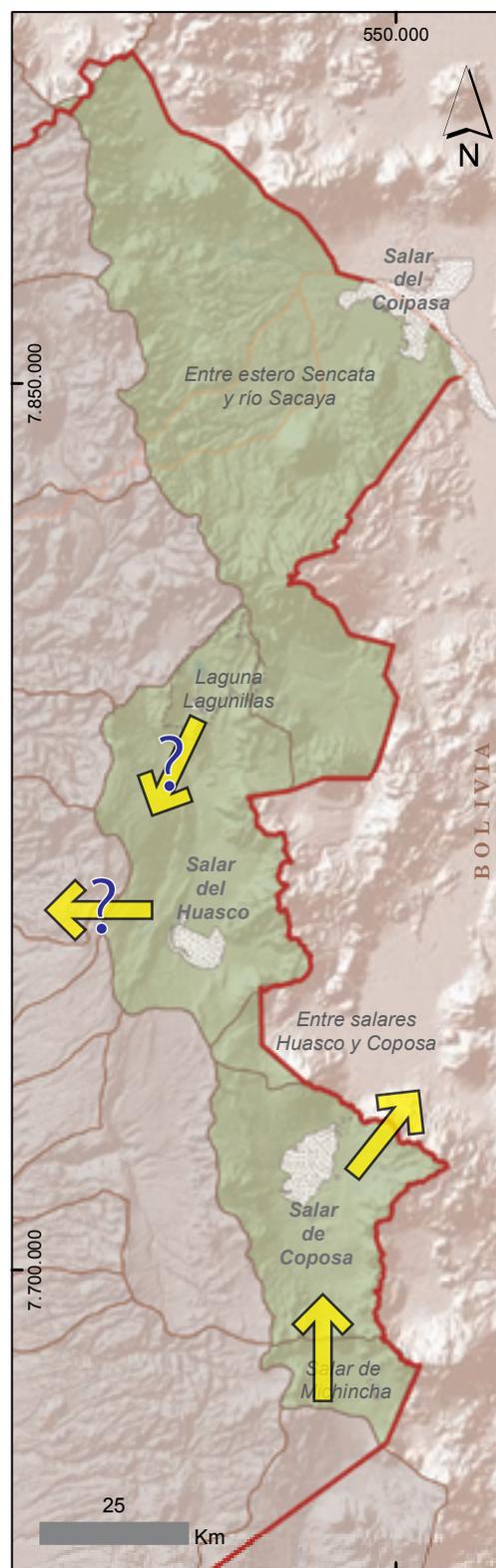


Figura 19. Mapa de conexiones probadas y no probadas (con flechas).

³ Solo una fuente hace mención de este criterio en la región, en la subcuenca de Chacarilla [145].

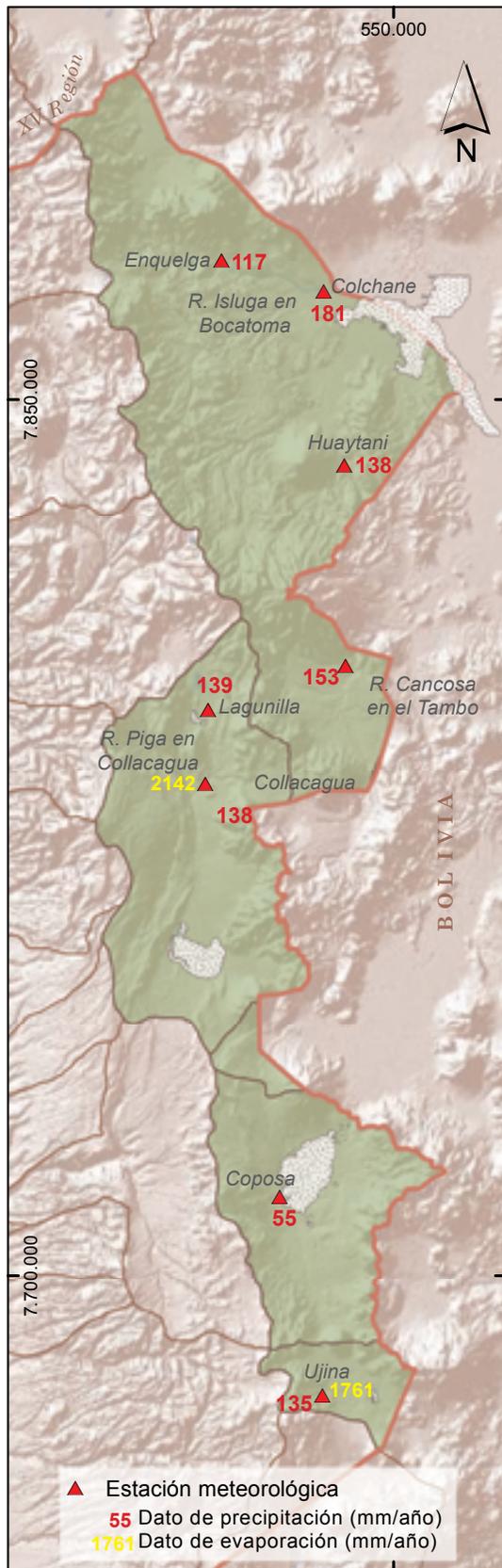


Figura 20. Mapa con valores medios anuales de precipitación (mm/año) y evaporación (mm/año) por estación según PUC (2009) y GSF (2010).

para el rendimiento específico (S_y). Por otro lado, el acuífero inferior se considera probablemente inactivo (agua fósil) [314]. PUC (2009) define valores de k muy dispares según los sectores considerados: Más altos en los sectores Río Batea, Caserío Collacagua, incluso en el sector Pampa Sillillica y en el sector Pampa Rinconada; valores bajos en los sectores Pampa Peña Blanca, Pampa Batea y Sillillica Norte. Los valores del coeficiente de almacenamiento (S) varían entre $8,85 \times 10^{-6}$ (Pampa Rinconada) y $1,06 \times 10^{-3}$ (Pampa Sillillica).

Se realizaron dos mapas piezométricos del acuífero Salar del Huasco en el año 2004 y en el año 2009 [1; 256].

Se ha planteado que la cuenca no es del todo cerrada desde el punto de vista hidrogeológico ya que se presume de una vinculación entre esta cuenca y sus cuencas vecinas: La Pampa del Tamarugal al oeste y Lagunillas al norte. De igual forma no se han probado entradas externas al sistema [256].

Cuenca de Coposa y Minchincha

La hidrogeología de las cuencas de Coposa y Minchincha fue descrita en los estudios llevados a cabo para las Compañías Mineras Doña Inés de Collahuasi y Teck-Quebrada Blanca. Varios de estos estudios corresponden a Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA).

La cuenca de Coposa corresponde a una depresión tectónica que ha sido rellenada por depósitos sedimentarios y volcánicos provenientes de los entornos inmediatos y adyacentes. El modelo hidrogeológico conceptual elaborado por DICTUC (2005c) considera la cuenca como un acuífero de tres capas limitadas por depósitos volcánicos recientes. Los modelos hidrogeológicos de las cuencas de Coposa fueron desarrollados por Arcadis-GP Consultores en los años 1998, 2000 [17] y 2003 [19] (recalibración del modelo del año 2000) y por DICTUC en el año 2005 [99].

Los límites del acuífero de Coposa han sido definidos por DICTUC (2005c) de la siguiente manera: al norte el Volcán Napa (límite impermeable); al noreste el Salar de Empexa (conexión subterránea); al este la cadena volcánica que separa a Coposa de La Laguna en Bolivia; al oeste el afloramiento de la Precordillera (límite impermeable) y al sur el volcán Pabellón del Inca que separa superficialmente la cuenca Salar de Coposa de la cuenca Salar de Michincha (conexión subterránea con la cuenca de Michincha).

En la cuenca Salar de Minchincha se identificaron 4 unidades hidrogeológicas [21]:

- La primera unidad está compuesta por depósitos aluviales no consolidados, piroclásticos y salinos que rellenan parte de la cuenca, los cuales presentan valores de k entre 2 y 12 m/d y una potencia de más de 140 m en el borde noreste de la cuenca. Esta unidad se encuentra saturada sólo en su parte basal.

- La segunda unidad corresponde a las rocas volcánicas más erosionadas del Mioceno (Ignimbrita Ujina). Esta unidad constituye el acuífero de mayor interés, con valores altos de k (entre 1 y 30 m/d). Los valores más altos de k se observan al sureste de la cuenca y los más reducidos al noreste. La tercera unidad está conformada por rocas volcánicas configuradas en estratovolcanes de potencia desconocida y k secundaria. No se ha identificado un acuífero en esta unidad, más allá de la circulación de agua por las fracturas hacia la segunda unidad. La cuarta unidad corresponde al basamento del acuífero (rocas volcánicas del Cretácico Inferior y granodioritas). Estas rocas se comportan como material impermeable [21].

1.3.2 Hidrología

Recarga Precipitación

Las precipitaciones del Altiplano del norte de Chile se caracterizan por su gran variabilidad temporal y espacial. Los eventos tienen poca extensión espacial (cuando una estación registra una cierta tormenta, otra estación relativamente cercana puede quedar fuera de su radio de influencia). Por otra parte, las precipitaciones son anualmente independientes, es decir, el comportamiento estadístico de la precipitación de un año no influye en el año siguiente [256].

Los datos medios anuales por estación de monitoreo muestran valores muy por debajo de los 200 mm/año (figura 20), ca-

racterístico de un clima árido, aunque varias fuentes describen el clima del Altiplano como semiárido [141; 256].

En el norte de Chile, se observa que el 80% de la precipitación anual está concentrada en el período Diciembre – Marzo [256], la cual tiene un carácter convectivo donde el alto contenido de humedad del aire juega un papel importante en el aporte de energía en forma de calor latente [131]. Fuenzalida & Rutilant (1986) describen la estrecha vinculación entre los vientos provenientes del oriente y eventos de precipitación: el aire húmedo proviene de la cuenca Amazónica ingresando al continente transportado por los vientos alisios del hemisferio austral y se desplazan hacia latitudes mayores gracias a circulaciones ciclónicas que se ubican sobre el altiplano o por el costado occidental del anticiclón subtropical del Atlántico. Se generan tormentas, principalmente de corta duración y poca extensión territorial, y ocasionalmente tormentas muy intensas [141]. Las variaciones anuales de precipitaciones son grandes, presentándose series de años muy secos [141; 256].

Los gradientes promedio de precipitación se han estimado en 3,5 mm cada 100 m de altitud entre los 2.000 y 3.000 m s.n.m. y 20 mm por cada 100 m sobre los 3.000 m s.n.m [256]. Se observa que, para estaciones cercanas, el valor del coeficiente de correlación varía entre 0,2 y 1,0 evidenciando una variabilidad espacial del fenómeno [256]. No obstante, Chadwick *et al.* (2012) demuestran que, a nivel local (cuenca del Salar de Coposa) el gradiente es mayor que el gradiente regional para alturas mayores a 3.500 m s.n.m.: 16 mm/año cada 100 m de altura [60]. Este gradiente local de precipitación se calculó en base a una densa red de estaciones meteorológicas de la CMDIC en la cuen-

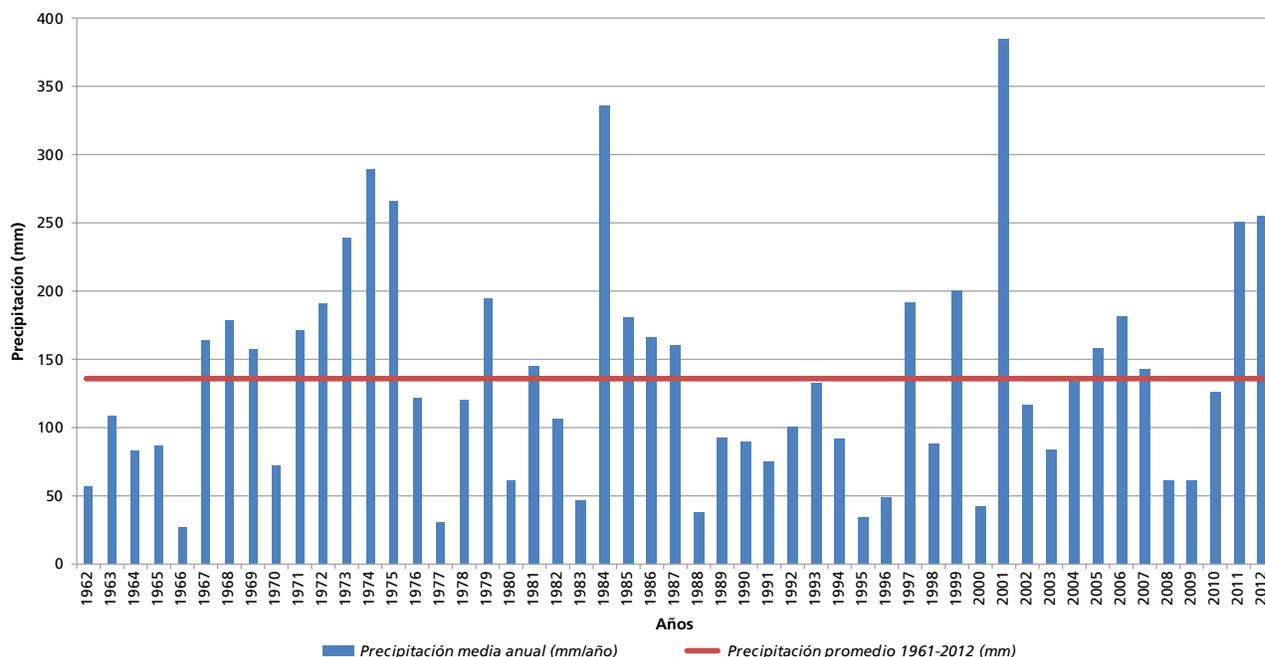


Figura 21.A. Serie cronológica de los registros de precipitación media anual en las estaciones de Collacagua.

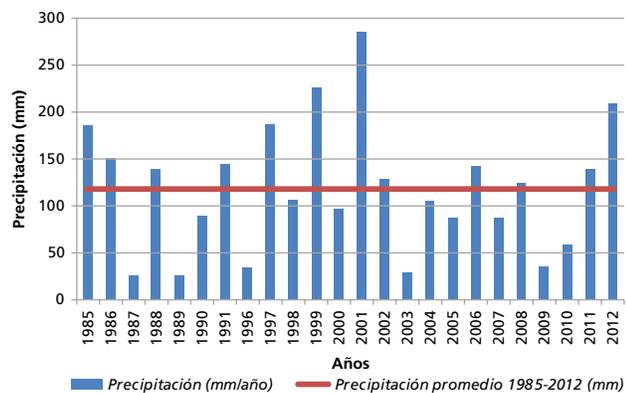


Figura 21.B. Serie cronológica de los registros de precipitación media anual en las estaciones de Enquelga.

ca Salar de Coposa, aunque con registros de corta duración. La diferencia con el gradiente regional puede explicarse por la distorsión causada por el efecto de la latitud [60].

Por otra parte, los valores medios anuales de precipitación no muestran un gradiente con la latitud (figura 20). Dos estaciones ubicadas en las cuencas vecinas del extremo sur de la zona altiplánica en la región muestran valores medios anuales muy dispares (135 mm/año en Ujina y 55 mm/año en la estación de Coposa) [141]. La estación de Enquelga ubicada a pocos kilómetros de la estación de Colchane, en el extremo norte de la región, presenta siempre un valor bajo independientemente de las fuentes [141; 256; 25].

Algunas estaciones muestran discrepancia en los promedios anuales calculados por las diferentes fuentes, como es el caso de las estaciones meteorológicas de Colchane (varía de 137 a 181 mm/año), Coposa (varía de 95 a 134 mm/año) y Ujina (varía

de 135 a 182 mm/año). Otras estaciones muestran valores bastante parecidas como es el caso de Enquelga (≈116 mm/año), Huaytani (≈135 mm/año), Cancosa (≈180 mm/año), Collacagua (≈137 mm/año) y Lagunilla (≈140 mm/año). Más allá de la metodología utilizada, existen diferencias en el periodo tomado en cuenta para el análisis. El estudio ICC-CONIC (1982) que analizó un periodo de datos de 20 años (1961- 1981), siempre obtiene valores medios anuales superiores a los autores posteriores (en Ujina y Cancosa obtiene valores superiores a 200 mm/año). Esto se debe a que las dos décadas 1961-1981 fueron más húmedas que las siguientes, demostrando la complejidad en definir algún patrón espacial (figura 20) y temporal (figuras 21 A y B) de las precipitaciones en el Altiplano de la Región de Tarapacá. La precipitación media anual calculada en estaciones de monitoreo de la DGA por PUC (2009) y ICC-CONIC (1982) dan valores inferiores a las utilizadas en el "Balance Hidrológico de Chile" de 1987 [114] (del orden de 100 mm), salvo para Cancosa.

En las figuras 21 A y B, se pueden observar las series de precipitaciones anuales en estaciones de monitoreo de la DGA ubicadas en la zona altiplánica. Como se mencionó anteriormente, no se distingue ningún patrón temporal de precipitación.

Descarga Evaporación

La evaporación es una variable clave en el balance hídrico de las cuencas altiplánicas (y del norte de Chile en general). Al ser altamente superior a la precipitación, la evaporación rige la condición de zona árida y, añadido a la característica hidrográfica de cuencas cerradas, genera ambientes evaporíticos [271].

En la actualidad, la evaporación sigue siendo unas de las variables más complejas de medir. Errores en su estimación (tanto la sobrestimación como la subestimación) induce sesgos

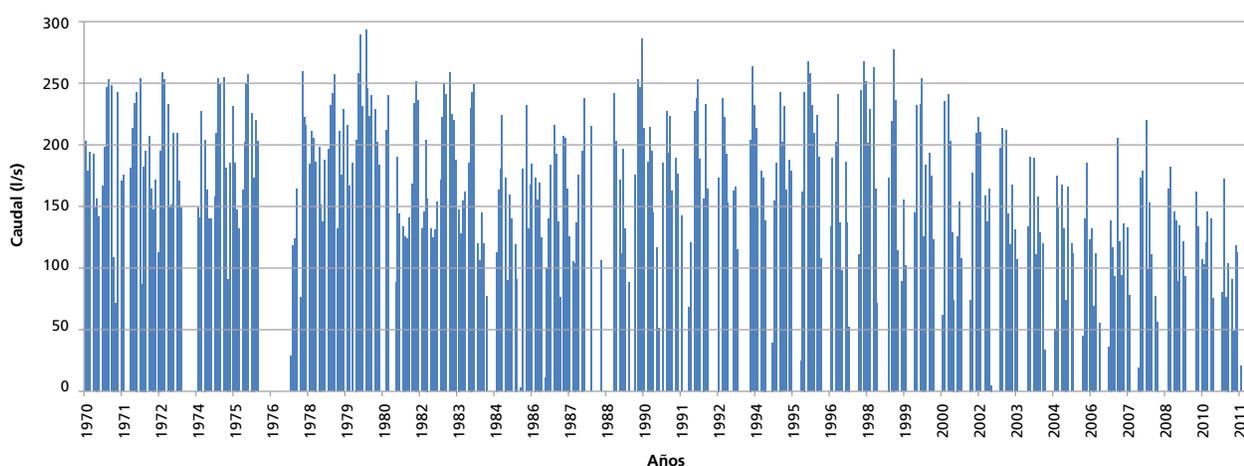


Figura 22. Serie cronológica de evaporación mensual registrada en la estación de Collacagua.

⁵ Limitado en el Altiplano porque el agua del tanque se congela.

⁶ Es necesario aplicar un factor de corrección a los datos de evaporación medidos por tanques evaporimétricos (Linsley et al., 1977), que puede variar entre 0,45 y 0,7 dependiendo de la humedad del aire y de las condiciones de viento (Shuttleworth, 1993).

sistemáticos en la estimación de la recarga subterránea. En el Altiplano, sólo dos estaciones de la DGA miden la evaporación, mediante tanque evaporimétrico⁵. JICA (1995) utiliza un factor de corrección⁶ de 0,75 para estimar la evapotranspiración actual y PUC (2009) utiliza un factor 0,6. Estas estaciones tienen un registro suficientemente largo (> 20 años) que permite calcular un promedio anual (figura 20). La estación de Collacagua muestra valores medios anuales cerca de 2.000 mm/año [141; 256]. Por otro lado, en la estación de Ujina se obtiene un valor más bajo (1.700 mm/año) [256]. Diferentes fuentes evaluaron valores medios por cuenca para calcular el balance hídrico (ver parte *Balance Hídrico*). Ciertas estaciones están equipadas con sensores, aunque existen dudas respecto a la fiabilidad de los registros [163]. La determinación más precisa de los balances hídricos depende de la generación de datos continuos, fiables y representativos de evaporación.

GCF Ing. Ltda. (2010) constata la gran variabilidad interanual de la evaporación, variabilidad corroborada por Clark (2012). Clark (2012) demuestra que utilizar valores medios mensuales de evapotranspiración, versus valores diarios, induce una sobrestimación de la evaporación durante los días de lluvia, días en los cuales se estima que los valores de evaporación son 2 a 3 veces más bajo que los valores medios mensuales. Estos eventos contribuyen además de manera importante a la recarga subterránea. Esto conduce a la subestimación de la recarga, estimada por Clark (2012) en un 55% al utilizar promedios mensuales de evaporación, con un error estimado del 19% del método utilizado.

Se observan discrepancias sobre la relación entre evaporación y altitud. PUC (2009) estimó gradientes para la evaporación media anual: aumento de la evaporación de 200 mm cada 100 m para altitudes menores a 1.100 m s.n.m.; constante para alturas entre los 1.100 y 3.000 m s.n.m.; disminución de 93,3 mm cada 100 m para alturas sobre los 3.000 m s.n.m. Chadwick *et al.* (2012) calculan en base a registros de la DGA (medidas realizadas en tanques evaporimétricos con un factor de 0,6) una disminución de 11 mm/a por cada 100 m de ascenso. Por lo contrario, GCF Ing. Ltda. (2010) constata que no hay relación entre la evaporación y la altura.

De manera más puntual, Salazar *et al.* (2004) analizan los requerimientos hídricos de vegas y bofedales del Altiplano. La estimación preliminar de la demanda evapotranspirativa máxima del bofedal de Isluga es de 0,8 l/s/ha, calculada a partir del valor máximo de la evaporación en la estación Collacagua, 11 mm/día.

En el Salar del Huasco, la evaporación de tanque media anual es de 2.141 mm. Los meses con mayor evaporación son octubre, noviembre y diciembre, alcanzando valores de hasta 240 mm mensuales. Por otra parte, la menor evaporación ocurre en los meses de mayo, junio y julio con valores alrededor de 120 mm [256]. En la figura 22, se puede observar la evaporación

media anual y el valor promedio para un periodo de 20 años en la estación de Collacagua [256].

Escorrentía

Las cuencas altiplánicas presentan ríos con regímenes permanentes, los cuales han sido objetos de interés desde hace varias décadas para suplir la alta demanda hídrica de las comunas de Pica e Iquique.

El caudal promedio en las estaciones ubicadas dentro de las cuencas altiplánicas varía entre 0,05 y 0,5 m³/s [141; 256] (figura 23). En general, los registros de caudal de los escurrimientos

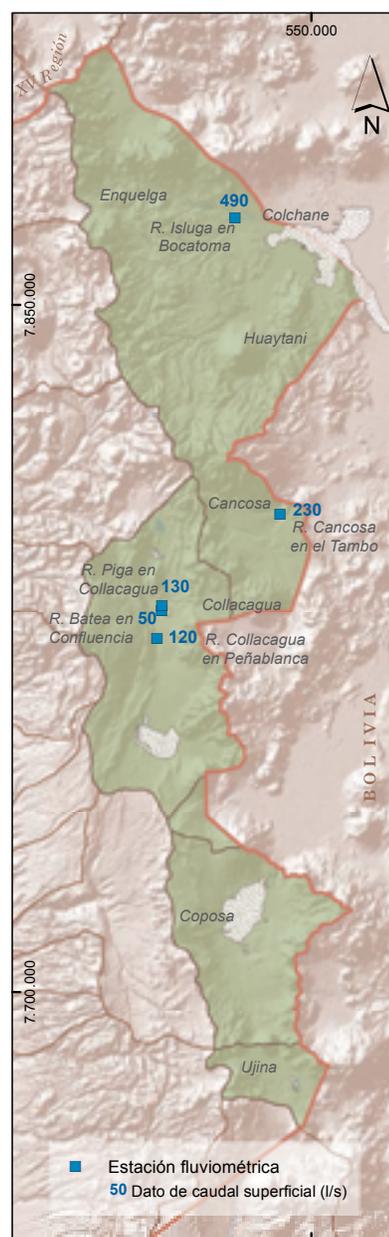


Figura 23. Mapa con valores medios anuales de caudal superficial (l/s) por estación según PUC (2009) y GSF Ing. (2010).

y ríos altiplánicos muestran una gran estabilidad interanual (regulación de sus escurrimientos) con valores similares todos los años [256], hecho que se confirma por el coeficiente de variación (desviación típica sobre el promedio) que varía entre 0,12 y 1,27 al interior de las cuencas altiplánicas [256]. Es el caso del río Piga en Collacagua debido a la presencia de bofedales que se localizan en la parte alta de la cuenca [115]. Sin embargo, algunas series muestran la presencia de crecidas puntuales, como es el caso de la estación de Collacagua cuyos registros de caudal coinciden con las cantidades de precipitación caída (figura 24).

El análisis espacio-temporal de las series anuales de caudales mostró que el comportamiento espacial es más uniforme que el temporal, notándose que los años húmedos tienden a ocurrir simultáneamente en todas las estaciones [256], así como se observa en los años secos. En general, las series de caudales muestran ciclos de escasez bastante marcados y con duraciones superiores a los 10 años [256].

Demanda y usos

En las cuencas altiplánicas, existen 71 Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) superficiales aprobados por la

DGA. La mayoría (66) se ubican en la mitad norte del Altiplano (entre el límite administrativo de la XV región y Lagunilla), no habiendo información sobre el caudal otorgado a estos DAA. **Por otra parte, existen 19 DAA subterráneos aprobados por la DGA, los cuales se ubican en la mitad sur del Altiplano (Lagunilla, Huasco, Coposa y Minchincha) con un caudal global otorgado de 2.289 l/s en total.** Estos DAA corresponden a un pozo de extracción en el Salar del Huasco, 15 en el Salar de Coposa y tres en el Salar de Minchincha.

En el caso de lo DAA superficiales, la base de datos de la DGA indica un uso desconocido aunque se intuye que corresponden a usos ancestrales de riego, pastoreo y consumo humano. Por otra parte, los DAA subterráneos corresponden en su totalidad a usos mineros.

Balances hídricos

Todas las cuencas altiplánicas de la I región son endorreicas (cerradas) hidrográficamente. Por lo cual se considera que, en sus estados naturales, existe un equilibrio dinámico en el cual todo lo que entra (precipita) sale (se evapora) según el balance de masa, considerando una variación insignificante de volumen

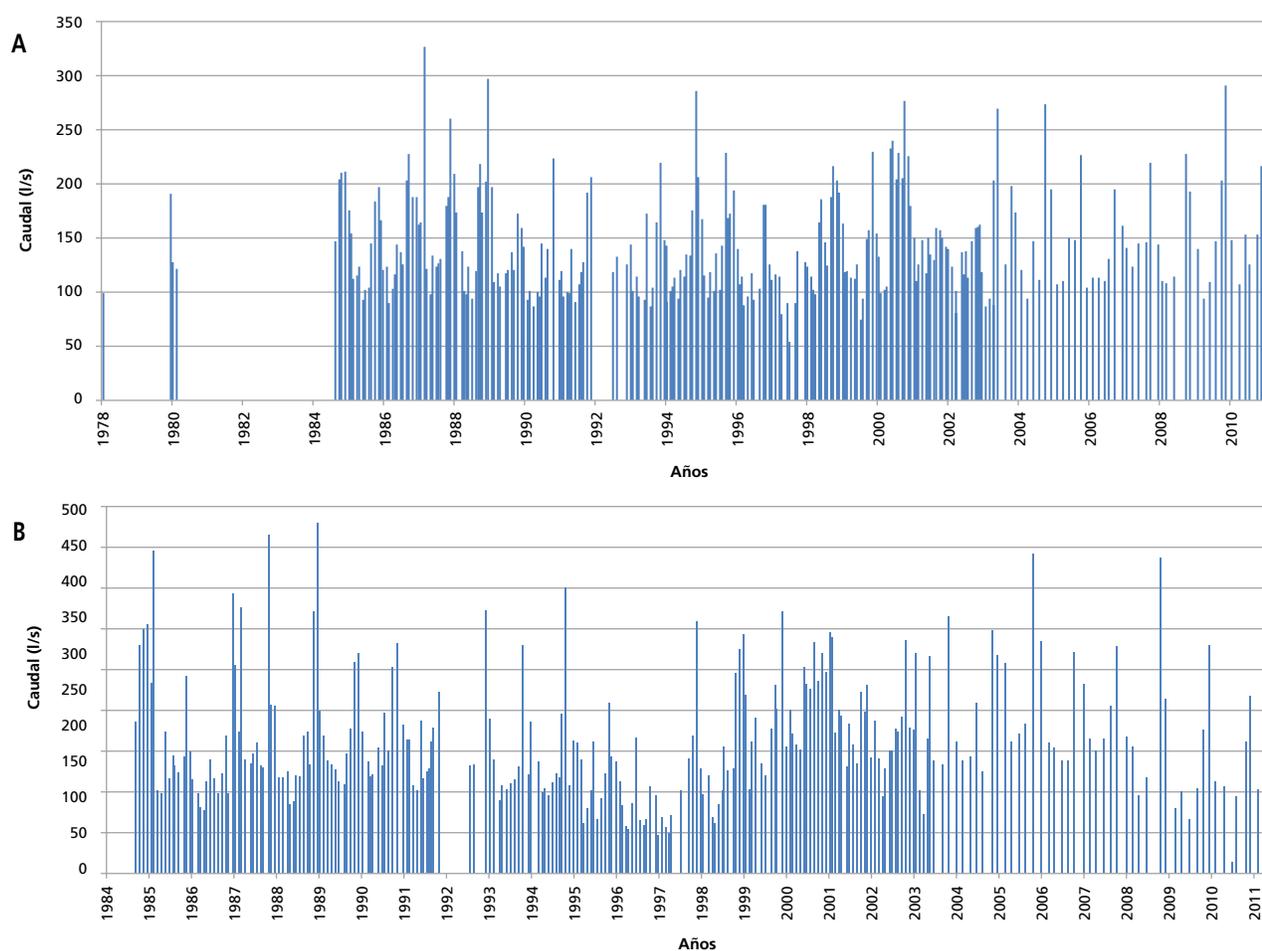


Figura 24. Serie cronológica de caudales registrados en las estaciones de Piga en Collacagua (A) y Collacagua en Peñablanca (B).

El río Piga y el río Collacagua. En 1984, Alamos y Peralta [8] indican un caudal medio anual cercano a los 150 l/s para el río Collacagua, con máximos de 400 l/s y un caudal medio anual de 65 l/s para el río Piga, más constante por su régimen de vertientes (descarga de aguas subterráneas). El estudio concluye en la factibilidad de extraer 100 l/s para su trasvase hacia Pica y así duplicar la superficie de riego de aquella época.

PUC (2009) analiza los caudales registrados en las estaciones Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca, observando que la mayor parte del tiempo el caudal medio anual se mantiene alrededor de 0,1 m³/s con crecidas puntuales (años 1984, 1985, 2000 y 2001). El caudal medio anual máximo registrado en Río Piga en Collacagua es de 0,22 m³/s en el año hidrológico 2000-2001, y en Río Collacagua en Peñablanca de 0,47 m³/s en el año hidrológico 2006-2007. Por otra parte, en la estación Río Batea en Confluencia el registro de caudal medio anual se mantiene alrededor de 0,02 m³/s, sin notarse la presencia de crecidas. La variación del caudal medio a lo largo de los meses del año es poco significativa en las tres estaciones, manteniéndose en valores cercanos a la media anual [256].

de agua a largo plazo. Según GCF Ing. Ltda. (2010), los caudales de recarga dependen directamente de la evaporación real, ya que lo que precipita y no se evapora está potencialmente disponible y se infiltra de acuerdo a la permeabilidad de los suelos [141].

Las relaciones precipitación recarga escorrentía son diferentes (incluso en cuencas cercanas) debido a la dependencia con las condiciones locales de cada cuenca, en especial la geomorfología, capacidad de infiltración y permeabilidad de rellenos entre otras. Una cuenca con predominancia rocosa que presenta escorrentía superficial permanente, puede estar cercana

a otra que posee rellenos más importantes y una escorrentía superficial esporádica. La cuenca más impermeable presentará coeficientes de recarga menores y coeficientes de evaporación mayores. Inversamente, las cuencas con más capacidad de infiltración tendrán coeficientes de recarga mayores y coeficientes de evaporación menores [141].

Entre Estero Sacata y Río Sacaya

Corresponden a las cuencas de Todos Santos, Isluga, Cariquima, Umo Khauo y Cancosa (tabla 9). La única información disponible sobre el balance hídrico de estas cuencas se encuentra en el “Balance Hidrológico de Chile” [114]. Estas subcuencas se consideran en estado natural debido a que solo se registran usos ancestrales del recurso hídrico para fines de riego y consumo humano en diversas comunidades, y se consideran como parte de la condición natural del funcionamiento de las cuencas [141]. Lo anterior implica que, a largo plazo, las entradas por precipitación igualan las salidas por evaporación. No existen otras salidas subterráneas probadas de estos sistemas. Estas subcuencas no exhiben salares, sino bofedales y humedales.

Salar de Huasco y Lagunilla

La subcuenca de Lagunilla es una pequeña cuenca al norte del Salar del Huasco, considerada en algunos casos como cuenca hidrográfica independiente [256]. Risacher *et al.* (1998) estima la precipitación media de esta subcuenca en 150 mm/año y su evaporación potencial en 1.490 mm/año. Es una laguna superficial poco salobre de superficie muy variable. Las aguas de Lagunilla son muy parecidas a las del Salar del Huasco lo que hace probable que las dos cuencas estén conectadas hidrogeológicamente [271].

La cuenca Salar del Huasco posee un sistema acuífero en estado natural: a largo plazo, la recarga por la lluvia, única entrada, se iguala con la descarga por evaporación, única salida probada del sistema [1]. Hargis & Montgomery (1981) describen un equilibrio dinámico, es decir, en el sistema no existen fluctuaciones significativas a largo plazo del volumen embalsado en el acuífero. Toda el agua ingresada a la cuenca se infiltra en el subsuelo para recargar el acuífero en las planicies del Salar del Huasco [193] y evaporarse posteriormente en el recinto del salar [125]. El funcionamiento del salar depende sobre todo del agua superficial que se infiltra durante el periodo de precipitaciones [314]. Sin embargo, JICA (1995) identifica que parte del agua subterránea se descarga hacia la Depresión Intermedia a través de fallas.

Acosta & Custodio (2008) describe que el 80% de los suelos reconocidos son de tex-

Tabla 9. Balance hídrico por sub-subcuencas de la DGA.

	Qda. Manque (Isluga)	Río Cariquima ⁽¹⁾	Río Sacaya (Cancosa)	Estero Sencata (Pampa Parajalla)
Área cuenca (Km ²)	470	1.701	502	301
Precipitación (mm/año)	238	234	190	266
Evaporación (mm/año)	204	204	171	211
Escorrentía (mm/año)	34	31,1	19	55,2

⁽¹⁾ Río Mauque y río Cariquima

Fuente: Balance Hidrológico de Chile (DGA, 1987).

tura gruesa, presentan una baja retención de humedad y una elevada capacidad de infiltración, lo que favorece la recarga por precipitación.

Varios autores (tabla 10) estimaron el balance hídrico de la cuenca Salar del Huasco, llegando a resultados del mismo orden de magnitud y siempre con una discrepancia positiva.

Tabla 10. Balance hídrico de la cuenca Salar del Huasco (por fuente).

	JICA, 1995	Acosta, 2004	PUC, 2009
Recarga media (l/s)	809	1.579,1	1.158,2
Descarga total (l/s)	575	1.200	875,1
Balance (l/s)	234	379	283,6

Hargis & Montgomery (1981) calculan el caudal posible a extraer a partir de una estimación de la tasa de evaporación desde el salar. En el estudio se estima un caudal de 2.400 l/s el cual se considera demasiado alto (33% de la precipitación media anual) por lo que se aconseja más razonable estimar un máximo del 5% del promedio anual de la precipitación para la estimación de las recargas de aguas subterráneas, lo que significaría un valor de recarga de 368 l/s para el Salar del Huasco. JICA (1995) estima el volumen disponible hidrológicamente sostenible en 575 l/s como máximo. Sin embargo, concluye que cualquier extracción de agua subterránea reducirá o secará las áreas de la laguna, lo que puede tener efectos medioambientales adversos (ej. flamencos). Para evitar esta afección, es probable que el ecosistema necesite el caudal medio de escorrentía superficial [314]. Tröger & Gerstner (2004) afirman que el cuerpo sedimentario (Cuaternario) del Salar del Huasco, está alimentado por una cuenca mucho más pequeña que la cuenca determinada por la divisoria de agua superficial la cual no coincide con la cuenca subterránea, por lo que parte de la recarga que se infiltra en la ignimbrita fluye posteriormente subterráneamente hacia la Pampa del Tamarugal. Esta afirmación tiene consecuencias directas sobre la estimación del caudal disponible. No existen resultados concluyentes en contra de la hipótesis planteada por Tröger &

Gerstner (2004); no obstante, PUC (2009) la descarta debido a que las prospecciones geofísicas en la zona indican que existe realmente una conexión entre los sedimentos cuaternarios y la ignimbrita. Según Acosta & Custodio (2008), un caudal de extracción de 200 l/s durante 25 años produciría impactos asumibles, sin perturbaciones significativas en los niveles de agua y en la hidroquímica de las lagunas, ya que la afectación a los manantiales sería mínima y el aporte de agua subterránea al humedal casi no se vería afectado. Este caudal se obtendría fundamentalmente de la recarga inducida desde el río y el almacenamiento en la cuenca media. Por el contrario, Risacher *et al.* (1998) menciona que el 85% del agua proviene del oeste del salar (de composición carbonatada) y 15% del sur (de composición sulfatada). Ligeras modificaciones en esa proporción, como podría ser la interrupción del aporte sulfatado de la vertiente sur del salar (vertiente Huasco-Lipez), podría tener grandes consecuencias sobre la flora y la fauna dejando en evidencia la fragilidad del Salar del Huasco. PUC (2009) obtiene un exceso del 24% respecto del valor de las entradas, pero añade que este porcentaje debe ser minimizado dado la complejidad de la evaluación de la recarga en sí, debido a su gran variación espacial y temporal, llevando a diferencias importantes entre las distintas metodologías empleadas en su estimación.

Salar de Coposa

Similar a otras cuencas altiplánicas, el Salar de Coposa presenta una recarga por precipitación. Por otra parte, se definió la existencia de flujos subterráneos entrantes desde la Laguna y el Salar de Michincha y salientes hacia la cuenca de Empexa.

DICTUC (2005c) demuestra una posibilidad cíclica de la recarga máxima – mínima de 20 años y observa que la variable más determinante en el comportamiento de la recarga es la precipitación efectiva, la cual se define como la diferencia entre la precipitación y la evaporación.

El balance hídrico del Salar de Coposa muestra una discrepancia negativa debido a las extracciones de agua (Tabla 11).

Salar de Michincha

Desde el año 1993 se extrae agua subterránea del acuífero del Salar de Michincha para uso minero [99]. DICTUC (2005c) reporta una diferencia positiva en el balance hídrico del Salar en el año 2005. Teck-Quebrada Blanca reporta en el EIA presentado en el año 2012 [21], que el aumento de las extracciones a partir de 2005 provocó descensos sostenidos repercutiendo en la desecación de las vertientes del Salar de Michincha (Tabla 12) [21].

Tabla 11. Balance hídrico del Salar de Coposa (por fuente).

	GP Consult., 1998	Arcadis, 2001	Arcadis, 2003	DICTUC, 2005	Rengifo <i>et al.</i> , 2012
Recarga (l/s)	749-808	778 ⁽ⁱ⁾	819	800 ⁽ⁱⁱ⁾	600 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Descarga (l/s)	506-865	≈1.400	1.368	1.187	-
Balance (l/s)	+302 /-116	-622	-549	-387	-

ⁱ Recarga subterránea desde Minchincha (entre 156 y 211 l/s).

ⁱⁱ Para los años 1974-2005. Considera el aporte subterráneo desde Minchincha (200 l/s).

ⁱⁱⁱ Solo recarga por precipitación.

Tabla 12. Balance hídrico del Salar de Michinchaca (por fuente).

	GP Consult., 2001	DICTUC, 2005	Rengifo et al., 2012
Recarga (l/s)	351	324	200
Descarga total (l/s)	351	267-277	-
Balance (l/s)	0	47	-

1.4. CALIDAD DEL AGUA

El modelo de circulación del agua subterránea en esta región se explica mediante un modelo que contempla una circulación a través de toda la zona saturada, presentándose en profundidad una mezcla entre las aguas de periodo de residencia considerable con aguas meteóricas, las cuales debido a sus propiedades físicas y químicas se configuran como aguas de interés turístico e industrial [42; 162]. Por otro lado, el agua subterránea en este sector es descargada por vertientes frías (aguas con circulación poco profunda) y por vertientes con temperaturas intermedias y elevadas (50-80 °C). En el análisis hidroquímico de los recursos hídricos de las cuencas altiplánicas, varios autores han reportado para esta zona variaciones importantes en el contenido iónico, el cual puede variar entre 150 y 8.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [39; 40; 217].

En la tabla 13 se resumen los parámetros químicos analizados por la DGA en el año 1978, en la cual se aprecia que los ríos andinos tales como el río Isluga, Ocachuncho, Llacho, Charvinto y Collacagua presentan aguas de excelente calidad con bajos contenidos en Sólidos Totales Disueltos (STD). Asimismo, la clasificación geoquímica por iones dominantes establece que estos

cuerpos de agua están caracterizados por la presencia de Na^+ y SO_4^{2-} , salvo las aguas del río Collacagua en las cuales prevalece el Ca^{2+} y HCO_3^- . Por otro lado, los ríos Cariquima, Cancosa y Sacaya presentan una salinidad elevada en comparación con los anteriores, con valores que oscilan alrededor de los 3.800 mg/l . Cabe resaltar que en todos los ríos de las cuencas altiplánicas las concentraciones de As y B sobrepasan la norma NCh.409.Of84⁷ en particular los ríos Cancosa, Cariquima y Sacaya.

De igual forma, la variabilidad en las aguas de los ríos del Altiplano en cuanto al contenido iónico se refiere expresada por medidas de conductividad, demuestra que estos ríos presentan una composición iónica constante en el tiempo (figura 25 y 26).

El mayor contenido iónico que presentan los ríos Cariquima y Cancosa puede ser atribuida, por una parte a la existencia de grandes extensiones de sales en el Altiplano boliviano (las cuencas de los salares de Uyuni y Coipasa), los cuales son responsables de un aporte de sales mediante el transporte en suspensión en los vientos dominantes (smog salino) para luego ser diluidos en aguas procedentes de las precipitaciones y del deshielo [272]. Por otra parte, se atribuye el origen a la lixiviación de antiguas rocas evaporíticas del lugar [271; 272]. Asimismo, las aguas del río Collacagua presentan escaso contenido en iones disueltos.

Junto con este análisis, se procedió a analizar el conjunto de datos registrados en las estaciones de la red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA. En la tabla 14 se exponen los valores de los parámetros estadísticos para la conductividad, las concentraciones de As, B y Mn en función del tiempo para los ríos andinos (datos registrados en la red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA). A partir de estos datos se procedió a realizar un análisis estadístico, identificando el número de

Tabla 13. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en ríos del Altiplano.

Ríos	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Ph	Iones dominantes ⁽ⁱ⁾		As (mg/l)	B (mg/l)	Fuente
			Cationes	Aniones			
Isluga	1.066	7	$\text{Na}^+ \approx \text{Ca}^{2+} \approx \text{Mg}^{2+}$	SO_4^{2-}	0,033	1,9	DGA, 1978a
Cariquima	3.680	8,15	$\text{Ca}^{2+} \approx \text{Na}^+$	SO_4^{2-}	0,80	21	DGA, 1992
Cancosa	3.775	8,44	Na^+	Cl^-	0,54	14	DGA, 1978a
Sacaya	4.677	8,46	Na^+	Cl^-	0,5	14	DGA, 1978a
Ocachuncho	680	7,97	$\text{Na}^+ \approx \text{Ca}^{2+} \approx \text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^- \approx \text{HCO}_3^-$	0,05	2,1	DGA, 1978a
Llacho	300	8,3	Na^+	HCO_3^-	0,03	0,34	Herrera, 2002
Charvinto	690	7,5	$\text{Ca}^{2+} \approx \text{Na}^+$	SO_4^{2-}	0,06	1,5	Herrera, 2002
Collacagua	900	7,9	$\text{Ca}^{2+} \approx \text{Mg}^{2+}$	HCO_3^-	0,03	0,7	DGA, 1978a

⁽ⁱ⁾ La clasificación geoquímica por iones dominantes se realiza mediante la ponderación de cationes y aniones respectivamente, nombrando los que sobrepasan el 50% o nombrando según proporción en caso contrario. En el caso de ser similares se utiliza el símbolo "≈".

⁷ Norma oficial chilena de Agua Potable (vigente).

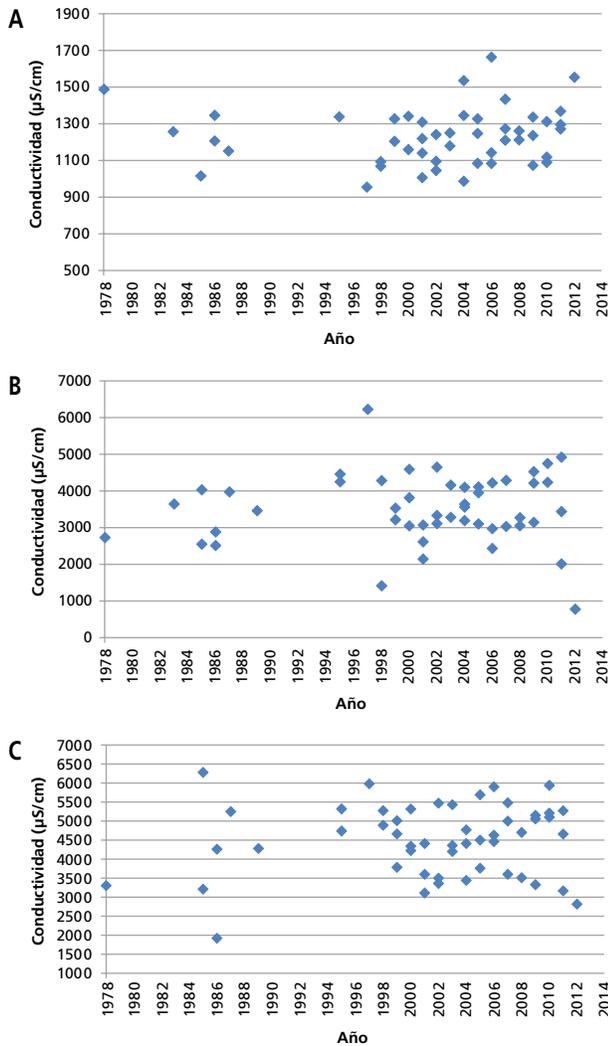
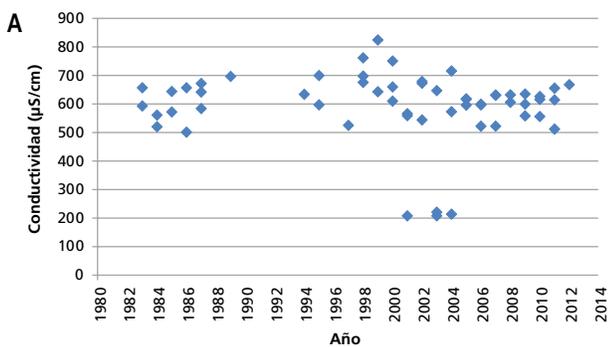


Figura 25. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica en aguas del río Isluga (A), río Cariquima (B) y río Cancosa (C).

datos inicialmente y los valores a descartar de acuerdo a varios criterios. Posteriormente se realizó un reporte de valores mínimos (MIN), máximos (MAX), desviación estándar (σ) y medias (\bar{x}) para cada estación de la red de monitoreo de la DGA.



De este análisis, se determinaron diversas zonas de riesgo para el consumo humano causado principalmente por las elevadas concentraciones de As en el río Cariquima (1,7 mg/l), río Cancosa (0,5 mg/l), río Isluga (0,1 mg/l) y río Collacagua (0,09 mg/l).

Con toda esta información disponible, se realizaron los respectivos diagramas de Piper (figuras 28 y 29) para apreciar la composición iónica de las aguas de esta zona de la región. Para facilitar su interpretación, se ha subdividido el sector en dos regiones: Altiplano norte y Altiplano sur (figura 27).

En estas figuras se aprecian varios tipos de aguas. Las aguas dominantes se caracterizan por presentar grandes cantidades de Na^+ y SO_4^{2-} del tipo $\text{Na}^+ / \text{SO}_4^{2-}$ en sectores de los volcanes de Isluga por el norte y Irrupuntucu por el sur. Los altos contenidos de Ca^{2+} y HCO_3^- del tipo $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$ en el río Collacagua [124; 193] y en las vertientes norte y Ermitaño del acuífero del salar del Huasco revelan un origen de aguas de deshielo de nieves [166].

Por otro lado, los cuatro salares de esta ecoregión alto Andina presentan vertientes que recargan los sistemas lagunares poco profundos del sector, los cuales presentan salinidad y tamaño variable. La tabla 15 recoge los valores resultantes de la información analizada sobre la calidad hidroquímica de los salares. En esta tabla se detallan las concentraciones de iones disueltos, el pH y las concentraciones de As y B.

El análisis de la calidad de las aguas de las vertientes representan el estado de las aguas en el acuífero, como ocurre en el sistema de Pampa Lagunilla donde se exhiben aguas muy diluidas con poca evidencia de mineralizaciones de rocas sedimentarias a pesar de que el SO_4^{2-} se presenta como anión dominante, y el Ca^{2+} y Na^+ como cationes principales, evidenciando que están circulando por terrenos volcánicos y en zonas con actividad geotérmica. Por otro lado, las vertientes de Michincha, Huasco y Lagunilla son de excelente calidad con un bajo contenido en iones disueltos, mientras que en la vertiente del Salar de Coposa sus altos valores de STD demuestran disolución de halita [272].

En la figura 29 se representa la calidad geoquímica de las aguas de las vertientes y de las lagunas de los salares. En esta figura se establecen varias diferencias importantes en los cuatro

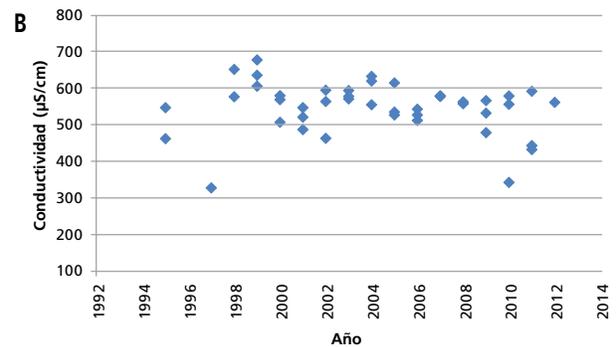


Figura 26. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica en aguas del río Collacagua en Peñablanca (A) y río Piga (B).

Tabla 14. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos en estaciones de monitoreo de calidad de agua de la DGA en ríos andinos.

Estación de monitoreo de la DGA	Item	CE ($\mu\text{S/cm}$)	B (mg/l)	As (mg/l)	Mn (mg/l)
Río Cariquima en Cariquima	Año Inicio	1978	1978	1978	1997
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	N	50	44	49	40
	MIN	1.429	8,25	0,4	0,01
	MAX	6.250	22	1,7	0,68
	\bar{x}	3.565	8,13	1,7	0,23
	σ	873	3,51	0,3	0,18
	Datos Elim	2	2	4	0
Río Isluga	Año Inicio	1978	1978	1978	1997
	Año Final	2010	2010	2010	2010
	N	49	43	48	42
	MIN	958	1	0,04	0,01
	MAX	1.668	5,2	0,21	0,15
	\bar{x}	1.225	2,1	0,1	0,06
	σ	153	1,06	0,03	0,04
	Datos Elim.	2	1	3	0
Río Cancosa	Año Inicio	1978	1978	1978	1997
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	N	52	46	51	43
	MIN	1.950	6	0,05	0,01
	MAX	6.010	27	1,05	1,64
	\bar{x}	4.521	18,1	0,54	0,26
	σ	941	4,79	0,23	0,36
	Datos. Elim.	1	2	1	0
Río Piga en Collacagua	Año Inicio	1995	1995	1995	1997
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	N	45	38	44	43
	MIN	330	0,6	0,01	0,01
	MAX	681	1,9	0,35	0,4
	\bar{x}	550	1	0,07	0,07
	σ	71	0,16	0,05	0,07
	Datos Elim.	1	0	0	0
Río Collacagua en Peñablanca	Año Inicio	1983	1983	1983	1994
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	N	57	50	55	43
	MIN	210	0,7	0,01	0,01
	MAX	828	2	0,46	0,89
	\bar{x}	596	1,1	0,1	0,14
	σ	123	0,32	0,08	0,18
	Datos Elim.	0	0	0	0



Figura 27. Delimitación de sectores Altiplano Norte y Altiplano Sur.

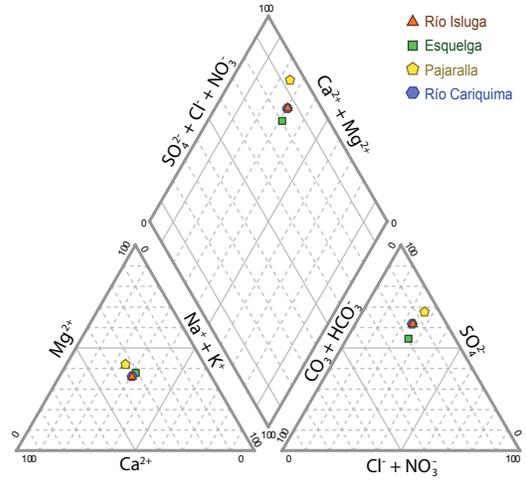


Figura 28. Diagrama de Piper para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales en el sector norte del Altiplano.

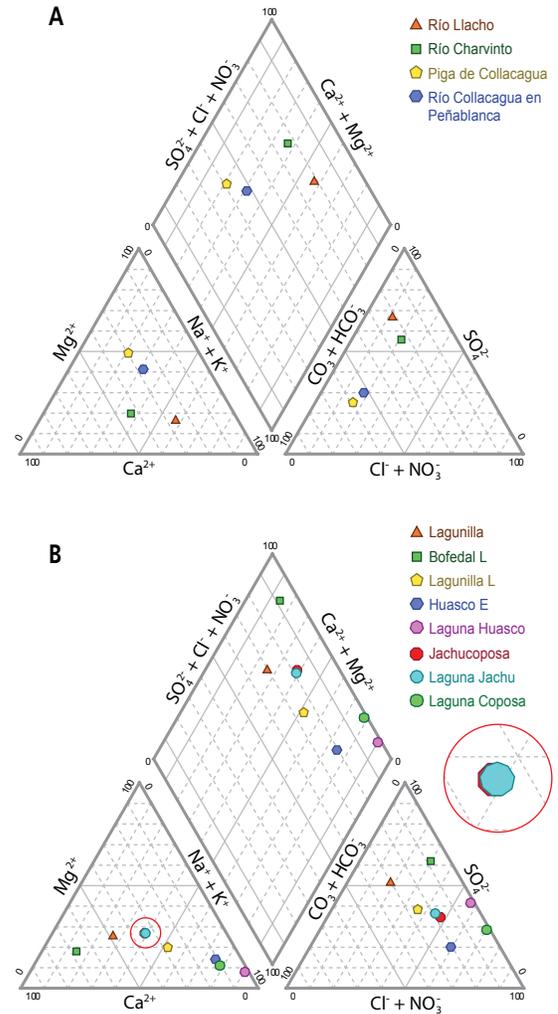


Figura 29. Diagrama de Piper para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales en el sector sur del Altiplano (ríos (A), lagunas (B)).

Tabla 15. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y las concentraciones de As y B en las vertientes y los salares del Altiplano.

Cuencas Salares	STD (mg/l)	pH	Iones dominantes		As (mg/l)	B (mg/l)	Fuente
			Cationes	Aniones			
Vertientes							
Vertiente Michincha	100	6,9	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	0,001	0,2	Risacher <i>et al.</i> , 2003
Vertiente Coposa	905	6,5	Na ⁺	HCO ₃ ⁻ ≈ SO ₄ ²⁻ ≈ Cl ⁻	0,03	1,5	Carrasco <i>et al.</i> , 2003
Vertiente Huasco	500	8	Na ⁺ ≈ Ca ²⁺ ≈ Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	0,03	1,2	Carrasco <i>et al.</i> , 2003
Vertiente Lagunilla	250	8,1	Na ⁺ ≈ Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	0,001	0,5	Carrasco <i>et al.</i> , 1993
Lagunas							
Laguna Michincha	2630	8,3	Mg ²⁺ > Na ⁺ ≈ Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	0,31	5,3	Risacher <i>et al.</i> , 2003
Laguna Coposa	112000	7,8	Na ⁺	Cl ⁻	16	101	Carrasco <i>et al.</i> , 2003
Laguna Huasco	100000	8,9	Na ⁺	Cl ⁻ > SO ₄ ²⁻	40	200	Ramírez, 2006; 2007
Laguna Lagunilla	1500-50000	8,5	Na ⁺	SO ₄ ²⁻ ≈ Cl ⁻	0,03-1	1-5	Carrasco <i>et al.</i> , 1993

acuíferos de la zona: en el Bofedal Lagunilla las aguas son de tipo Na⁺/SO₄²⁻ al igual que en el río Charvinto y la laguna de Lagunilla. En el caso del acuífero del Salar del Huasco, la geoquímica evidencia aguas del tipo Na⁺ – Ca²⁺ / HCO₃⁻, similares al río Collacagua (con bajos contenidos de iones disueltos, lo que demuestra el aporte de rocas volcánicas sin mineralización de sulfatos). Por otro lado, las aguas de la vertiente Jachucoposa del Salar de Coposa son equitativas en todos los iones mayoritarios, lo que demuestra una mezcla de diferentes aportes al acuífero (Herrera *et al.*, 2002). Asimismo, las aguas evaporadas evolucionan a concentrarse en Na⁺, Cl⁻ y SO₄²⁻.

De igual forma, las aguas del acuífero del sistema lacustre del Salar del Huasco se caracterizan por presentar aguas diluidas de buena calidad, lo que evidencia su procedencia de aguas meteóricas por el dominio de HCO₃⁻. La calidad de estas aguas se relaciona con la determinada en el río Collacagua.

Por otro lado, las lagunas permanentes presentan composición iónica variable, aunque en todos los casos las aguas son del tipo sódicas-sulfatadas-cloruradas. Estas lagunas presentan a su

vez una cantidad apreciable de sustancias disueltas y en suspensión. En cuanto a los contenidos en As y B se refiere, estos crecen con el aumento de la salinidad (ocurridos en periodos de evaporación – disolución) de acuerdo a lo evidenciado en varios estudios [272; 313; 325; 169].

En el caso de las aguas termales, la tabla 16 detalla aquellas fuentes que presentan salinidad variable. En el caso de las aguas de Parajalla, Enquelga y Lirima, éstas se clasifican como aguas dulces (1.300 mg/l de STD) mientras que las de Cancosa y Irruputuncu se clasifican como aguas salinas (6.500 mg/l de STD).

De esta tabla se aprecia que la mayoría de estas aguas termales presentan un pH neutro, salvo las de la vertiente termal Irruputuncu 1, la cual presenta un pH ácido (pH = 2,7). De igual forma, el Na⁺ y el SO₄²⁻ se presentan como iones mayoritarios en todas las termas de esta unidad, aunque en el caso de vertientes ácidas las concentraciones de Mg²⁺ son dominantes [162; 271]. Asimismo las concentraciones de As y B son altas. Las concentraciones de Li y SiO₂ se aprecian en la figura 30.

Tabla 16. Valores de temperatura, salinidad, acidez, clasificación geoquímica y concentraciones de As y B en aguas termales del Altiplano [162].

Termas	STD (mg/l)	Temperatura (°C)	pH	Iones dominantes		As (mg/l)	B (mg/l)
				Cationes	Aniones		
Parajalla	1266	23-45	7,9	Ca ²⁺ ≈ Na ⁺ ≈ Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	0,28	1,5
Enquelga	1700	31-40	7,2	Na ⁺ ≈ Ca ²⁺ ≈ Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻ ≈ HCO ₃ ⁻	0,25	3,9
Lirima	1196	40-73	7,6	Na ⁺	Cl ⁻ ≈ SO ₄ ²⁻	0,46	10
Cancosa	5676	35-40	6,5	Na ⁺	Cl ⁻ ≈ SO ₄ ²⁻ ≈ HCO ₃ ⁻	0,93	30
Irruputuncu 1	6700	55	2,7	Na ⁺ ≈ Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	0,26	23
Irruputuncu 2	-	55	8,1	-	-	0,14	1,7

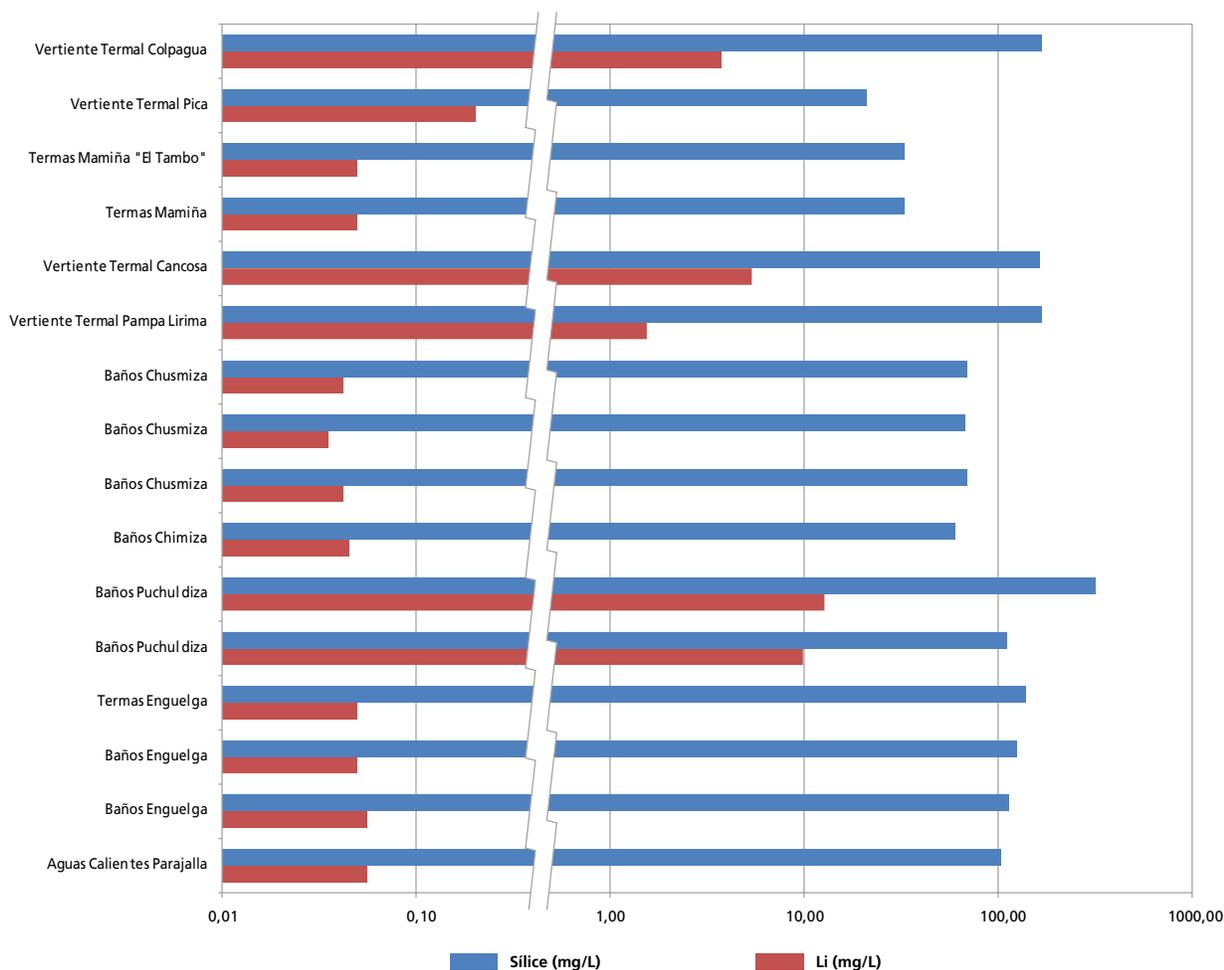


Figura 30. Concentración de sílice y litio en vertientes termales de Tarapacá

1.5. CONCLUSIÓN

Los recursos hídricos de las cuencas altiplánicas solo se han estudiado en la mitad sur del Altiplano, desde Lagunilla hasta el Salar de Michincha.

Las cuencas altiplánicas albergan ecosistemas frágiles. En sus estados naturales, presentan un equilibrio entre los diferentes compartimentos hidrológicos (superficial – subterránea) y los ecosistemas (fauna – vegetación). Esta característica tiene consecuencias directas sobre las posibilidades de aprovechamiento de los recursos hídricos de las cuencas altiplánicas, ya que un

aumento de la descarga afectaría directamente el equilibrio natural del sistema.

Las cuencas Lagunilla, Salar de Coposa y Salar de Michincha tienen un balance hídrico negativo, dado que la descarga supera la recarga. Esto se debe a las extracciones de agua existentes en estas cuencas para uso minero. Las cuencas al norte de Lagunilla se consideran en estado natural (equilibrio entre las descargas y la recarga).

Finalmente, hasta la fecha existen muchas incertidumbres en la estimación de las variables hidrológicas.

2. ZONA PAMPA DEL TAMARUGAL

2.1. INTRODUCCIÓN

2.1.1. Estudios

La cuenca Pampa del Tamarugal (figura 31) presenta el mayor número de estudios de la Región de Tarapacá, referidos especialmente al acuífero Pampa del Tamarugal y a la subcuenca de Pica en donde se encuentra otro de los acuíferos más importantes de la región (figura 32). El estudio más integral es “El Estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile”, realizado en el año 1995 por Pacific Consultant

International y financiado por la Japan International Cooperation Agency (JICA) para la DGA.

2.1.2. Datos

Red de monitoreo

Los datos utilizados por la gran mayoría de los estudios se generan en las estaciones de la red de monitoreo hidrometeo-

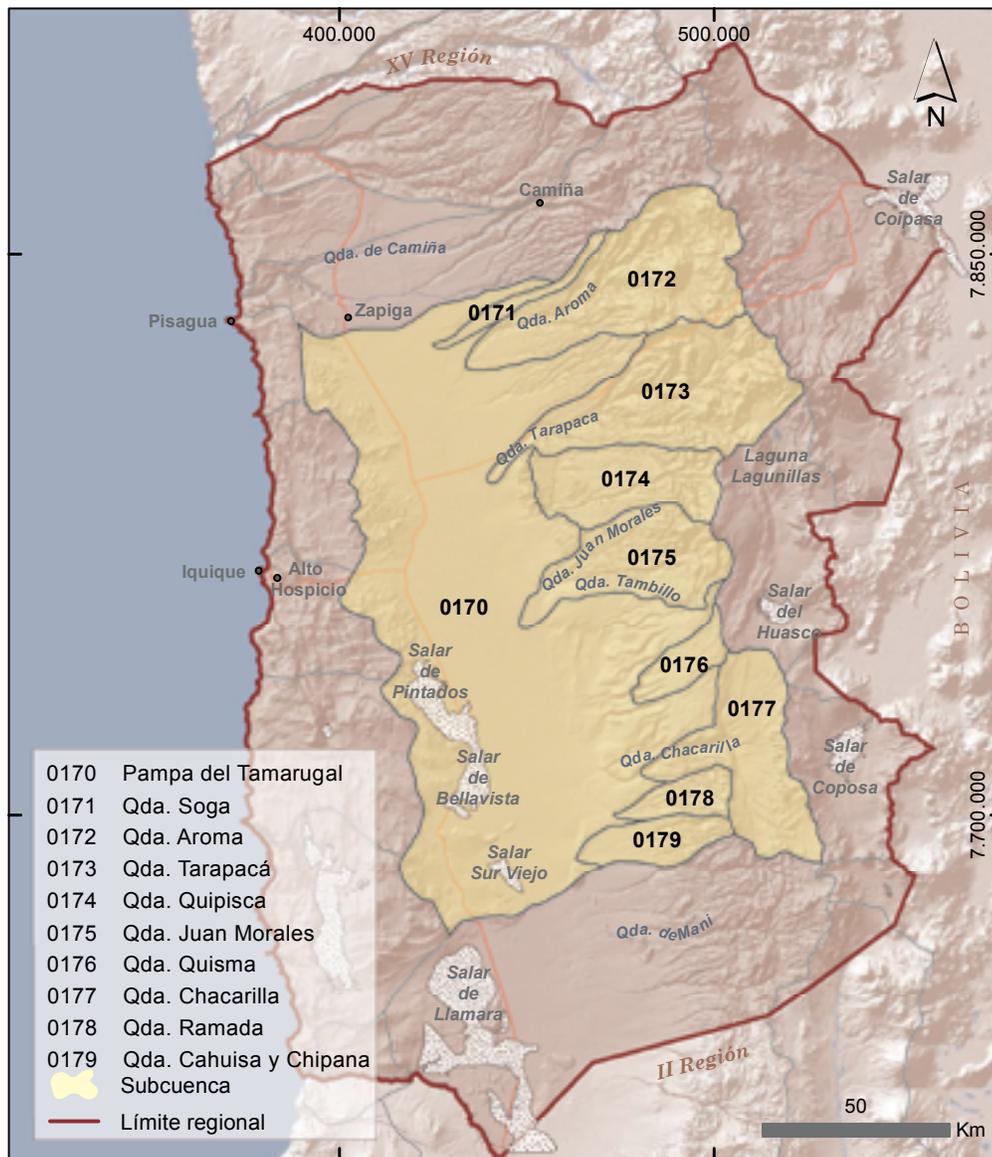


Figura 31. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona de la Pampa del Tamarugal según DGA (2000).

rológica de la DGA. En la cuenca Pampa del Tamarugal, existe un total de (figura 33):

- 21 estaciones meteorológicas vigentes, de las cuales siete pertenecen a la DGA.
- Cinco estaciones fluviométricas vigentes, de las cuales tres pertenecen a la DGA y dos a la CMCC.
- 69 pozos de monitoreo (observación) vigentes, aunque solo 37 pertenecen a la DGA. Los otros pertenecen a las empresas Aguas del Altiplano, Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Haldeman Mining Company (HMC) y CCMC.
- 56 estaciones de calidades de agua vigentes pertenecientes a la DGA, CMCC, SQM y HMC.

La estación meteorológica que presenta el registro más largo es la estación de Poroma (quebrada de Tarapacá), ya que es vigente desde el año 1986 (26 años). Las estaciones de la DGA

solo registran la precipitación salvo la estación de la DGA operada por la CMCC que registra la evaporación y el viento.

La estación fluviométrica con el registro más largo es la estación de Puchurca (quebrada de Tarapacá), con 74 años de registro del caudal (1928-2002). Las otras estaciones vigentes tienen aproximadamente 26 años de registro.

Entre los años 1981 y 1985, la DGA inicia la medición continua de niveles de agua en 30 pozos de monitoreo. En 1987, a raíz del análisis crítico de la red de medición de niveles de agua [9], se propone mantener 20 pozos y añadir 31 más (total 51 pozos) para el acuífero de la Pampa del Tamarugal.

En la actualidad, la DGA mide trimestralmente de forma manual el nivel estático de 37 pozos de monitoreo. Además, la DGA está en proceso de instalar sensores para la medición de niveles en continuo (siete sensores instalados a la fecha del informe en algunos pozos JICA).

Campañas de terreno

Los estudios que han generado datos mediante campañas de terreno son numerosos en la Pampa del Tamarugal. Se destacan los estudios de Bruggen (1918); Bruggen (1932); Taylor (1947); Castillo (1960); Dingman & Gally (1965); Karzulovic et al. (1979); Alamos & Peralta (1984); Grilli et al. (1986); DICUC (1988); Margaritz et al. (1990); JICA (1995); Aravena (1995); Salazar et al. (1998); Aravena et al. (1999); Risacher et al. (1998); Houston (2001); Rojas (2005); DICTUC (1998); DICTUC (1999); DICTUC (2004); DICTUC (2005a); DICTUC (2006); DICTUC (2007); DICTUC (2008a); Rojas et al. (2010).

2.1.3. Análisis de la información

Modelos hidrológicos e hidrogeológicos

Los modelos desarrollados en la cuenca Pampa del Tamarugal son diversos, en su gran mayoría corresponden a modelos hidrogeológicos del acuífero Pampa del Tamarugal [88; 105; 193; 273; 276; 96] y del acuífero Sur Viejo [96; 105], y en menor medida a modelos de estimación de la evaporación en salares [155] y de la recarga hacia el acuífero Pampa del Tamarugal [105]. El amplio desarrollo de modelos, se debe especialmente al gran interés que tiene el acuífero Pampa del Tamarugal debido al recurso estratégico que alberga y por el cual, varias instituciones han desarrollado estos modelos como herramienta de gestión y evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico para la región.

Las características de los modelos hidrogeológicos se exponen en las siguientes tablas (17 a 23).

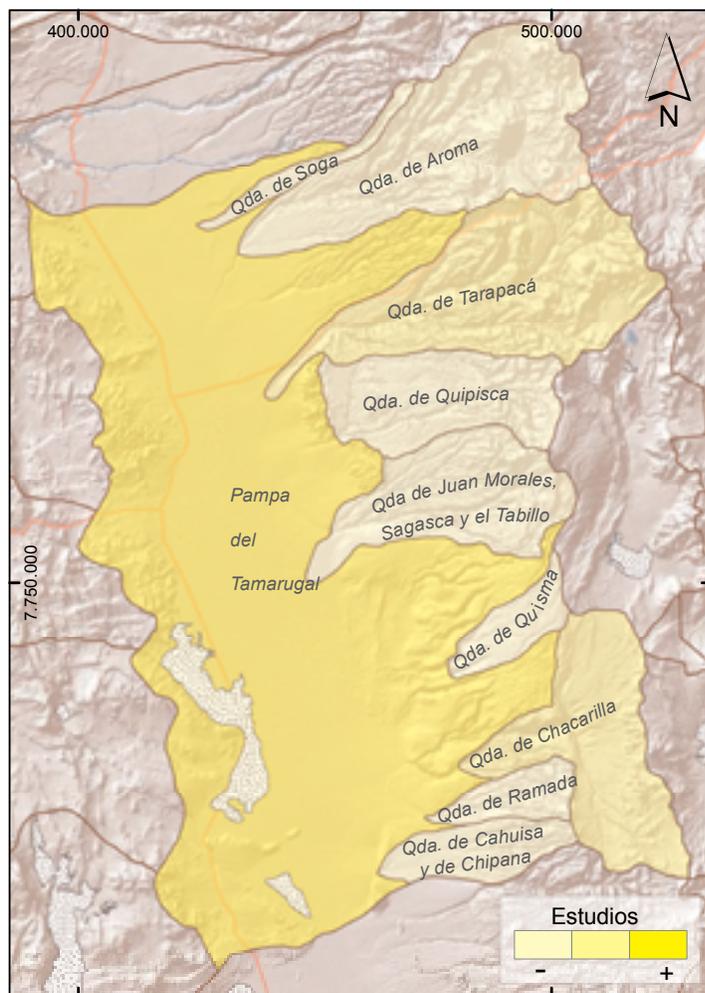


Figura 32. Zona hidrográfica Pampa del Tamarugal clasificadas según cantidad de estudios existentes.

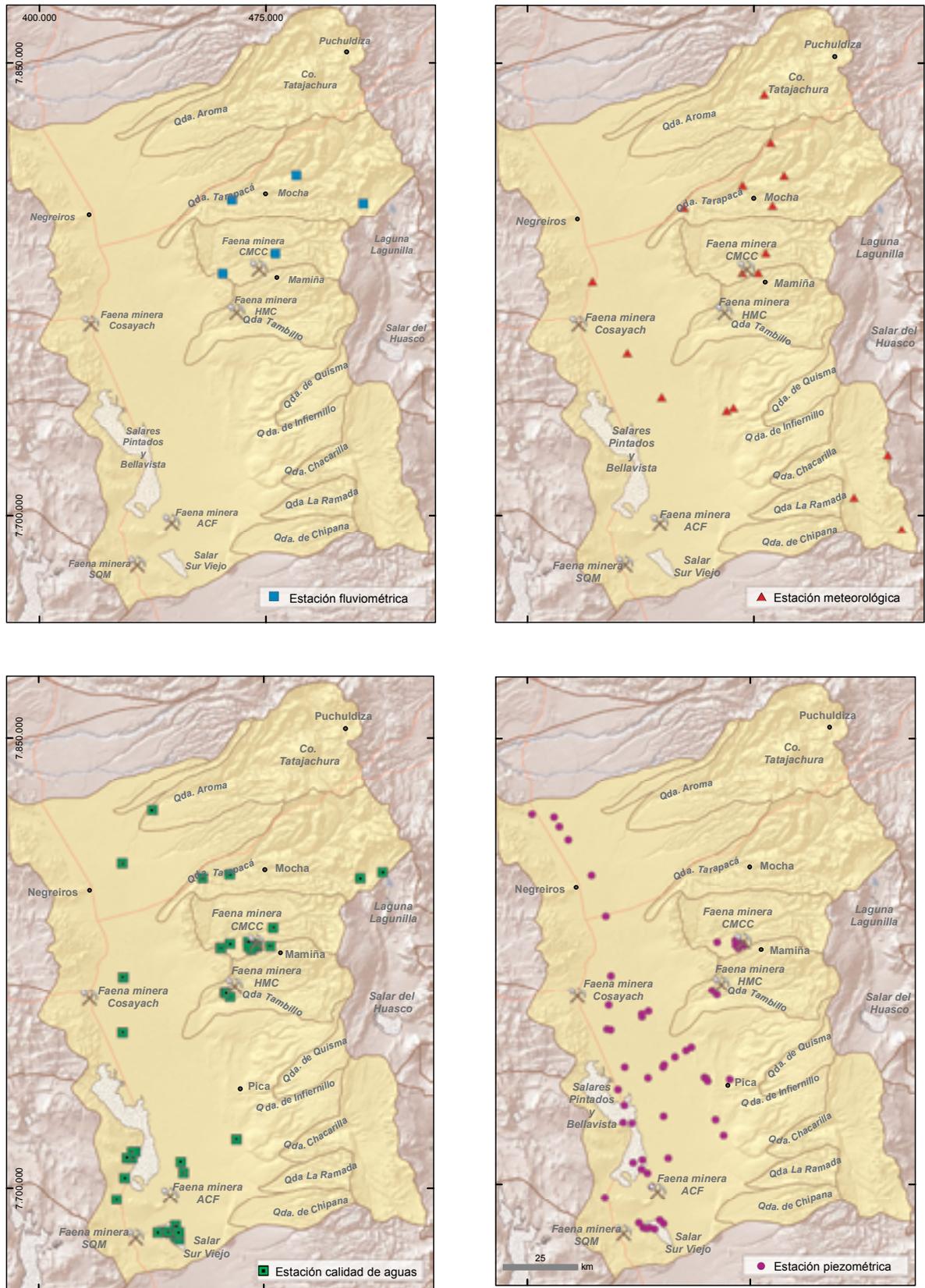


Figura 33. Mapas de estaciones de monitoreo vigentes públicas, privadas y académicas en la zona Pampa del Tamarugal.

Tabla 17. Características del modelo hidrogeológico desarrollado por DICUC (1988).

FUENTE	Centro de Recursos Hidráulicos Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. (1988). <i>Modelo de Simulación Hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal</i> . Dirección General de Aguas, MOP.				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	Modelo matemático (determinístico) realizado en lenguaje de programación <i>FORTRAN VS.</i> , basado en el método residual de Galerkin usando elementos finitos. Los límites geográficos están definidos por: al norte la divisoria de flujo de dos sistemas independientes a la altura de Negreiros; al sur el cerro Cachango y Gordo o extremo sur del salar de Bellavista; al este y oeste los contactos de superficie relleno-roca determinados por la cordillera de los Andes y de la Costa. Dentro del modelo estos límites se agrupan en dos tipos: límite impermeable el cual corresponde al costado occidental de la zona así como el límite sur definido por los cerros Cachango y Gordo; límite con flujo subterráneo entrante al sistema, el cual corresponde al contorno de la zona, desde la localidad de Negreiros siguiendo por el costado oriental hasta la interacción con el límite impermeable frente al cerro Gordo. A partir del modelo obtenido, se han realizado varias simulaciones considerando distintos escenarios de explotación.				
ACUÍFERO	Pampa del Tamarugal	ÁREA MODELIZADA	Comprendida entre 69° - 70° W y los 19°30' - 21° S.		
TAMAÑO DE CELDA	Ancho de banda: 54	N° CAPAS	1	N° CELDAS	769 elementos y 419 nodos.
CALIBRACIÓN	Se ha realizado una calibración en régimen permanente utilizando los datos históricos registrados en el año 1960 ya que para esa época se dispone de gran cantidad de observaciones del nivel en los pozos de la Pampa, además en dicho periodo no se efectuaba la explotación de la planta Canchones y el resto de las extracciones aisladas eran bajas. De este proceso, se ha obtenido una diferencia promedio de 1,0 m entre los valores observados y calculados. Posteriormente, se realizó una calibración en régimen no permanente entre los años 1960 y 1983, utilizando datos desde 1983 a 1986. De este proceso se han obtenido diferencias promedio de 0,50-1,93m entre los valores históricos y los simulados.				
PARÁMETROS					
Kh (m/d)	Kh/Kv	T (m ² /d)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
-	-	6 sectores: 100->1.000 (inicial); 49 sectores:7-7.000 (resultado)	0,01-25 (inicial)	752	Transpiración de los Tamarugos y Algarrobos: 210 l/s; evaporación desde los salares: 542 l/s (resultado del balance hídrico del modelo) a 286 l/s (1980 hasta 1986)

Tabla 18. Características del modelo hidrogeológico realizado por JICA (1995).

FUENTE	JICA (1995). <i>El Estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte Norte de Chile</i> . Japan International Cooperation Agency y Dirección General de Aguas					
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	Modelo matemático (determinístico) realizado con el programa <i>UNISSF (Unified Normal and Inverse Sub-Surface Flow)</i> basado en el método de elementos finitos. Los límites oriental y occidental del modelo son por un lado la Cordillera de la Costa y el piedemonte de la Precordillera, por otro lado los límites norte y sur no son muy claros, aunque se asumió que ambos límites están bordeados completamente por el basamento en términos de la simulación hidrogeológica. El modelo asume la existencia de dos tipos de acuíferos: Q3 y Q4. Asimismo se han realizado dos simulaciones considerando dos escenarios de explotación del acuífero.					
ACUÍFERO	Pampa del Tamarugal	ÁREA MODELIZADA	5.500 km ² (Aproximadamente)			
TAMAÑO DE CELDA	2,5 - 5 km	N° CAPAS	2	N° CELDAS	348 elementos y 301 nodos	
CALIBRACIÓN	Los resultados del modelo fueron comparados con la piezometría del año 1993 de la Pampa del Tamarugal. Las simulaciones se han basado en un proceso de prueba y error hasta determinar que los niveles simulados satisfacen la reproducción de los niveles actuales del acuífero.					
PARÁMETROS						
Kh (m/d)	Kv (m/s)	Kh/Kv	Ss (l/m)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
Q3: 0,864; Q4: 0,0864	Despreciable ⁽ⁱ⁾	-	-	Q3: 35; Q4: 30	976 (por siete afluentes); 288 (por un sistema de fallas desde el Altiplano)	Transpiración de los Tamarugos: 2,257 m ³ /día/nodo (en 1993). Explotación de agua subterránea: 696 l/s.

⁽ⁱ⁾ La hipótesis de Dupuit cuya ecuación es la función dominante en el *UNISSF* para el estudio del flujo infiltrado en un sistema, considera que los flujos verticales son despreciables al compararlos con los flujos horizontales.

Tabla 19. Características del modelo hidrogeológico realizado por DSM Minera S.A. (2002).

FUENTE	DICTUC (2004). Revisión del Estudio Estación Cerro Gordo: Modelo de Flujo numérico de aguas subterráneas. Houston - DSM Minera, S.A, 2002.				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	Modelo numérico (determinístico) desarrollado en <i>Visual ModFlow</i> mediante el método de diferencias finitas. El modelo se basó en los acuíferos Pampa del Tamarugal, Sur Viejo y Llamara los cuales son considerados como una sola unidad hidrogeológica. Por lo tanto, los límites del modelo quedan definidos por el norte con la quebrada Tiliviche, por el sur con el río Loa, por el este con la Precordillera y por el oeste con la Cordillera de la Costa. Los límites norte, este y oeste fueron considerados como límites impermeables, mientras que el río Loa (límite sur) fue simulado mediante celdas de dren. La recarga se debió exclusivamente a la producida por las quebradas al este, de manera que se descartó cualquier aporte al norte, oeste y sur del modelo.				
ACUÍFERO	Pampa del Tamarugal, Sur Viejo y Llamara.	ÁREA MODELIZADA	18.960 km ²		
TAMAÑO DE CELDA	500 m – 5 km	N° CAPAS	1	N° CELDAS	-
CALIBRACIÓN	<p>Primero se realizó una calibración en régimen permanente con información de niveles de la napa en la década del 60 para el acuífero Pampa del Tamarugal y con información actual para el sector de Llamara, el cual no ha sido explotado a la fecha. El error medio absoluto obtenido de esta calibración es de 2,7 m. Seguidamente se realizó una calibración en régimen no permanente para el periodo comprendido entre 1960 – 1993 con los niveles de la napa para los años 1980, 1983 y 1986 y valores representativos del periodo 1993 a 1998. El error medio absoluto obtenido en las dos calibraciones fue de 2,7 m.</p> <p>Posteriormente se ha realizado un análisis de sensibilidad en el que se aprecia que el modelo es muy sensible a los cambios en los valores de conductividad hidráulica y muy poco sensible a cambios en el almacenamiento.</p>				
PARÁMETROS					
K (m/d)	Kh/ Kv	Ss (l/m)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
0,01 – 10 (resultado de la calibración)	-	-	0,3 (resultado de la calibración)	1.423	Evapotranspiración: 1.786 l/s con una profundidad de extinción de 1 m; descarga en el sur hacia el río Loa: 139 l/s (resultado de la calibración); explotación de aguas subterráneas para después del 2001 es de 1.900 l/s.

En los modelos señalados, en el caso del modelo de DICUC (1988; tabla 17), el estudio base del modelo aunque no lo específica, no descarta los aportes provenientes del acuífero de Matilla – Pica. Por otro lado, no se ha considerado el aporte de la quebrada Aroma dentro de la recarga total, ya que durante el proceso de calibración al incorporarla se registró una elevación excesiva de los niveles, no pudiéndose llevar a cabo satisfactoriamente la calibración en esas condiciones debido a que la respuesta difería notablemente de la esperada.

En el caso del modelo desarrollado por JICA (1995), se aprecia que las condiciones hidrogeológicas de la Pampa del Tamarugal son consideradas estables debido a que no se aprecian fluctuaciones en el tiempo ni cambios estacionales aparentes. Asimismo, el modelo desarrollado se presenta como un aporte al conocimiento hidrogeológico de la Pampa, aunque carece de otras apreciaciones que son consideradas en futuros estudios, tales como las recargas al norte y sur del acuífero. Esta observación se debe a las consideraciones que se han tenido tanto en la ecuación constitutiva del modelo, como en la caracterización

hidrogeológica del acuífero en el modelo conceptual. Dicha apreciación se supone al considerar despreciable los flujos verticales cuando se tienen dos acuíferos superpuestos, así como límites basados en hipótesis que en estudios más actualizados son desestimadas.

Siete años después del modelo realizado por JICA, la antigua empresa DSM Minera S.A. realizó un modelo hidrogeológico del sistema Pampa del Tamarugal – Sur Viejo – Salar de Llamara (tabla 19). De este modelo se resalta que ha sido el primero en considerar en una sola unidad hidrogeológica los tres acuíferos más importantes de la depresión central. Además, el contemplar una descarga del acuífero hacia el río Loa deja una incertidumbre en cuanto a las condiciones impuestas en el modelo, ya que no se especifica la cuantificación de dicha descarga.

Posteriormente, Rojas (2005) realizó un modelo hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal como parte de su tesis de maestría. En este primer modelo de Rojas se ha considerado solo una capa en el modelo, debido a que la mayoría de los pozos en la Pampa drenan en las dos unidades citadas en JICA

Tabla 20. Características del modelo hidrogeológico realizado por Rojas (2005).

FUENTE	Rojas R. (2005). <i>Groundwater flow model for Pampa del Tamarugal aquifer - Northern Chile</i> . Tesis doctoral. Vrije Universiteit Brussel, Bruselas, Bélgica.				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	Modelo matemático (determinístico) desarrollado en <i>Visual ModFlow</i> en estado estacionario y transitorio. El modelo fue discretizado en función de las unidades superiores de la Formación Altos de Pica. Los límites laterales están definidos por los contactos entre los materiales de la Formación Longacho y los materiales constituyentes de la Pampa (límite oriental) y los lineamientos de las principales fallas de dicha Formación (límite occidental). Estos límites se han definido como límites del modelo de tipo “no flujo” junto con el límite norte, mientras que el límite sur se definió a partir del nivel piezométrico conocido en dos pozos de observación adyacentes. La profundidad del modelo varía de 50 m en el sector de Dolores (norte) y 300 m en el Salar de Pintados y Canchones. El modelo resultante se sometió a cinco escenarios con el fin de visualizar comportamientos característicos.				
ACUÍFERO	Pampa del Tamarugal	ÁREA MODELIZADA	4.300 km ²		
TAMAÑO DE CELDA	1,2 x 1,2 km – 500 x 500 m	N° CAPAS	1	N° CELDAS	3000 aprox.
CALIBRACIÓN	<p>Dos etapas de calibración fueron llevadas a cabo: una calibración tradicional basada en el método de prueba y error, seguido por una calibración basada en prueba y error utilizando un estimador de parámetros (<i>PEST, Parameter Estimation</i>). La calibración ha considerado como nivel de aceptación deseado (teniendo en cuenta la magnitud de la zona de estudio) un error cuadrático medio normalizado (NRMS) inferior al 5%, una media residual absoluta (ARM) inferior a 1,5 m y un error cuadrático medio (RMS) inferior a 2 m.</p> <p>Teniendo en cuenta lo anterior, la calibración en estado estacionario se basó en los registros de niveles del año 1960, obteniendo un valor inicial de NRMS de 9,34%, ARM de 9,8 m y un RMS de 25,6 m. Luego de someterse a las dos etapas de calibración, se alcanzó un valor de NRMS de 0,6%, ARM de 1,3 m y un RMS de 1,7 m. Esto se logró modificando los valores de la conductividad hidráulica.</p> <p>Posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad. De este análisis se determinó que la tasa de evaporación y la profundidad de extinción no son sensibles en un intervalo de variación determinado; la condición de contorno al sur es algo sensible, mientras que la recarga y la conductividad hidráulica son bastante sensibles a los cambios volviendo el modelo bastante inestable. En el caso de la conductividad esto ocurre cuando se intenta disminuir los valores de conductividad previamente impuestos.</p> <p>Posteriormente se realizó una calibración en estado transitorio para el periodo correspondiente entre 1960 – 2004, con los niveles registrados de 1983 – 2004 (debido a la ausencia de datos desde 1960 a 1983). En este caso la calibración se basó únicamente en una calibración tradicional basada en el método prueba-error, debido a que el PEST no se puede aplicar por el excesivo tiempo que se consume en el proceso. Al aplicar dicha calibración, se apreció que el modelo presentaba problemas de convergencia por lo valores de S_y inicialmente definidos. De dicho proceso se obtuvo un NRMS de 0,75%, un ARM de 1,27 m y un RMS de 2,1 m.</p>				
PARÁMETROS					
Kh (m/d)	Kh/Kv	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS	
$1 \times 10^2 - 2 \times 10^2$ (inicial), $3 \times 10^2 - 6,7 \times 10^1$ (a partir del PEST)	⁽ⁱ⁾	$5 \times 10^{-3} - 30$ (resultado)	976 ⁽ⁱⁱ⁾	Evaporación: 1.250 – 2.500 mm/año con profundidad de extinción de 1 m (inicial), 603 l/s (resultado del balance del modelo); transpiración de lo Tamarugos: 210 l/s (resultado del balance en estado estacionario, año 1960), 904 l/s (estado transitorio; aunque se considera variante en el tiempo); explotación de aguas subterráneas: 730 l/s	

⁽ⁱ⁾ No se hace alusión directa en el documento, pero se deja claro la existencia de algunas incertidumbres. Estas observaciones se tratan en la actualización de este modelo al incorporar el cálculo de la incertidumbre en la modelización hidrogeológica del acuífero Pampa del Tamarugal [276].

⁽ⁱⁱ⁾ Al respecto, Rojas y Dassargues (2006) presentan en base al modelo realizado, un nuevo modelo de flujo subterráneo con valores de recargas generados aleatoriamente para diferentes niveles de incertidumbre. Los resultados muestran que la evaporación y las salidas de agua subterránea son insensibles a la incertidumbre de la recarga, pero pueden afectar significativamente el almacenamiento. Por otro lado, las fluctuaciones de los niveles de aguas subterránea por la incertidumbre de la recarga es visible en ciertas áreas donde se presentan anomalías en los niveles observados.

(1995), por lo que la mayoría de los parámetros fueron obtenidos para estas dos unidades en conjunto. Sin embargo, se aprecia que a diferencia del modelo realizado en 1993, este modelo presenta mayor resolución, en cuanto al tamaño de celda se refiere, aunque considera todo el acuífero en una sola capa. La adopción de los parámetros hidráulicos se debe de considerar, ya sea por los ensayos de bombeo o por un estudio más detallado (considerando la geología de la zona), complementando la información disponible con experiencias en otros acuíferos de características similares, incluso cuando los ensayos de sensibilidad demuestran que la conductividad hidráulica o la recarga son muy sensibles a la variación de dichos valores en un intervalo determinado.

Cabe resaltar, que en este estudio no se ha tenido en cuenta la recarga subterránea producto de fisuras profundas de acuerdo a lo citado por JICA (1995).

Luego de este modelo, DICTUC realizó un modelo hidrogeológico del acuífero de la Pampa del Tamarugal como parte del EIA del Proyecto Pampa Hermosa de SQM (tabla 21). De este modelo se destacan los errores de cierre alcanzados, los cuales posiblemente se deban al considerar la heterogeneidad del acuífero, la distribución de los parámetros en función de su situación espacial, así como de la anisotropía que en modelos anteriores no era tomada en cuenta. Aun así, el hecho de considerar solo los pozos localizados en el sector central y noroccidental del acuífero en la calibración en régimen no permanente, puede condicionar los resultados de la simulación.

Finalmente, Rojas *et al.* (2010) publican una serie de modelos en base al realizado en Rojas (2005), en los cuales han incorporado la incertidumbre de la recarga mediante hipótesis traducidas en "escenarios tipo" que el acuífero adoptaría según ciertas consideraciones. De acuerdo a la tabla 22, el espesor de

Tabla 21. Características del modelo hidrogeológico realizado por DICTUC (2007b).

FUENTE	DICTUC (2007b). Modelo de la evolución del nivel de la napa en la Pampa del Tamarugal. En: <i>Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa</i> . Sociedad Química y Minera de Chile S.A.				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	Modelo numérico (determinístico) del acuífero Pampa del Tamarugal desarrollado con el programa <i>Mod-Flow</i> a través de su interfaz gráfica <i>Groundwater Vistas</i> . Las capas representan la unidad Q3 y Q4 de la Formación Altos de Pica. El estrato superior se modeló con un carácter hidrogeológico libre, mientras que el inferior puede cambiar su carácter hidrogeológico entre confinado y libre. Los límites del modelo se consideran impermeables en el margen occidental y oriental, mientras que el límite sur y norte se consideran como bordes de altura constante. En el caso del límite sur, el extremo suroeste corresponde a un borde lateral impermeable que se extiende desde el Cerro Gordo hasta el borde lateral impermeable poniente, mientras que el límite sureste corresponde a un borde de altura constante donde se conectan los acuíferos Pampa del Tamarugal y Sur Viejo. Por otro lado, se contempla la existencia de una descarga hacia el acuífero La Noria mediante fallas inferidas.				
ACUÍFERO	Pampa del Tamarugal	ÁREA MODELIZADA	4171,2 km ²		
TAMAÑO DE CELDA	400 x 400 m	N° CAPAS	2	N° CELDAS	52.140 (ACT)
CALIBRACIÓN	<p>Para la calibración en régimen permanente se ha considerado el acuífero en estado estacionario para el periodo anterior al año 1987, cuando la extracción era mínima. Los valores de conductividad hidráulica se han determinado mediante un estimador de parámetros (<i>PEST, Parameter Estimation</i>). De esta primera calibración se obtuvo un excelente ajuste entre los niveles observados y calculados, obteniendo un error de cierre en el balance hídrico del modelo de 0,01 l/s.</p> <p>Posteriormente se realizó una calibración en régimen no permanente para el periodo comprendido entre los años 1987 a 2005. El error de cierre de este proceso fue de 0,02%.</p>				
PARÁMETROS					
Kh (m/d)	Kh/Kv	Ss (l/m)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
1-150 (Capa 1); 2-40 (Capa 2)	10	10 ⁻⁸	0,05 – 30 (Capa 1); 1 – 28 (Capa 2)	869,7	Evaporación: incorporada a partir de una curva unitaria de evaporación versus profundidad de la napa (inicial) y 261,81 l/s (resultado de la calibración en régimen permanente); transpiración: 224,0 l/s (inicial) y 44,88 (resultado de la calibración en régimen permanente); recarga al acuífero La Noria: 18,1 l/s; pozos de extracción: 1406,6 l/s (resultado de la calibración en régimen no permanente).

Tabla 22. Características del modelo realizado por Rojas et al., 2010.

FUENTE		Rojas R., Batelaan O., Feyen L. y Dassargues A. (2010). <i>Assessment of Conceptual Model Uncertainty for the Regional Aquifer Pampa del Tamarugal - North Chile</i> . Hydrol. Earth. Syst. Science				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO		<p>Modelo numérico (determinístico) desarrollado en ModFlow-2000 en estado estacionario. El objetivo de este estudio ha sido calcular la incertidumbre en la modelización del flujo de agua subterránea en la Pampa del Tamarugal, utilizando el método multi-modelo para incluir explícitamente las incertidumbres que surgen en la definición de diferentes modelos conceptuales. Para esto se han simulado cuatro alternativas (M1, M2, M3, M4) siguiendo el método multi-modelo, el cual conjunta los métodos <i>GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)</i> y <i>BMA (Bayesian Model Averaging)</i> los cuales se basan en la determinación de la probabilidad de un parámetro en una zona sin condicionar y condicionada respectivamente. Los límites del modelo se han definido de acuerdo a Rojas (2010) aunque en esta ocasión, el límite norte al igual que el límite sur se consideran de tipo "nivel piezométrico conocido" a partir de la observación en puntos cercanos respectivamente.</p> <p>El modelo M1 consiste en un modelo de dos capas con valores de conductividad hidráulica (k) constantes en cada capa, considerando el lecho de las quebradas como zonas de recarga así como puntos de descarga hacia el acuífero de la Noria; el M2 con una capa, valores de k zonados, puntos de recarga coincidentes con la entrada de las quebradas al acuífero, así como puntos de descarga al acuífero La Noria; el M3 con una capa y una función de parámetros aleatoria y espacial incondicionada; el M4 con una capa y una función de parámetros aleatoria y espacial condicionada.</p>				
ACUÍFERO		Pampa del Tamarugal	ÁREA MODELIZADA	4.300 km ²		
TAMAÑO DE CELDA		600 x 600 m	Nº CAPAS	M1: 2; M2, M3, M4: 1	Nº CELDAS	28556 (Act)
CALIBRACIÓN		La calibración se ha realizado de acuerdo a los fundamentos teóricos del algoritmo aplicado de acuerdo al método multi-modelo. La aceptación de los resultados se ha basado en la inspección visual de las series gráficas obtenidas para todos los parámetros y variables de interés, así como de los parámetros de evaluación impuestos por el método aplicado.				
PARÁMETROS						
Kh (m/d)	Kh/Kv	Sy (%)	RECARGA (m ³ /d)	OTROS		
0-100	(i)	-	Quebradas: 0-345.600; por fracturas profundas: 172.800	Evaporación potencial: 0-3.650 mm/año con una profundidad de extinción: 0-20 m; descarga al acuífero de La Noria: 0-86.400 m ³ /d; nivel piezométrico al norte: 1.075-1.120 m s.n.m.; nivel piezométrico al sur: 875-920 m s.n.m.; transpiración de los Tamarugos: 172.800 m ³ /d.		

(i) Se observó que las superficies piezométricas descritas por los modelos M3 y M4 presentan mejor definición y menor dispersión que los modelos M2 y M1, indicando lo relevante de describir la conductividad hidráulica con más detalle, es decir, al incluir la heterogeneidad de la conductividad hidráulica se reduce la incertidumbre en la estimación de los otros parámetros.

Tabla 23. Características del modelo hidrogeológico en el acuífero de Sur Viejo realizado por DICTUC (2008).

FUENTE		DICTUC (2008). Modelo de la evolución del nivel de la napa en el acuífero de Sur Viejo. En: <i>Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa</i> . Sociedad Química y Minera de Chile S.A.				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO		Modelo numérico (determinístico) del acuífero Sur Viejo mediante la solución analítica de la ecuación general de escurrimiento no permanente. En este acuífero la profundidad del nivel freático en ningún caso es menor a los 12 m, por lo que no existe evaporación desde el agua subterránea. Los antecedentes indican que este es un acuífero libre de propiedades hidrogeológicas poco variables.				
ACUÍFERO		Sur Viejo	ÁREA MODELIZADA	390 km ²		
TAMAÑO DE CELDA		-	Nº CAPAS	-	Nº CELDAS	-
CALIBRACIÓN		El proceso de modelización consiste en la resolución de la ecuación general del escurrimiento no permanente. Debido a las variables que se solicitan para dar solución a dicha ecuación, se han utilizado 16 pozos de explotación con un caudal total otorgado de 183,1 l/s				
PARÁMETROS						
T (m ² /d)	Kh/Kv	Ss (l/m)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS	
500	-	-	4-8	110	No se considera la evaporación.	

las capas en el modelo M1 varía de acuerdo a la potencia de las unidades Q3 y Q4 definidas en JICA (1995).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos previamente en modelos desarrollados por el mismo autor, se aprecia la importancia de considerar la definición de la conductividad hidráulica: su distribución, heterogeneidad y comportamiento, cuyas mediciones no deben basarse únicamente en las mediciones realizadas en los pozos disponibles, sino en una definición global atendiendo a las características geológicas que han definido la Pampa del Tamarugal.

En este último modelo, basado en el análisis del comportamiento del acuífero atendiendo a las incertidumbres en los parámetros que lo definen, se deja claro que la incertidumbre no solo se demarca en los valores de la conductividad, sino incluso en las tasas de evaporación desde salares, la transpiración de los Tamarugos, los flujos subterráneos, la conexión con otros acuíferos y la recarga. Esto deja ver la importancia de realizar un trabajo investigativo enfocado en esos parámetros que in-

corporen no solo la definición de las causas, sino un sistema de monitoreo capaz de producir información temporal y espacial destinado al posterior análisis y definición de particularidades, existencia y descarte de las hipótesis hasta ahora utilizadas en el comportamiento de estos parámetros en el acuífero Pampa del Tamarugal.

En el caso del modelo realizado exclusivamente en el acuífero Sur Viejo (tabla 23), se observó que la depresión producida en las cercanías de la zona de conexión con el acuífero Pampa del Tamarugal, producirá un aumento en la descarga de 8 l/s de este acuífero hacia el acuífero Sur Viejo.

2.2. HIDROGRAFÍA

La cuenca Pampa del Tamarugal se configura como una cuenca hidrográfica endorreica o cerrada, ya que ningún flujo superficial de agua fluye fuera de la cuenca. Según la fuente, se denomina "Depresión Intermedia" o "Depresión Central" atendiendo al carácter fisiográfico regional.

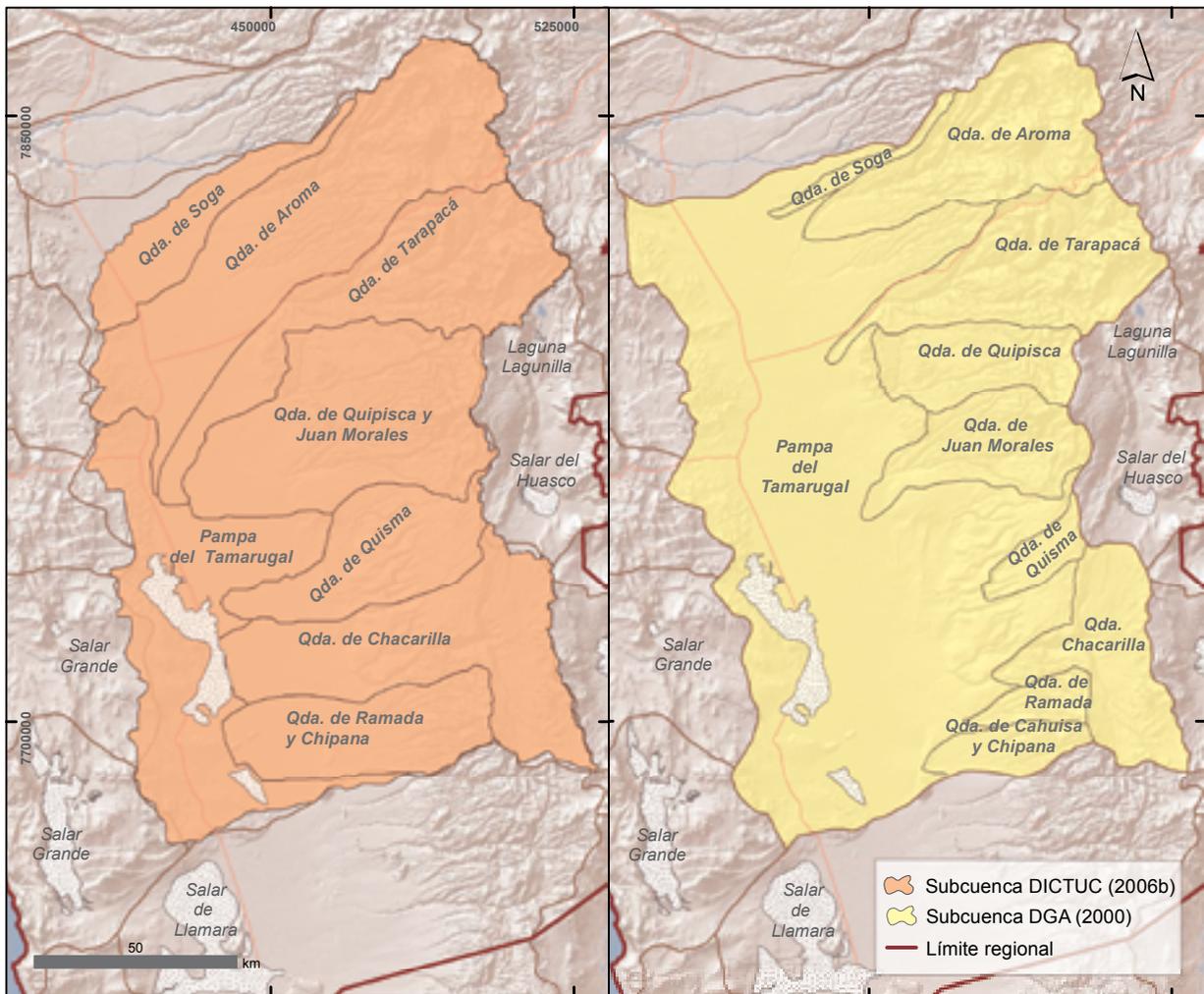


Figura 34. Mapa de cuencas y subcuencas hidrográficas de la Pampa del Tamarugal delimitadas según distintas fuentes.

La cuenca Pampa del Tamarugal está definida por diez subcuencas aunque varía según la fuente, debido a la reagrupación de subcuencas que tienen un tamaño reducido y poca información específica: Quipisca y Juan Morales; Ramada y Chipana. Por otra parte, las delimitaciones de la cuenca y sus subcuencas varían significativamente según las fuentes, especialmente entre DGA (2000) y DICTUC (2006b), dificultando la comparación de los resultados (figura 34).

La cuenca Pampa del Tamarugal presenta escurrimientos permanentes en las quebradas de Aroma, Tarapacá y Chacarilla, y no permanentes en las quebradas de Quisma, Quipisca, Parca, Juan Morales, Sagasta, Tambillo (salvo en la parte alta de la quebrada de Tambillo y Parca-Quipisca, Chipana y Ramada). Todos los escurrimientos se infiltran antes de desembocar en la depresión de la Pampa del Tamarugal salvo durante eventos hidrometeorológicos extremos de ocurrencia esporádica.

Existen numerosas vertientes en las partes altas de las quebradas de Aroma, Tarapacá, Parca y Tasma-Tambillo, Chacarilla y en la parte más alta de Chipana y Ramada. Son más conocidas las vertientes termales (Chuzmisa, Mamiña) y las cuatro vertientes de la subcuenca de Quisma que mantienen el oasis de Pica (Las Animas, Resbaladero, Concova y Miraflores). Las vertientes principales de las quebradas fueron descritas en detalle por Castillo (1960) (origen y formación), Klohn (1972), Niemeyer (1980) e IRH (1983). Estos estudios presentan valores de aforos puntuales encontrados en la literatura o medidos en el marco del estudio en cuestión. Adicionalmente, en el sector de Pica se registran 12 socavones. Bruggen (1918) describe con detalle los socavones y vertientes, así como Castillo (1960) y Dingman & Galli (1965).

2.3. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

2.3.1. Subcuencas de Aroma y Soga

No existe ningún estudio específico dedicado a la subcuenca de Aroma⁸. Desde enero del 2012, existe una estación meteorológica de la DGA registrando datos en el sector de Chiapa en la Quebrada de Aroma; no obstante, no existen registros continuos fluviométricos ni piezométricos. Los datos encontrados en la literatura se limitan a aforos puntuales. Por lo tanto, la estimación de los parámetros hidrológicos de la subcuenca de Aroma necesarios para calcular la recarga a la Pampa del Tamarugal, fueron estimados en base a datos meteorológicos y fluviométricos en cuencas vecinas (subcuenca de Tarapacá) [88; 102; 193; 273].

La tabla 24 detalla los parámetros de la subcuenca estimados por diferentes fuentes. La estimación de la precipitación es más baja en los estudios recientes (de 124 a 99 mm/año), lo que

puede deberse tanto al periodo de cálculo considerado como en el área de la misma. La metodología utilizada para calcular la precipitación media en DGA (1987) y JICA (1995), se basa en la utilización de un mapa de isohietas; en DICTUC (2006b), se realiza un análisis estadístico de la distribución espacial de las precipitaciones en cuencas vecinas.

Tabla 24. Balance hídrico de la subcuenca de Aroma (por fuente).

Ítem	DGA, 1987	JICA, 1995	DICTUC, 2006b ⁽ⁱ⁾
Área cuenca (km ²)	1.481	1.746	2.044
Precipitación (mm/año)	124	102	99
Evapotranspiración (mm/año)	117	-	91
Caudal superficial (l/s)	250	310	258
Recarga			273

(i) Considerando las Quebrada de Aroma y de Soga

Los estudios hidrogeológicos de la Pampa del Tamarugal [88; 193; 102; 105] consideran un caudal de recarga desde la subcuenca de Aroma del mismo orden de magnitud –de 250 a 300 l/s,– según la fuente. Es el segundo caudal de recarga más importante después del caudal de la quebrada de Tarapacá.

2.3.2. Subcuenca de Tarapacá

La subcuenca de Tarapacá es la única subcuenca de la Pampa del Tamarugal con datos de monitoreo meteorológico (con Quipisca y Juan Morales) y fluviométrico. Por esta razón, la subcuenca de Tarapacá fue utilizada como referencia en los diferentes estudios para estimar la recarga total de la cuenca Pampa del Tamarugal. Por otro lado, no existen datos piezométricos en esta subcuenca.

Existen dos estudios que se dedicaron a estudiar específicamente la quebrada de Tarapacá: “*El Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca quebrada de Tarapacá*” realizado por CADE-IDEPE en el año 2004 [38], el cual incluye información básica y general sobre la geomorfología, geología e hidrogeología entre otros; y “*La evolución isotópica en ríos del norte de Chile*” publicado por Aravena & Suzuki (1983), en el cual se utilizan técnicas de análisis de isótopos de carbono para describir la procedencia y aportes de carbono en el río Loa y el río Tarapacá.

Al igual que las otras quebradas de la Precordillera, la subcuenca de Tarapacá presenta acuíferos en el relleno aluvial Cuaternario vinculados a los cauces de la subcuenca, además de un flujo subterráneo a través de fallas en el basamento volcánico de la quebrada. Ambos no han sido caracterizados ni cuantificados.

⁸ A la fecha de esta publicación, se inicia el “Estudio de Pre-factibilidad del Embalse de la Quebrada de Aroma” con una duración de 18 meses.

En la subcuenca de Tarapacá, por regla general, los valores medios de precipitación calculados en los estudios más recientes son inferiores a los valores medios calculados en los estudios más antiguos, lo que se debe probablemente a la ocurrencia de décadas más húmedas (1960-1980) y décadas posteriores más secas (2000-2010). La subcuenca de Tarapacá registra valores medios de precipitación anuales superiores a 100 mm/año en su parte alta (Pampa Lirima) y en Chuzmiza. A pesar de estar a menor altura, Chuzmiza registra valores parecidos a los registrados en Pampa Lirima. En Poroma y Mocha, la precipitación media anual está por debajo de 50 mm/año y 30 mm/año.

El caudal proveniente del río Coscaya (Pampa Lirima) es menor al caudal proveniente del río Tarapacá. De similar interés es la disminución del caudal entre la estación Mina San Juan y la estación Laonzana, probablemente debido a fenómenos de infiltración en el cauce del río.

En la tabla 25 se detallan los parámetros de la cuenca estimados por diferentes fuentes. La estimación de la precipitación es del mismo orden de magnitud (≈ 140 mm/a).

Tabla 25. Balance hídrico de la subcuenca Tarapacá (por fuente).

Ítem	DGA, 1987	JICA, 1995	DICTUC, 2006b
Área cuenca (km ²)	1.644	1.716	1.599
Precipitación (mm/año)	145	104	140
Evaporación (mm/año)	137	-	128
Caudal superficial (l/s)	390	303	331
Recarga			295
Escorrentía	-	0,054	-

Los estudios hidrogeológicos de la Pampa del Tamarugal [88; 193; 102; 105] consideran un caudal de recarga desde la subcuenca Tarapacá, que varía de 295 a 385 l/s según la fuente. Es el caudal de recarga más importante al acuífero Pampa del Tamarugal.

2.3.3. Subcuenca Quipisca y Juan Morales

Al igual que la quebrada de Tarapacá, las quebradas de Quipisca y Juan Morales tienen estaciones de monitoreo de las variables hidrológicas, pero en menor cantidad. Aunque la DGA solo tiene tres estaciones meteorológicas vigentes en este sector, las compañías mineras –CMCC y HMC– poseen estaciones meteorológicas, fluviométricas y piezométricas.

El único estudio hidrológico e hidrogeológico en la subcuenca se encuentra en el EIA presentado en el 2005 por CMCC: “Actualización de la Faena Minera Cerro Colorado” [201], el cual se circunscribe al área de la faena minera. El estudio indica que las aguas subterráneas se encuentran confinadas en la

unidad litológica volcánica de tipo andesítico, a una profundidad que varía entre los 40 y 150 m. Esta unidad se encuentra fuertemente fracturada y su geometría controla la dirección del escurrimiento subterráneo (hacia al oeste y suroeste). La descarga se produce por vaciamientos muy lentos del agua almacenada hacia acuíferos que se encuentran aguas abajo. La transmisibilidad del sistema acuífero presenta valores reducidos con un rango comprendido entre 1,9 y 5,7 m²/día. Por otro lado, la permeabilidad oscila entre 0,014 y 1 m/día ($1,62 \times 10^{-5}$ y $1,4 \times 10^{-2}$ cm/s) [201].

Las estaciones meteorológicas de la subcuenca Quipisca y Juan Morales, Mamiña y Parca registran precipitaciones medias anuales cerca de los 30 mm/año, mientras que la estación de Cerro Colorado registra un valor de 19 mm/año. A menor altura, en Sagasca, la precipitación media anual es inferior a 10 mm/año.

En la tabla 26 se detallan los parámetros de la cuenca estimados por diferentes fuentes. Nótese que la estimación de la precipitación es mucho menor en el estudio más reciente (de 210 a 70 mm/año).

Tabla 26. Parámetros hidrológicos de la subcuenca Quipisca y Juan Morales (por fuente).

Ítem	DGA, 1987	JICA, 1995 ⁱ	DICTUC, 2006b
Área cuenca (km ²)	1.469	1.816	1.602
Precipitación (mm/año)	210	152,2	70
Evaporación (mm/año)	201	-	66
Caudal superficial (l/s)	210	161	134
Recarga subterránea (l/s)	-	-	110

ⁱ Considerando las Quebradas de Quipisca y de Sagasca.

Lo estudios hidrogeológicos de la Pampa del Tamarugal [88; 193; 102; 105] consideran un caudal de recarga desde la subcuenca Quipisca y Juan Morales entre 110 y 206 l/s, según la fuente.

2.3.4. Subcuenca Quisma

La subcuenca Quisma ha sido el foco de numerosos estudios por la existencia del oasis de Pica y de recursos subterráneos que generan y mantienen esa condición natural del oasis. El régimen hidrológico de las quebradas de Quisma y Seca (que conforman la cuenca de Pica) no presenta escurrimientos permanentes sino esporádicos que fluyen desde los Altos de Pica en dirección este-oeste, con una clara dependencia del periodo de precipitaciones del invierno altiplánico. Por otra parte, en la cuenca no existen registros de estos escurrimientos superficiales, no obstante estos son escasos e intermitentes y suelen observarse en la zona de cabecera de la cuenca (sobre los 2.500 m s.n.m), aunque ciertos eventos excepcionales generan escu-

rrimientos que llegan hasta la Pampa del Tamarugal (tal como se generó en marzo del año 2012). Todo escurrimiento se infiltra o se evapora en estos sectores.

La hidrogeología de la subcuenca Quisma se caracteriza por las Formaciones de rocas impermeables mesozoicas (Longacho, Chacarilla y Empexa) cuyos afloramientos se consideran como límites del acuífero constituido por la Formación Altos de Pica (final del Terciario y Pleistoceno). La subcuenca Quisma se caracteriza por ser la única subcuenca que tiene importancia económica en recursos hídricos [91].

Según Dingman & Galli (1965), el proceso de recarga del acuífero de Pica se sitúa sobre los 3.500 m s.n.m. en la Formación Altos de Pica, por el miembro cuatro de la Formación. La zona de los Altos de Pica se caracteriza por un alto grado de fracturamiento debido a la presencia de diaclasas verticales fuertemente desarrolladas.

Si bien varios estudios mencionan que la recarga ocurre dentro de la cuenca hidrográfica limitada al este por la línea divisoria de aguas con la cuenca Salar del Huasco [156; 279], al sur con la cuenca Chacarilla y al norte con la Quebrada de Tambillo, Tröger & Gerstner (2004) afirman que la falla en el límite oeste del Salar del Huasco y de dirección N-S, actúa como barrera hidráulica entre la Ignimbrita del Huasco y los sedimentos cuaternarios del *grabben* del Salar del Huasco. Por lo cual, las precipitaciones que caen sobre la Ignimbrita del Huasco recargarían la zona de Pica y de la Pampa del Tamarugal. Esta hipótesis ha sido descartada por PUC (2009).

El movimiento del agua subterránea dentro del acuífero se realiza mediante fracturas. Por ello, la permeabilidad prome-

dio de la Formación es muy baja, salvo pequeñas zonas con alta permeabilidad [91]. El escurrimiento lateral más importante se produciría por el primer miembro de la Formación Altos de Pica, con un movimiento muy lento (algunos metros por año), lo que explica que el conjunto de vertientes artesianas de Pica no esté influenciado por periodos de sequía [279] (figura 35).

Según Suzuki & Aravena (1984), en el sector de Pica-Matilla se distinguen dos tipos de aguas: la primera asociada a las vertientes, muestra valores isotópicos constantes (a partir de análisis continuos entre los años 1974 y 1984), lo que indica una recarga lejana (ocurrida en el Salar del Huasco y Altos de Pica entre Huasco y Coposa) y una gran capacidad de almacenamiento. La segunda, está representada por el acuífero surgente de Santa Rosa y Matilla con un contenido isotópico "más pesado", siendo su origen más probable en la Quebrada de Quisma.

Grilli et al. (1999) analizaron los datos isotópicos existentes, así como los análisis de iones mayoritarios de las aguas de las vertientes, socavones, pozos y de muestras de agua y nieve de las zonas de recarga. Estos concluyen que las aguas subterráneas de Pica tienen una edad mayor a 5.000 años, mientras que las del sector de Matilla y La Calera son más jóvenes (50 años).

La dirección del escurrimiento hacia el oeste está interrumpida por el bloque levantado de la serranía de Longacho que actúa como una barrera hidrogeológica impermeable [91].

Pocos estudios han afirmado que parte de la recarga en la cuenca salar del Huasco se descarga a la zona de Pica y a la Pampa del Tamarugal [193, 197], esta hipótesis no ha sido confirmada, incluso descartada o caracterizada como "poco probable" por los estudios posteriores [314; 279].

La actividad geotermal de Puchuldiza. En la parte alta de la cuenca de Aroma, en la localidad de Puchuldiza, un campo geotérmico suscitó un interés comercial desde los años sesenta, generando un número significativo de estudios a partir de la fecha. Los primeros estudios fueron realizados por J. Healey en los años 1968 y 1969, en colaboración con A. Lahsen. Los trabajos de exploración han sido realizados en dos etapas: la primera iniciada a finales de 1969 y suspendida en 1972 (levantamiento geológico de la zona, estudio de detalle de las manifestaciones termales, parte del estudio geofísico y un primer estudio geoquímico de las termas). Posteriormente, a finales de 1974 los estudios se reiniciaron con la realización de una campaña de prospección por parte de la Corporación de Fomento (CORFO). A finales de 1975 y 1977 se perforaron cinco pozos exploratorios con profundidades variables entre 428 m y 1.013 m, los cuales han permitido realizar mediciones y obtener datos de temperatura y química de los fluidos, zonas permeables existentes, y estratigrafía del subsuelo perforado. Posteriormente, JICA realizó dos es-

tudios en 1979 y 1981, aunque ninguno de estos estudios resultó en explotación. Durante el periodo 2006-2008, diversas campañas exploratorias fueron desarrolladas por la Empresa Minera Copiapó. En 2010, se presenta un EIA para la exploración geotérmica de Puchuldiza [224].

Puchuldiza es un campo geotérmico cuya fuente de calor proviene de la intrusión de magmas ácidos del Plio-Pleistoceno sobre una posible caldera erosionada. La fuente de calor podría encontrarse de manera somera o por medio de la existencia de fallas normales profundas que sirven de vía para la conexión con aguas magmáticas. Las temperaturas de las termas indican valores entre 240 °C y 160 °C, respectivamente. La recarga de las aguas al sistema provendría de la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Puchuldiza y de la infiltración desde cuencas hidrográficas más altas. Su descarga se realizaría preferentemente a través de las principales zonas de fallas en forma de pozas o geiseres, como también a través de vertientes generadoras de vegas y bofedales [224].

La descarga de la Formación Altos de Pica a la superficie ocurre de forma natural por medio de vertientes y socavones (galerías escavadas de la época de la conquista española) y de forma artificial por extracciones en los pozos. La descarga natural mediante cuatro vertientes muestra una estabilidad temporal desde hace más de un siglo (1893-2007). Dicha recarga asciende a un total promedio de unos 45 l/s. Actualmente, existen 12 socavones con un caudal medio total de 11,5 l/s (sin considerar el socavón de Santa Rosita).

Desde el año 2007, la DGA no registra el caudal de las vertientes. No obstante, la CMDIC entregó a la Comunidad de Agua Canal Matriz Resbaladero (Asociación de Canalistas de Pica), equipos para seguir midiendo el caudal de las vertientes.

El único mapa piezométrico y de isotermas del acuífero fue elaborado por Dingman & Gally (1965), el cual demuestra anomalías de niveles y temperaturas que se interpretan por los autores como zonas de aportes subterráneos profundos. También demuestran que una cantidad importante del agua se descarga a través del acuífero superficial hacia el oeste y suroeste.

Por otro lado, son varios los estudios (tabla 27) que han estimado el balance hídrico del acuífero de Pica. Todos se basan en los registros de la estación meteorológica de la DGA "Collacagua" (ubicada a 70 km de la localidad de Pica) para estimar la precipitación media. Actualmente, existen más estaciones meteorológicas en la zona altiplánica al este del acuífero de Pica (cuencas Salar del Huasco y Salar de Coposa) aunque ninguna en los Altos de Pica (dentro de la cuenca de Pica), lo que se considera como una restricción a una nueva estimación más precisa y fiable de la recarga del acuífero de Pica.

Salazar *et al.* (1998) estimaron la recarga media del acuífero de Pica en 250 l/s, resultado similar al obtenido por Karzulovic & García (1979). Otros estudios llegaron a una cifra de recarga más alta, como 700 l/s por Montero (1969) y 888 l/s por Dingman & Galli (1965), pero los fundamentos científicos de tales cálculos son dudosos.

Lo estudios hidrogeológicos de la Pampa del Tamarugal [88; 193; 102; 105] consideran un caudal de recarga desde la subcuenca de Quisma de 21 a 30 l/s según la fuente.

A la fecha, si bien se ha avanzado en el modelo conceptual en cuanto al origen de los flujos subterráneos en el acuífero de Pica, todavía no están definidos sus límites, las condiciones en

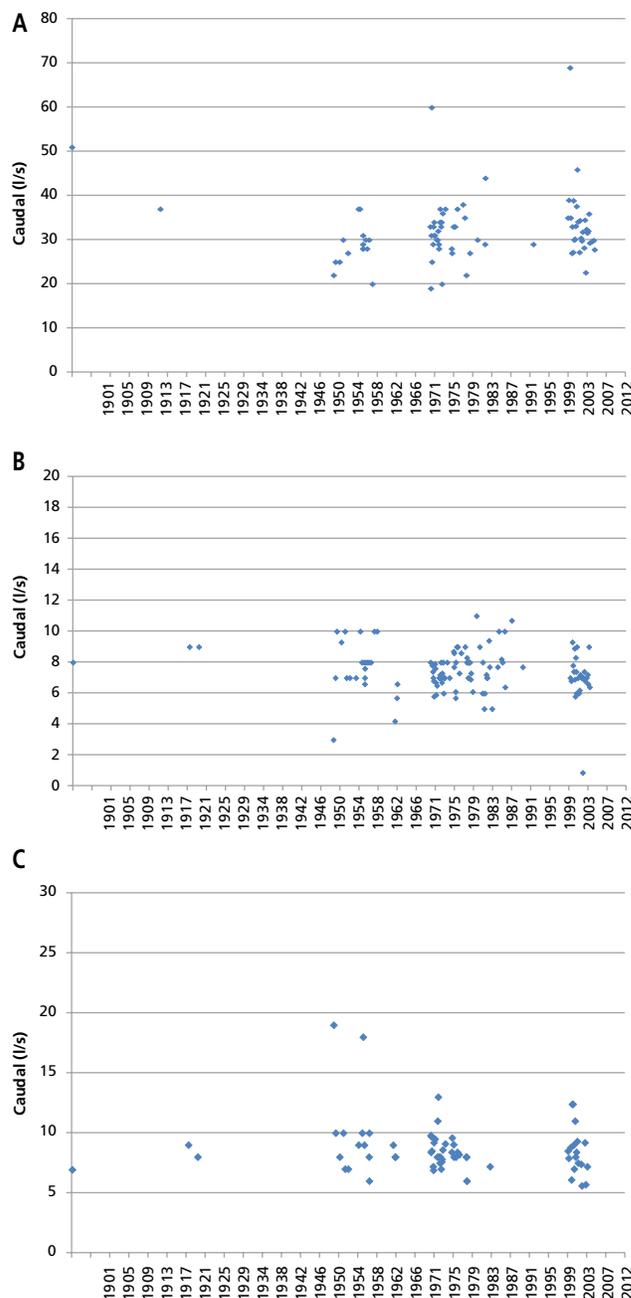


Figura 35. Serie cronológica de caudales registrados en las vertientes Resbaladero (A), Miraflores (B) y Concova (C).

Tabla 27. Balance hídrico de la subcuenca de Quisma (por fuente).

Ítem	Castillo, 1960	Dingman & Galli, 1965	Montero, 1969	Karzulovic & García 1979	Salazar <i>et al.</i> , 1998
Recarga (l/s)	400	888	700	250	250
Descarga natural (l/s): Vertientes y socavones	90	90,5	550	500	132
Descarga artificial (l/s)	44	51	-	-	270
Balance (l/s)	+ 270	743	150	-250	-152

los límites ni los parámetros hidráulicos del acuífero. La DGA está actualmente realizando el estudio hidrogeológico del acuífero de Pica, lo que sin duda aportará información nueva y actualizada.

2.3.5. Subcuenca Chacarilla

La subcuenca Chacarilla no cuenta con ninguna estación de monitoreo. La DGA registra el nivel piezométrico en un pozo de monitoreo ubicado aguas abajo en el abanico de la Quebrada de Chacarilla.

Solo un estudio trata de la hidrología de la Quebrada de Chacarilla [173]. Asimismo, existe otro estudio que describe la perforación de un pozo profundo en la parte más baja de la Quebrada de Chacarilla [198] que permitió reconocer 827 metros de rellenos cenozoicos soportados en el basamento Mesozoico regional impermeable. Este último ha sido perforado hasta los 882 m bajo la superficie. Se identificaron 168 m de estratos permeables con acuíferos potencialmente importantes entre los 261 y 821 m. El nivel estático se ha sido estimado a 130 m de profundidad.

Houston (2002) estudió la crecida de enero del 2000, la cual se originó como consecuencia de un evento hidrometeorológico en el Altiplano, estimándose un caudal máximo en 450 m³/s (\pm 50 m³/s). Asimismo, Houston observa que la crecida originó infiltraciones en el abanico aluvial, la cual recargó los acuíferos como se demuestra con el aumento del nivel de agua en el pozo de monitoreo al pie del abanico de 0,45 m lo que representa un evento de recarga de 25 Mm³. La tormenta que dio origen a esta recarga tiene un periodo de retorno de 4 años, de modo que la recarga anual media es equivalente a 200 l/s. La respuesta de la cuenca de captación se ha establecido como no lineal con retroalimentación positiva, de modo que eventos aún menos frecuentes entregan una recarga proporcionalmente mayor. Esta relación directa entre las fluctuaciones del nivel y los eventos climáticos deja en evidencia que las disminuciones del nivel de las aguas subterráneas a largo plazo pueden tener su causa en las variaciones climáticas [173].

En la tabla 28 se detallan los parámetros de la cuenca, estimados por diferentes fuentes. La estimación de la precipitación es cerca de los 90 mm/año.

Tabla 28. Balance hídrico de la subcuenca Chacarilla (por fuente).

Ítem	DGA, 1987	JICA, 1995	DICTUC, 2006b
Área cuenca (km ²)	1.297	1.221	1.550
Precipitación (mm/año)	129	89,2	87
Evaporación (mm/año)	126	-	83
Caudal superficial (l/s)	130	159	111
Recarga subterránea (l/s)	-	-	168

Los estudios hidrogeológicos de la Pampa del Tamarugal [88; 193; 102; 105] consideran un caudal de recarga desde la subcuenca de Chacarilla entre 125 y 168 l/s.

2.3.6. Subcuenca Ramada y Chipana

La subcuenca Ramada y Chipana están ubicadas en el extremo sur de la Pampa del Tamarugal, en las cuales no hay presencia de estaciones de monitoreo.

En la tabla 29 se detallan los parámetros de la cuenca estimados por diferentes fuentes. La estimación de la precipitación es similar en JICA (1995) y DICTUC (2008) (de 31 a 50 mm/año).

Tabla 29. Balance hídrico de la subcuenca Ramada y Chipana (por fuente).

Ítem	DGA, 1987	JICA, 1995	DICTUC, 2006b
Área cuenca (km ²)	414	244	472
Precipitación (mm/año)	75,4	49,42	31
Evaporación (mm/año)	74,6		30
Caudal superficial (l/s)	10	7	8
Recarga (l/s)			10

Los estudios hidrogeológicos de la Pampa del Tamarugal [88; 193; 102; 105] consideran un caudal de recarga desde la subcuenca Ramada y Chipana inferior a 10 l/s.

2.3.7. Acuífero Pampa del Tamarugal

Los recursos hídricos subterráneos de la Pampa del Tamarugal han sido objeto de interés desde la época salitrera debido a su gran importancia para el desarrollo socio-económico de la Región de Tarapacá.

Las tres unidades geológicas más importantes desde el punto de vista hidrogeológico son los sedimentos cuaternarios, la Formación Altos de Pica (rocas sedimentarias y volcánicas terciarias) y las rocas del basamento [42; 193]. Los rellenos sedimentarios permeables de mayor interés hidrogeológico **se encuentran en la Formación Altos de Pica**, la cual está distribuida sobre toda la Pampa con espesores que aumentan de norte a sur desde 100 metros en la franja norte [193] hasta 270 metros en las zonas donde se ubican los salares [107], y disminuye gradualmente hacia el este y oeste del acuífero [107]. El espesor total de los sedimentos pertenecientes a esta Formación pueden alcanzar los 700 m de profundidad en el Salar de Pintados [193]. Sin embargo, los rellenos inferiores no presentan mayor interés hidrogeológico y se han considerado como el límite inferior del acuífero [107].

A grandes rasgos, es posible diferenciar temporalmente dos tipos de depósitos: materiales terciarios (depósitos de ante-arco controlados por fallas entre los cuales se intercalan algunos ni-

veles volcánicos; su espesor sobrepasa los 1.000 m en algunas zonas) y cuaternarios (depósitos aluviales, coluviales, evaporíticos y eólicos, constituidos principalmente por gravas, arenas medias a finas en una matriz de arenas muy finas y limos). En el modelo geológico conceptual se ha considerado, dependiendo de las fuentes, uno o dos estratos (un acuífero inferior con un espesor de 25 a 175 m constituido por gravas y arenas (Q3) y un acuífero superior con un espesor de 25 a 225 m constituido por arenas, gravas, y arcillas (cf. *Modelos hidrogeológicos*) [107]. JICA (1995) considera Q3 y Q4 como un solo cuerpo, ya que no se identificaron capas impermeables entre los dos estratos [193].

El acuífero Pampa del Tamarugal se define como **no confinado** [193] aunque Billinghamurst (1893) y Castillo (1960) describen pozos artesianos en la zona central de la Pampa. DICTUC (2007b) describe zonas confinadas en el acuífero superior (Q4) en algunos sectores.

Los límites del acuífero varían según los estudios (cf. *Procesamiento y análisis de la información. Modelos hidrológicos e hidrogeológicos*): al norte, el estudio JICA (1995) define como límite la cuenca hidrográfica de la Quebrada de Aroma y DICTUC (2007b), la Quebrada de Tiliviche; al sur, el límite está definido por Cerro Gordo (límite con el acuífero de Sur Viejo el cual está conectado con el extremo sur oriente de la Pampa) [105]; el límite oriental del acuífero corresponde por un lado a las fallas ubicadas al oeste de Pica y Tarapacá de acuerdo a lo definido en el estudio JICA [193], o a la cota aproximada de 1.300 ± 100 m s.n.m. en donde se incluyen las posibles zonas de infiltración de la recarga subterránea y los límites administrativos del polígono del acuífero establecido por la DGA [105]; el límite oeste corresponde al contacto entre los sedimentos que rellenan la cuenca y las rocas impermeables de la Cordillera de la Costa. Esta última Formación (Cordillera de la Costa) constituye un límite natural y actúa como barrera para el flujo subterráneo que desciende desde el este hacia el oeste desde las zonas de recarga.

Las dimensiones del acuífero según JICA (1995) son de 130 km de norte a sur y de 13 a 46 km de este a oeste [193].

Origen y edad del agua

Desde los primeros estudios hidrogeológicos de la Pampa del Tamarugal, ciertos autores indicaron una posible recarga del acuífero desde el Altiplano por flujos subterráneos profundos [193; 197; 218; 271]. Otros estudios afirman que el agua subterránea de la Pampa es en su totalidad fósil, y por lo tanto de volumen y capacidad limitada (no renovable) [156; 314]. Margaritz *et al.* (1990) demuestra la existencia de flujos profundos desde el Altiplano (por la marca isotópica ligera del agua) co-

rrespondiendo a una recarga originada en el Altiplano y en la Cordillera de los Andes, a gran altura. Aún así, al igual que en el Altiplano, la Precordillera presenta altitudes entre los 4.500 a 5.000 m s.n.m.

Grilli *et al.* (1999) utilizan datos isotópicos para demostrar que el agua de Pica proviene de la Precordillera (zona Altos de Pica), pero que no existe una conexión entre Pica y el Salar del Huasco. Tröger & Gerstner (2004) corroboran la poca probabilidad de una conexión entre el Salar del Huasco y Pica. La situación tectónica demuestra que la zona de recarga para los mantos de Pica está situado en los Altos de Pica. La química de las aguas de la Pampa del Tamarugal indica un mecanismo de descarga hacia el Salar de Pintados que estaría relacionado con las diaclasas en el sector de los Altos de Pica [271]. El estudio JICA [193] es el único que tiene en cuenta, en la estimación de la recarga de la Pampa del Tamarugal, un flujo subterráneo proveniente del Salar del Huasco y otras cuencas vecinas. Lo cuantifica en 289 l/s que corresponde a la discrepancia positiva del balance hídrico en el Salar del Huasco.

A base del análisis del Carbono 14, aun con dificultades metodológicas, se ha determinado que gran parte de los recursos hídricos subterráneos provienen de la fase húmeda Taucá, comprendida entre 17.000 y 11.000 años (Pleistoceno) y/o de crecidas durante el Holoceno que comprende los últimos 11 784 años, desde el fin de la última glaciación [15; 218].

Evolución histórica de los niveles

Los registros más antiguos de niveles datan de 1915⁹ aunque la perforación de pozos se menciona en el estudio de Billinghamurst (1893)¹⁰. Posteriormente, existen registros en 1947 donde se realizaron las mediciones del nivel en 41 pozos [310], así como en 1957.

Castillo (1960) observa un ascenso de los niveles de varios metros (hasta 10 m en el norte de la Pampa (de Zapiga a Huara) en base a los niveles piezométricos disponibles desde 1915. Atribuye esta variación al cierre de las faenas salitreras desde 1939 en adelante (cese de las extracciones de agua). De Huara a Canchones, en donde existían ya pozos de extracción, se observa un descenso en los niveles de 1 a 7 m, mientras que la zona de Pintados demuestra una mayor estabilidad. Con la información de 1957, Castillo (1960) realiza un mapa piezométrico de la Pampa del Tamarugal, el cual ha sido usado como referencia para la calibración de los modelos hidrogeológicos de la Pampa del Tamarugal, ya que está considerado como el mapa que refleja el estado natural del acuífero por las consideraciones anteriormente expuestas (cf. *Procesamiento y análisis de la información. Modelos hidrológicos e hidrogeológicos*).

⁹ "Nomenclatura de los pozos de agua de la región salitrera de Tarapacá" realizado por la Delegación Fiscal de Salitreras en 1915.

¹⁰ Perforación de un pozo de 161 metros en La Tirana.

Álamos & Peralta (1980) constatan el proceso de recarga actual del acuífero, observando las fluctuaciones interanuales de niveles (que no superan los 0,5 m de variación), con niveles más bajos en invierno y más altos en verano. Asimismo, estas fluctuaciones son más acentuadas en la zona oriente de los salares que en las zonas adyacentes a la Cordillera de la Costa, lo que coincide con las áreas de recarga. JICA (1995), por lo contrario, constata que no se perciben cambios estacionales en el nivel del agua subterránea.

Alamos & Peralta (1984) realizan la medición de los niveles de agua subterránea en 120 puntos durante 1983 y 1984, distribuidos entre los Salares de Zapiga, Pintados, Bellavista y el sector Esmeralda, cuyos registros se compararon con los datos registrados durante el periodo 1968-1973 (sin hacer referencia al estudio de Castillo (1960); con los datos no se realizó un mapa piezométrico). A partir de esta información, se aprecia una tendencia general a

un moderado descenso. Los niveles de agua subterránea en los acuíferos de Zapiga, Bellavista y Pintados no han sufrido mayores alteraciones en 16 años analizados (1968-1984). El aumento de extracción en Canchones por parte del Servicio Nacional de Obras Sanitarias (SENDOS) provocó un descenso en los niveles de 4 m en el interior del recinto, y de 2 m en sus inmediaciones hasta un radio de aproximadamente 2 km. Por otro lado, en el sector de La Esmeralda se presentan descensos y ascensos del nivel. Asimismo, se aprecia una posible recarga en el mes de junio 1984 asociada a las altas precipitaciones de los meses anteriores.

JICA (1995) reporta la medición del nivel estático en 160 pozos de la Pampa del Tamarugal entre octubre y noviembre del año 1993, cuyos datos permitieron la realización de un mapa piezométrico. En este mapa se aprecia que el nivel del agua se reduce gradualmente hacia el sur (gradiente $\approx 2\%$). JICA (1995) observa que el cambio histórico del nivel freático se ha reduci-

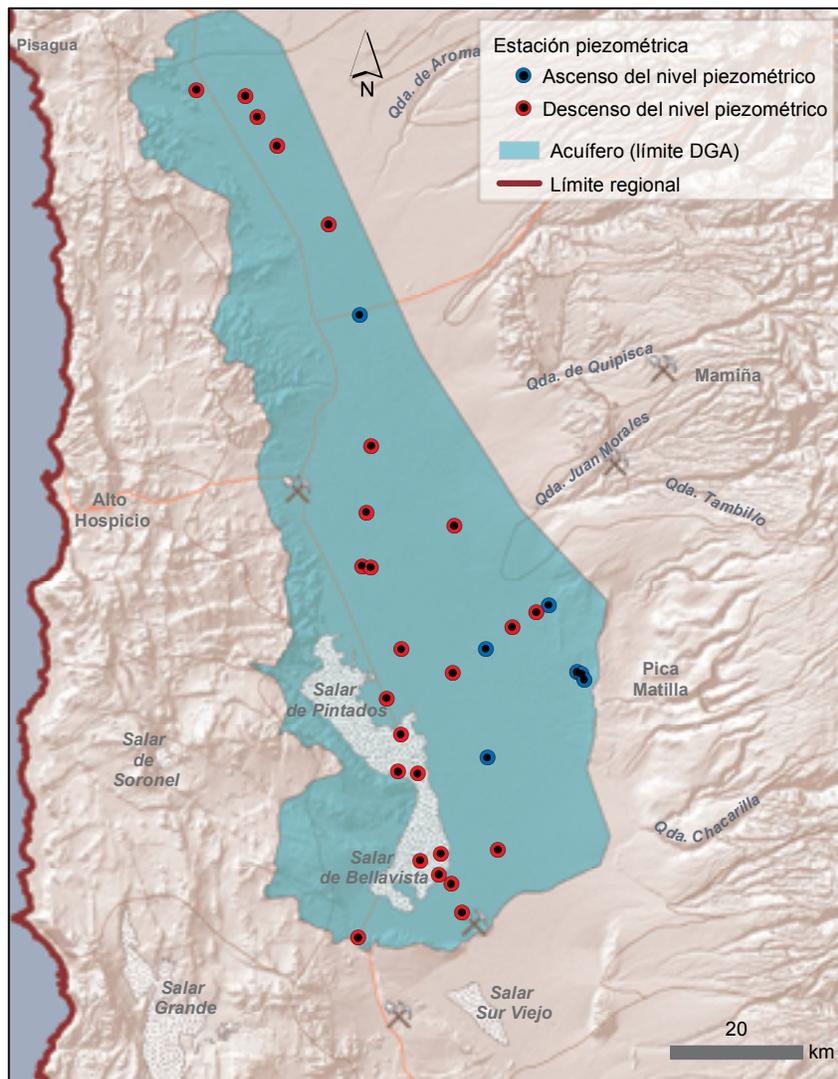


Figura 36. Ubicación de los pozos de monitoreo de la DGA en el acuífero Pampa del Tamarugal y variación del nivel estático en el periodo de registro.

do a razón de 7 cm/año en promedio, durante años recientes (1985-1993), lo que representa un descenso menor en comparación con la capacidad del acuífero [193]. Asimismo, de acuerdo a este estudio se nota que la extracción del agua en Canchones no provoca un descenso significativo del nivel del agua en áreas circundantes.

DICTUC (2007b) realiza un mapa piezométrico con datos de 65 pozos de monitoreo, para lo cual realizó un estudio topográfico para definir con precisión las cotas de los pozos medidos (datum PSAD 56).

La comparación de los mapas piezométricos realizados por JICA (1995) y DICTUC (2007b), muestran un descenso generalizado en el sector norte y central de la Pampa (mayor en Huara y Canchones), mientras que al sur se aprecia una estabilidad incluso aumentos en ciertos puntos.

En los 35 pozos de monitoreo de la DGA vigentes en el acuífero Pampa del Tamarugal (figura 36), es notable destacar que la mayoría de los pozos muestran un descenso del nivel estatico del acuífero, con descensos comprendidos entre -0,46 m (Pozo JICA G) desde el año 2000 y -4,71 m (Pozo Salar de Pintados - Tirana) desde el año 1988 (figura 37). A pesar de este descenso generalizado, se distinguen siete pozos cuyo nivel estatico muestra un ascenso comprendido entre +0,05 m (Pozo Puquio Nuñez) desde el año 2000 y +12,62 m (Pozo Chacarilla) desde el año 1992 (figura 38). La mayoría de los pozos que muestran un ascenso están ubicados en el sector sur y central, preferencialmente en el sector oriental de la Pampa del Tamarugal (figura 36).

Actualmente el CIDERH está realizando un mapa piezométrico actualizado de la Pampa del Tamarugal con la medición del nivel de 160 pozos durante los periodos octubre-noviembre de 2012 y abril-mayo de 2013, con el fin de evidenciar posibles fluctuaciones por las precipitaciones ocurridas durante la temporada estival.

2.3.8. Cuenca Pampa del Tamarugal

Recarga

Precipitación

En la cuenca Pampa del Tamarugal se registran datos meteorológicos de manera continua solo en las subcuencas de Tarapacá y Quipisca-Juan Morales. Es notable la ausencia de datos en la mitad sur y en el extremo norte de la cuenca Pampa del Tamarugal (figura 39).

El 80% de la precipitación total anual ocurre en el periodo diciembre-marzo. Asimismo, se presenta otro máximo local de valores de precipitación entre los meses de junio-agosto. Por otro lado, se observa que los años secos y húmedos coinciden con el registro respectivo de los caudales, de manera que un periodo de pocas precipitaciones como 1965-1970, es seguido por un periodo de bajos caudales en esos mismos años aunque con menor amplitud [102]. Del mismo modo, DICTUC (2006b) considera que la precipitación es un buen indicador del com-

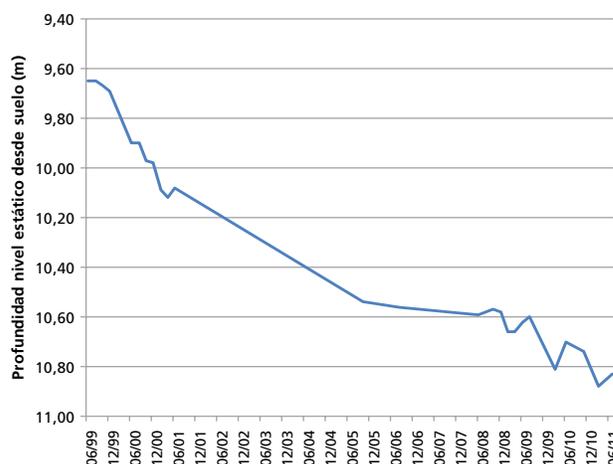


Figura 37. Serie cronológica de la variación del nivel estático en el pozo JICA 3.

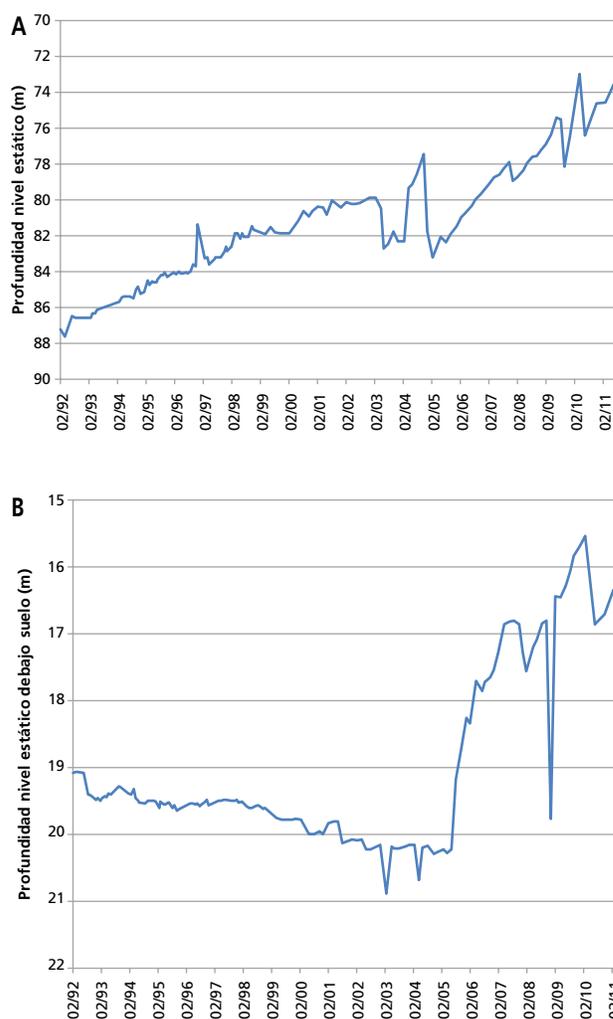


Figura 38. Serie cronológica de la variación del nivel estático en los pozos de Chacarilla (A) y La Calera 3 (B).

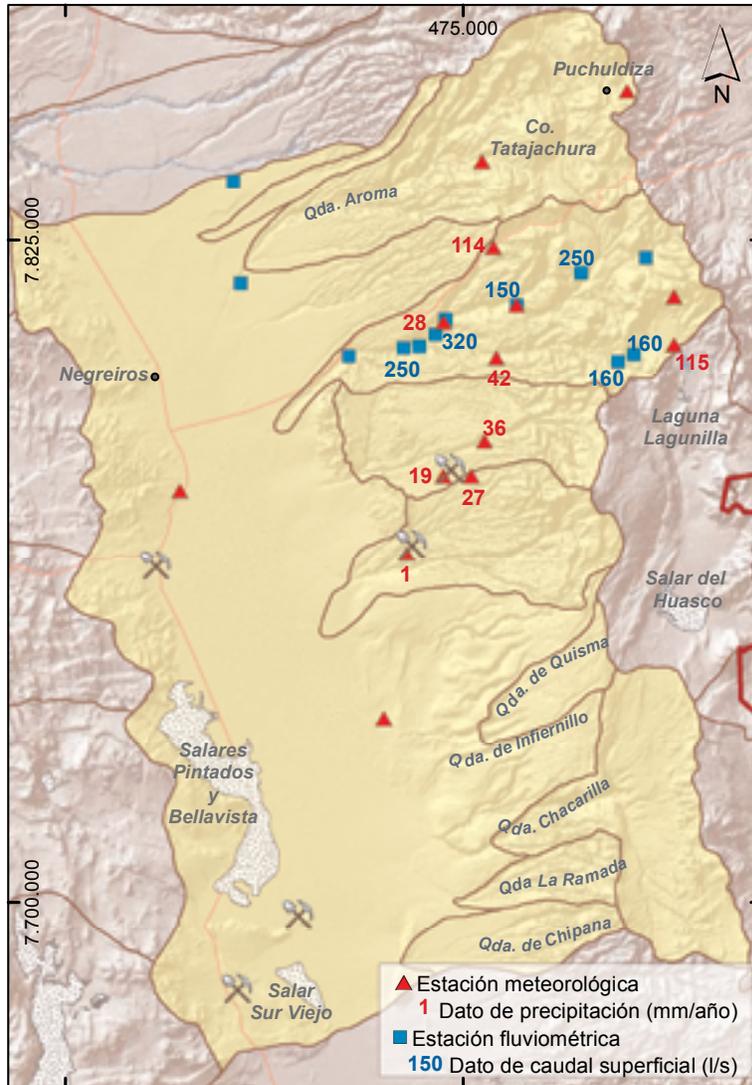


Figura 39. Mapa con valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudal superficial (l/s) en estaciones de monitoreo DGA.

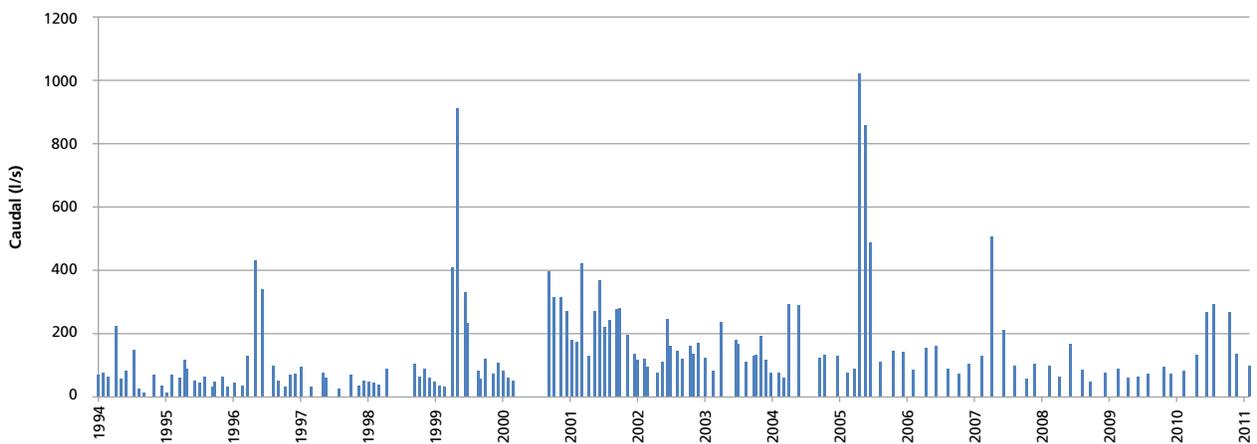


Figura 40. Serie cronológica de caudales registrados en la estación Tarapacá en Sibaya.

Tabla 30. Recarga al acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente).

Subcuencas	DICUC 1988	DICTUC, 1994	JICA, 1995	DICTUC, 2006b
Aroma y otras (Soga)	250	236	310	273
Tarapacá	385	324	318	295
Quipisca y Juan Morales	206	86	161	110
Quisma	30	25	21	24
Chacarilla	125	206	159	168
Ramada y Chipana	6	16	7	10
Flujo subterráneo profundo (desde altiplano)	-	-	289	-
Total Pampa del Tamarugal	1.002	893	1.265	880

portamiento de los caudales y que los métodos indirectos de transformación de las precipitaciones en caudales son una buena alternativa para estimar cuantitativamente los escurrimientos superficiales y así sustituir la carencia de información.

Escorrentía

En cuanto a la fluviometría, existen registros continuos solo en la subcuenca Tarapacá (figura 39 y 40). Por otra parte, en Aroma, Quipisca y Juan Morales, Chacarilla y Ramada-Chipana se encontraron en la literatura aforos puntuales en su mayoría antiguos [42; 179; 235].

La mayoría de las estaciones en las quebradas no logran medir los caudales de crecida. Estos caudales tienen alta probabilidad de contribuir a la recarga de la Pampa aunque no se ha cuantificado ni tampoco caracterizado el mecanismo de recarga.

En conclusión, la recarga del acuífero Pampa del Tamarugal se produce desde el borde oriental del acuífero, con un caudal entorno a los 1.000 l/s según lo estimado por la mayoría de los estudios.

Aun así, es importante recalcar que la recarga de la Pampa del Tamarugal se estima solo en base a los datos generados en la Quebrada de Tarapacá. Si bien han evolucionado las metodologías utilizadas para estimar las variables hidrológicas en cuencas sin registro (mapa de isolíneas, análisis estadístico y modelos hidrológicos), existen discrepancias en las áreas de las cuencas tomadas en cuenta para el cálculo. Por lo tanto, existen todavía muchas incertidumbres en la estimación de la recarga.

Las máximas recargas se ubican al norte de la Pampa del Tamarugal en las quebradas de Aroma y Tarapacá con aproximadamente un 65% de la recarga total, mientras sus superficies de drenaje corresponden alrededor de un 46% de las superficies. Las quebradas Tarapacá, Aroma y Chacarilla contribuyen un 80% de la recarga al acuífero Pampa del Tamarugal [102] (tabla 30 y figura 41).

Según DICTUC (2006b), se puede establecer una relación lineal aproximada entre las recargas específicas de las cuencas

y su altura media. Por las cifras expuestas, casi la totalidad de los recursos se evapotranspiran desde el suelo y sólo 4,9 mm de un total de 122,9 mm escurren superficialmente. Esto equivale a un gasto continuo de 0,99 m³/s.

Descarga

El sistema acuífero presenta cuatro tipos de descargas naturales: la más importante corresponde a la transpiración de los Algarrobo y Tamarugos. El segundo corresponde a la evaporación desde los sectores en

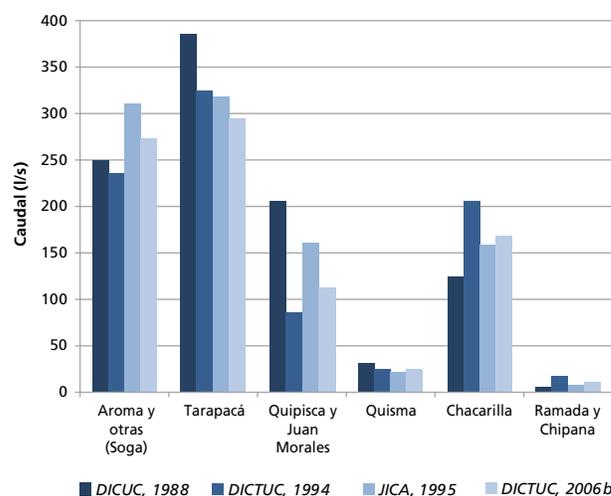


Figura 41. Caudales de recarga de las subcuencas al acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente).

donde la napa se encuentra más cerca de la superficie (principalmente en los salares de Bellavista y Pintados). El tercer mecanismo de descarga corresponde al flujo subterráneo en los límites norte y sur del acuífero, y en el sector suroeste donde se conecta subterráneamente con el acuífero La Noria. Finalmente, existe una descarga artificial que corresponde al bombeo en los pozos de captación desde el año 1960 hasta la fecha.

Evaporación

La evaporación es una de las componentes más importantes del ciclo hidrológico de zonas áridas. De la precisión de su cuantificación depende la precisión del balance hídrico de las cuencas y cuerpos de agua de la región. Errores en su estimación puede llevar a subestimar o sobrestimar la recarga [62]. La medición de la tasa de evaporación permite estimar y/o corroborar la recarga de acuíferos donde la evaporación es el principal componente de descarga. Tradicionalmente, la evapo-

ración se estimaba a partir del balance hídrico, lo que propiciaba cometer muchos errores [175]. Varios estudios se dedicaron a la medición de la evaporación pero resulta difícil comparar los resultados obtenidos en estos estudios debido a las diferencias en las metodologías implementadas, la estación del año considerada, la presencia o no de neblina, etc. [104]. Aun así, la tabla 31 recoge los resultados obtenidos según la fuente considerada. Las zonas potenciales de evaporación son los ríos, vertientes, salares grandes, áreas extensivas de suelo después de un evento de precipitación no frecuente [175] y desde suelos cuando el agua es somera, es decir, cuando el agua se encuentra a menos de 6 metros de profundidad [104]. En este caso, la evaporación varía exponencialmente con la profundidad [104]. La profundidad de extinción para el caso de las arenas es de 6 m, mientras que para las arcillas es de 1,5 m [104].

Los diferentes métodos utilizados para la medición de la evaporación desde el nivel freático se basan en métodos indirectos los cuales se fundamentan en los gradientes térmicos y en la humedad relativa, cálculo de flujo y método isotópico, desarrollando los perfiles verticales de Oxígeno 18 (^{18}O) en el suelo no saturado [104].

En el norte de Chile, una de las metodologías para evaluar el volumen de agua disponible para constituir nuevas fuentes de aprovechamiento de agua se basa en la tasa de evaporación. Consiste en disminuir la evaporación a través de intercepciones del flujo subterráneo hacia las zonas de evaporación [274].

Los salares de Bellavista y Pintados son las zonas principales donde ocurre la evaporación en el acuífero Pampa del Tamarugal por las profundidades someras del agua subterránea. Cuando el nivel freático está cerca de la superficie y/o en suelos húmedos, la tasa de evaporación depende de las condiciones meteorológicas y del poder evaporante de la atmósfera [154]. Cuando los suelos son suficientemente secos, la evaporación depende de las propiedades del suelo [274] en especial a su capacidad de conducción [154]. Durante el día, desde las 07:00 horas, se forma una capa impermeable que impide el escape del vapor desde el suelo. Al transcurrir el día, la humedad gaseosa escapa desde el suelo hacia la atmósfera entre las 20:00 y las 7:00 horas [274].

Existen diferentes métodos de medición de la evaporación:

- El tanque evaporímetro para el cual es necesario realizar una corrección mediante un coeficiente de embalse¹¹ [104].
- El método isotópico, el cual considera los perfiles verticales de ^{18}O en el suelo no saturado para calcular las

tasas de evaporación desde el nivel freático. Se mide las proporciones de ^{18}O en diferentes profundidades para desarrollar el respectivo perfil vertical¹².

- El domo es un instrumento que permite obtener mediciones confiables de la tasa de evaporación desde el agua subterránea [244]; es una metodología sencilla y relativamente barata respecto a otros métodos de medición basados en principios similares. Tiene la desventaja que su metodología se basa en mediciones puntuales (no se pueden realizar mediciones continuas), requiriendo extensas campañas de medición.

Para no producir sobrestimaciones de las tasas de evaporación, la delimitación de la superficie activa de la evaporación debe ser bien detallada [273].

La evaporación es la variable más compleja de medir y sigue existiendo incertidumbre en la determinación de este parámetro.

En la Depresión Intermedia (Pampa del Tamarugal), no existen cuerpos de agua superficiales permanentes; la tasa máxima de evaporación representativa para la Pampa del Tamarugal esta medida en la estación meteorológica de la UNAP en Canchones por medio de un tanque evaporímetro, en el cual se calculó un valor promedio de **4,46 mm/d** en la zona de Canchones con una evaporación total de **162 l/s** [104]. El valor medio anual de la evaporación calculado en la estación Cerro Colorado es cerca de 2.500 mm/año.

Transpiración

La vegetación en la cuenca Pampa del Tamarugal es escasa pero alberga un bosque endémico nativo y forestal de Tamarugos.

La tasa de transpiración del Tamarugo aumenta hasta su edad adulta (50 años). Esta tasa de transpiración es estimada en 0,3 mm/árbol/día¹³.

Existen discrepancias entre las diferentes fuentes (tabla 32) en cuanto a la estimación de la tasa de transpiración: Rojas (2005) estima tasas de evapotranspiración de 210 l/s para el año 1960, 690 l/s para los años 1980-1985, 904 l/s para los años 1985-1993. Estos valores no coinciden con las tasas reportadas en el estudio DICTUC (2007b) en el cual se entrega una tasa total de 224 l/s [105] que alcanzará un valor constante de 440 l/s a partir del año 2020 [105]. JICA (1995) estima para los Tamarugos una evapotranspiración de 1.109 l/s y un aumento proyectado de 1.523 l/s en el 2015.

Descargas por flujos subterráneos

Las descargas subterráneas en la Pampa del Tamarugal han sido descritas de forma dispar por diversos estudios: en el extre-

¹¹ Sobrestimación de la evaporación por el calor que concentra el material del estanque.

¹² Zimmermann et al. (1987) estudió la evaporación en base a los contenidos isotópicos de ^{18}O los cuales presentan un decrecimiento exponencial de ^{18}O con la profundidad. Allison et al. (1983) han extendido este estudio a zonas homogéneas e isotermales / no isotermales. En este método, se nota que la variación diaria del flujo de evaporación ocurre en los 50 cm debajo de la superficie siguiendo el ciclo atmosférico diario.

¹³ Acevedo et al., 2007

Tabla 31. Comparación de la evaporación desde los salares de la Pampa del Tamarugal y del Salar de Llamara (por fuente).

Fuente	Periodo de mediación	Lugar	Evaporación	Comentarios
Castillo, 1960	-	-	2.000 l/s (Salares), 1.200 l/s (Suelo)	-
Toro, 1967 ⁽ⁱ⁾	Octubre 1966 – marzo 1967	Pintados	0,89 mm/d	Profundidad nivel freático: 0,9 m
		Canchones	0,45 mm/d	
		Junoi	0,17 mm/d	
		Lo Gatica	0,008 mm/d	
Niemeyer, 1980	-	-	-	-
Grilli, 1985 ⁽ⁱⁱ⁾	Enero 1984	Bellavista	0,44 mm/d	Profundidad nivel freático: 1,5 m
			0,60 mm/d	Profundidad nivel freático: 1,0 m
Grilli, 1986 ⁽ⁱⁱⁱ⁾		Salar de Bellavista	200 l/s	Estimación E=E(Z)
		Salar de Pintado	90 l/s	Estimación E=E(Z)
Grilli, 1986 ^(iv)	Abril-Mayo 1986	Bellavista	8,23 mm/d	Desde tanque A (profundidad nivel freático: 0)
			2,63 mm/d	Profundidad nivel freático: 1.02 m
			1,01 mm/d	Profundidad nivel freático: 1,83 m
			3,56 mm/d	Profundidad nivel freático: 4 m
DGA, 1987		Suelo	45,5 mm/a	
		Superficie regada	1,70 mm/a	
		Salares	0,50 mm/a	
Tyler, 2002	Agosto	Llamara	0,89 mm/d	0,9 m
Lanino, 2005	1995-2003	Canchones	9.3 mm/d	Desde tanque A (profundidad nivel freático: 0)
DICTUC, 2007a ^(v)	Diciembre 2006	Bellavista y Pintados	162 l/s	
PUC, 2009	4 años	Huara en Fuerte Baquedano	3.043,1 mm/a	Evaporación media estación DGA

ⁱ Medición con lisímetro de 2 m de diámetro y 1,50 m de profundidad.

ⁱⁱ Valores medios anuales. El periodo de análisis seleccionado corresponde al comprendido entre los años hidrológicos (noviembre-octubre) 1961/1962 a 1980/1981.

ⁱⁱⁱ Mediciones de gradientes de humedad y temperatura en el perfil del suelo.

^{iv} Mediciones realizadas mediante técnicas isotópicas (teoría del fraccionamiento isotópico), simulando y ajustando el modelo teórico a valores ¹⁸O de agua contenida en el perfil no saturado de suelo.

^v DICTUC, 2007a: Método del domo (mediciones directas del flujo de vapor de agua desde el acuífero).

mo norte del acuífero Pampa del Tamarugal, existe un flujo drenado por la quebrada de Camiña [88] cuya dirección principal de flujo es de sur a norte, cuantificado en 18 l/s [88; 105]. Este suceso se reconoce en un afloramiento de agua subterránea

localizado en el extremo noroeste del acuífero de la Pampa.

Al sur del acuífero (Cerro Gordo) se presenta una diferencia de nivel importante entre los pozos ubicados al norte y al sur de la línea Cerro Gordo –afloramientos rocosos al este–, lo que se interpreta como una desconexión hidrogeológica entre los acuíferos Pampa del Tamarugal y Sur Viejo [88]. En este lugar ha sido cuantificada una descarga subterránea de 98 l/s, siendo la más importante de las descargas subterráneas [105]. En el sector de La Noria, en el límite este de la Pampa del Tamarugal, DICTUC (2007b) identifica un flujo saliente este-oeste desde el acuífero

Tabla 32. Evolución de la tasa de evapotranspiración de los Tamarugos (según fuente).

	1960	1980-1985	1985-1993	2006	2015	2020
Rojas, 2005	210	690	904	-	-	-
DICTUC, 2007b	-	-	-	224	-	440 ⁽ⁱ⁾
JICA, 1995	-	-	1.109	-	1.523 ⁱ	-

⁽ⁱ⁾ Valor constante.

ro Pampa del tamarugal hacia el acuífero La Noria por medio de fallas inferidas (cuantificado en 18 l/s). El estudio JICA (1995) no considera la descarga subterránea del acuífero Pampa del Tamarugal.

Demanda y Usos

Cuenca Pampa del Tamarugal

Existen, a la fecha, 722 DAA subterráneos en la cuenca Pampa del Tamarugal correspondiendo a un caudal otorgado de 4924 l/s y 178 DAA superficial, cual caudal otorgado se desconoce.

Acuífero Pampa del Tamarugal

Castillo (1960) reporta una extracción desde pozos de captación de aguas subterráneas equivalente a 140 l/s. Por otro lado, DICUC (1988) reporta una extracción total en la Pampa del Tamarugal de 716 l/s. Asimismo, JICA (1995) reporta una demanda contemporánea de agua total de 1.192 l/s y futura de 2.746 l/s debido al aprovechamiento de agua municipal en Iquique para uso doméstico, irrigación, minería, etc.

Basándose en el estudio JICA (1995), DGA (1996) determinó el volumen disponible de agua en el acuífero el cual se estimó en un 5% del volumen embalsado en un plazo de 20 años¹⁴. De igual forma, la DGA estimó la demanda del recurso en base a los derechos constituidos junto con el factor de uso previsible, observando que el acuífero está en estado de leve sobreexplotación. Permitted constituir más derechos hasta alcanzar el caudal disponible. DICTUC (2007b) estima en 3.155, 6 l/s el caudal otorgado.

En el año 2009, la DGA declara el acuífero Pampa del Tamarugal como área de restricción¹⁵.

Teniendo en cuenta lo anterior, DGA (2011) presenta una actualización de la oferta y la demanda del acuífero Pampa del Tamarugal, comparando la oferta estimada por el estudio JICA (1995). El estudio consideró aumentar la superficie del acuífero y cambiar criterios, específicamente eliminar el factor de uso previsible para derechos constituidos¹⁶. La demanda aumentó en comparación a la calculada en el año 2009. Del análisis efectuado, se llegó a la conclusión que la demanda en el acuífero supera con creces a la oferta, por lo tanto, se mantuvo la condición de restricción y además se recomendó el no otorgamiento de derechos provisionales.

En base a la digitalización y escaneo de expedientes de la DGA realizado por CIDERH en el año 2012, se contabilizó 339 Derechos de Aprovechamiento de Aguas subterráneos (DAA) otorgados en el acuífero Pampa del Tamarugal, correspondiendo a un caudal otorgado máximo¹⁷ de 4.094 l/s.

Asimismo, existen 119 pozos de extracción en el acuífero de la Pampa del Tamarugal y 19 en el acuífero del Salar de Sur viejo, los cuales corresponden a uso minero y de agua potable.

La evolución de la demanda de agua en el acuífero Pampa del Tamarugal se muestra en la figura 42.

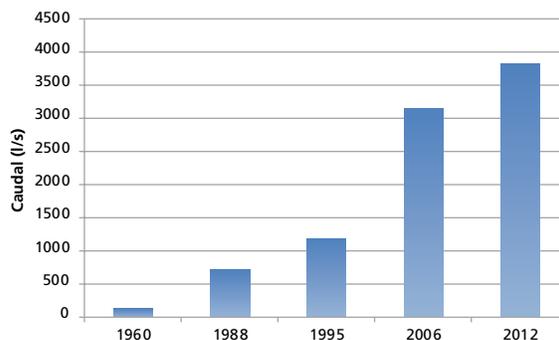


Figura 42. Evolución de la demanda en el acuífero Pampa del Tamarugal.

La repartición de los DAA por usos se muestra en la figura 43.

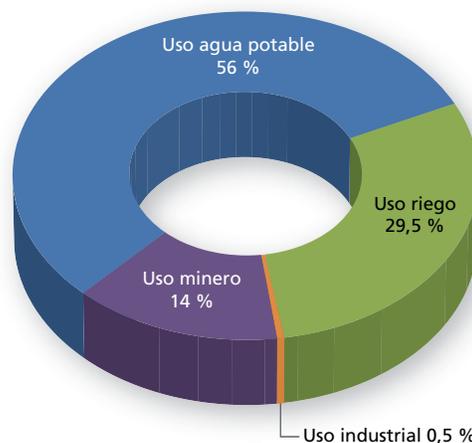


Figura 43. Repartición por usos de los DAA en el acuífero Pampa del Tamarugal.

Subcuencas de la cuenca Pampa del Tamarugal (excepto Quisma)

La mayoría de los DAA aprobados en las subcuencas son superficiales, salvo en la subcuenca de Quipisca (un DAA subte-

¹⁴ JICA estima que dada la inexistencia de recurso subterráneo renovable, la magnitud del volumen embalsado y la gran demanda de agua, explotar el 5% del volumen embalsado es una medida racional y responsable que permite satisfacer en gran medida la demanda de agua sin comprometer la vida del acuífero.

¹⁵ Mediante la Resolución DGA N° 245 de 30 de diciembre de 2009.

¹⁶ Ley N° 20.017 del año 2005.

¹⁷ Valor máximo que otorga el Juez de Letras a la solicitud tipo NR.

rráneo), de Juan Morales (tres DAA subterráneos que corresponden a un caudal otorgado de 2,2 l/s a CMCC) y de Chacarilla (dos DAA subterráneos que corresponden a 32 l/s para uso minero). El acuífero de Sur Viejo tiene 16 DAA subterráneos que corresponden a un caudal otorgado de 190 l/s, de los cuales el 94% está destinado a uso minero.

Acuífero de Pica

El aprovechamiento vía extracciones de agua subterránea era del orden de 90 l/s en 1962, 150 l/s en 1979 y 270 l/s en 1995 (figura 44).

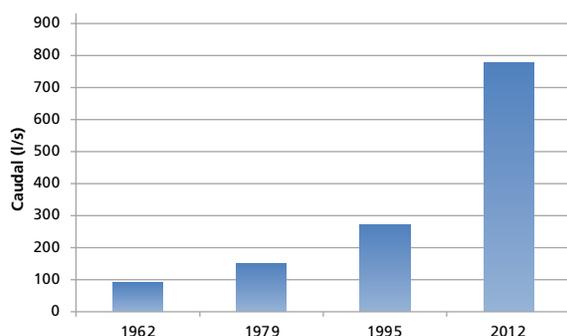


Figura 44. Evolución de la demanda en el acuífero de Pica.

En el 2012, existe un total de 342 DAA subterráneos en el acuífero de Pica, que corresponde a un caudal otorgado de 777 l/s (805 l/s considerando el caudal solicitado, valor máximo que podría otorgar el Juez de Letras a la solicitud para el cálculo total. Ver Capítulo II. Demanda y uso del agua).

Descarga total del acuífero Pampa del Tamarugal

La tabla 33 detalla los diferentes caudales de descarga según las fuentes consideradas:

Tabla 33. Descarga del acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente)

	DICUC, 1988	JICA, 1995	DICTUC, 2007b
Evaporación (l/s)	286	145	162
Transpiración Tamarugos (l/s)	690	904	224
Extracciones (l/s)	716	730	2325
Flujos subterráneos (l/s)	-	-	Norte 18
			Sur 98,8
			Noria 18,1
Total Pampa del Tamarugal (l/s)	1.692	1.779	2.846

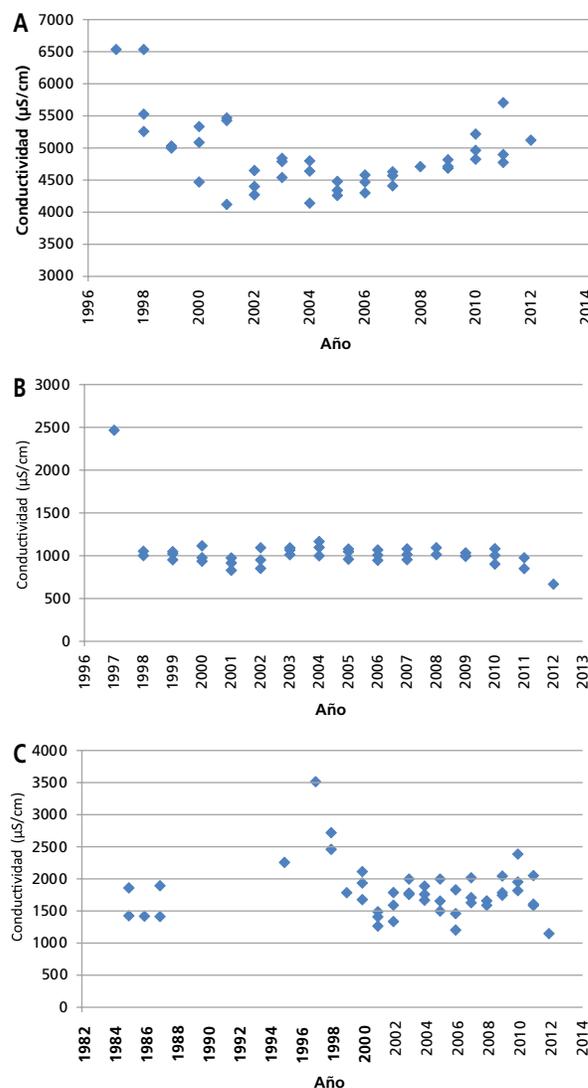


Figura 45. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica, en aguas de la quebrada Aroma (A), río Coscaya en Saitoco (B) y quebrada Tarapacá en Laonsana (C).

2.4. CALIDAD DEL AGUA

Para interpretar la calidad de las aguas en la Pampa del Tamarugal, se deben de considerar las características geomorfológicas de este sector, ya que dichas particularidades condicionan ciertos factores de importancia a tener en cuenta. Los terrenos con pendientes y suelos impermeables permiten que los sistemas lóticos fluyan a velocidades considerables, desfavoreciendo la evaporación y el no contacto entre agua y cuerpo rocoso (procesos de lixiviación) [217], lo que propicia una calidad química de las aguas constante en el tiempo. En la figura 45 se aprecia la escasa variabilidad de la salinidad, expresada como conductividad de las aguas para tres quebradas cuyos valores se han recogido en la red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA.

Tabla 34. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en estaciones de monitoreo DGA en quebradas y aguas termales en la Cuenca Pampa del Tamarugal.

Pozo / Río / Quebrada	Item	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	B (mg/l)	As (mg/l)	Mn (mg/l)
Pozo quebrada Aroma	Año Inicio	1997	2000	1998	1997
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	n	41	35	35	41
	MIN	4130	11	0,015	0,01
	MAX	6550	78	2,22	1,2
	\bar{x}	4873	33,1	0,167	0,18
	σ	546	13,4	0,38	0,22
	Datos Elim.	0	2	1	0
Río Coscaya en Saitoco	Año Inicio	1997	2000	1998	1997
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	n	42	36	41	42
	MIN	678	2	0,167	0,02
	MAX	2480	8	0,525	2,61
	\bar{x}	1045	3,8	0,244	0,15
	σ	247	1,05	0,07	0,39
	Datos Elim.	0	0	0	0
Quebrada Tarapacá en Loansana	Año Inicio	1985	1985	1985	1997
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	n	47	42	45	41
	MIN	1158	3	0,01	0,01
	MAX	3530	9,3	0,6	0,66
	\bar{x}	1807	6,6	0,089	0,15
	σ	413	1,44	0,08	0,18
	Datos Elim.	1	0	0	0
Pozo Quebrada de Chacarilla	Año Inicio	1997	2000	1998	1997
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	n	39	33	37	39
	MIN	1104	7	0,012	0,01
	MAX	1543	13	1,08	1,93
	\bar{x}	1356	7,9	0,679	0,15
	σ	76	1,25	0,20	0,31
	Datos Elim.	2	1	0	0

En la tabla 34 se recogen los principales estadísticos para parámetros como el Arsenico (As), Boro (B) y el Manganeso (Mn) en distintos puntos de la red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA (2010). En esta tabla se aprecia que todos los analitos mencionados sobrepasan la norma de concentración admisible para consumo humano.

Por otro lado, la tabla 35 recoge los principales parámetros hidroquímicos de las aguas termales de la zona. Entre las termas señaladas, se destacan las termas de gran actividad turística en la zona, siendo las de Chuzmisa, Mamiña y Pica las que presentan una excelente calidad, sin embargo, en Puchuldiza las aguas presentan una salinidad y unas concentraciones de As muy elevadas (12 mg/l).

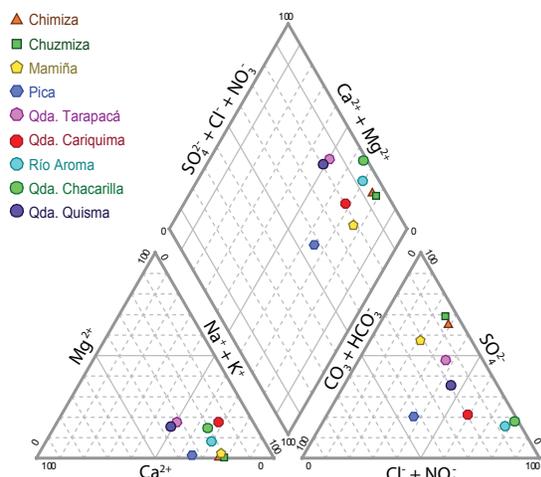


Figura 46. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas de las quebradas y las aguas termales de la Pampa del Tamarugal.

La figura 46 muestra el diagrama triangular (o de Piper) de los principales constituyentes iónicos de las quebradas y las aguas termales, en la cual se aprecia que las aguas de la que-

brada de Tarapacá y Quisma presentan aguas de buena calidad, predominando los iones Na^+ y SO_4^{2-} , así como las aguas de Pica del tipo $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$ se diferencian de otras aguas termales como Chumisa y Mamiña las cuales son de tipo $\text{Na}^+ / \text{SO}_4^{2-}$.

Las aguas subterráneas de la Depresión Intermedia presentan gran variabilidad en cuanto su calidad se refiere, ofreciendo diversos usos de acuerdo a dicha propiedad. En general, las aguas infiltradas se mueven subterráneamente hacia el sur de la cuenca en cuyo trayecto es de esperar que la salinidad aumente de norte a sur. Entre las características principales del agua en esta zona, se destaca el sector de Pintados en donde el agua es dulce con una elevada concentración de As (tabla 36 y 37).

En la tabla 37 se exponen algunos parámetros relacionado con la calidad del agua del acuífero Pampa del Tamarugal. Por otro lado, la figura 47 presenta la geoquímica para el acuífero Pampa del Tamarugal, en la cual se evidencian aguas del tipo $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ y $\text{Na}^+ / \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ en los pozos de la red de monitoreo de la DGA y de JICA, aunque el pozo de la Colonia Pintados (JICA G), exhibe aguas del tipo $\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+ / > \text{HCO}_3^-$ (datos registrados en la red de monitoreo de la calidad de aguas de la DGA; ídem [193]).

Tabla 35. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en aguas termales de la cuenca de la Pampa del Tamarugal.

Termas	STD (mg/l)	pH	Temperatura (°C)	Iones dominantes		As (mg/l)	B (mg/l)	Fuente
				Cationes	Aniones			
Puchuldiza	4.850	6,6	85-90	Na^+	Cl^-	12	82	DGA 1978-2010; Hauser, 1997
Chimisa	602	8,2	80-90	Na^+	SO_4^{2-}	0,27	2,1	DGA 1978-2010; Hauser, 1997
Chusmisa	612	6,9	40-46	Na^+	SO_4^{2-}	0,06	0,24	Magaritz <i>et al.</i> , 1989; DGA 1978-2010; Hauser, 1997
Mamiña	462	8	45-57	Na^+	SO_4^{2-}	0,02	1	Dingman & Galli, 1965; DGA 1978-2010; Hauser, 1997
Pica	193	7,4	34	Na^+	HCO_3^-	0,01	0,3	Dingman & Galli, 1965; DGA 1978-2010; Hauser, 1997

Tabla 36. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en la cuenca Pampa del Tamarugal (aguas de las quebradas y ríos).

Río / Quebrada	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Iones dominantes		As (mg/l)	B (mg/l)	REF
			Cationes	Aniones			
Quebrada Aroma	4.100	8,25	Na^+	Cl^-	0,6		Magaritz <i>et al.</i> , 1989
Río Aroma en Ariquilda	3.956	8,38	Na^+	$\text{Cl}^- \sim \text{HCO}_3^-$	3,4	24	Magaritz <i>et al.</i> , 1989
Quebrada Tarapacá	1.614	7,7	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$	0,04	5,2	Magaritz <i>et al.</i> , 1989
Quisma Vertiente Carmen	1.037	7,8	$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$	SO_4^{2-}	0	2,1	Dingman & Galli, 1965
Quebrada Chacarilla	8.600	8,6	Na^+	Cl^-	Alto	Alto	Magaritz <i>et al.</i> , 1989
Río Chacarilla	6.052	8,2	-	-	0,02	25	Magaritz <i>et al.</i> , 1989

Tabla 37. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y las concentraciones de arsénico y boro en la "Pampa del Tamarugal-Subcuencas- Aguas Pozos.

Pozo	STD (mg/l)	pH	Iones dominantes		As (mg/l)	B (mg/l)	Fuente
			Cationes	Aniones			
Pozo Dolores	876,8	8,03	Na ⁺	Cl ⁻	0,13	6	Risacher <i>et al.</i> , 1998
Pozo Negreiros	1936	7,54	Na ⁺ > K	Cl ⁻	0,18	19	Risacher <i>et al.</i> , 1998
Pozo Almonte Cala-Cala	2350	7,36	Na ⁺	Cl ⁻	0,43	15	Risacher <i>et al.</i> , 1998
Pozo Colonia Pintados	554	8,15	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	0,4	3	Risacher <i>et al.</i> , 1998
Pozo DGA B-254	68080	10,8	Na ⁺	Cl ⁻	0,1	21	JICA, 1995
Pozo La Tirana	1388	7,5	Ca ²⁺ > Na ⁺	SO ₄ ²⁻ > Cl ⁻	0,03	6,2	JICA, 1995

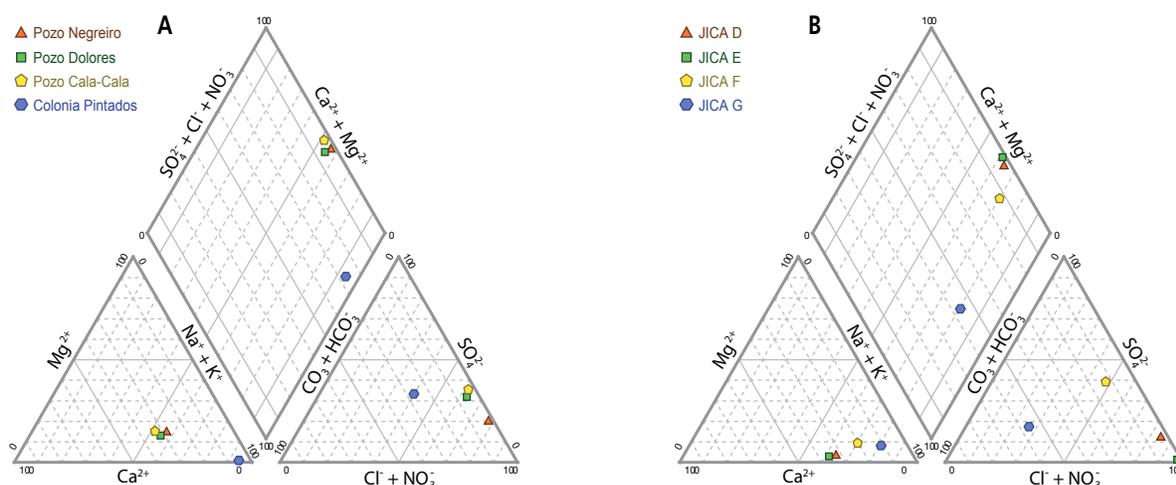


Figura 47. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas de algunos pozos de la Pampa del Tamarugal (A) y algunos pozos JICA (B).

2.5. CONCLUSIÓN

La tabla 38 muestra el balance hídrico del acuífero Pampa del Tamarugal estimado por los diferentes estudios consultados. Más allá de las variaciones en la estimación de la recarga y la descarga, el resultado del balance muestra una tendencia desde los últimos 50 años, considerando que en 1960 el acuífero Pampa del Tamarugal se considera en estado natural (equilibrio) debido a las mínimas extracciones existentes.

Tabla 38. Balance hídrico del acuífero Pampa del Tamarugal, por fuente.

Tabla 38. Balance hídrico del acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente).

	Castillo, 1960	DIDUC, 1988	JICA, 1995	DICTUC, 2007b
Recarga media (l/s)	4.000	1.002	1.265	880
Descarga total (l/s)	3.600	1.692	1.779	2.846
Balance (l/s)	400	-690	-514	-1.966

JICA (1995) es el único estudio que hace proyecciones a largo plazo. En dicho estudio se proyecta una estimación de la reducción total en el almacenamiento de agua subterránea en 23 años desde 1993 hasta el 2015 en un 3,7% del almacenamiento total; el volumen disponible es considerado suficientemente grande como para satisfacer la demanda futura del recurso. Su desarrollo está restringido por la calidad más que por la cantidad.

En la actualidad, y desde los años 80, el balance hídrico de la Pampa del Tamarugal muestra un déficit creciente, demostrando que hasta la fecha se está haciendo un uso del recurso no renovable del acuífero.

A la fecha, no existe una proyección a largo plazo de la disponibilidad del recurso en la Pampa del Tamarugal. El EIA "Pampa Hermosa" realizado por DICTUC para SQM en el año 2008, solo proyecta el impacto de la extracción del caudal otorgado a SQM en la zona de influencia de los pozos de captación.

3. ZONA LLAMARA – RÍO LOA

3.1. INTRODUCCIÓN

3.1.1. Estudios

Pocos estudios han descrito la hidrología e hidrogeología de la cuenca del Salar de Llamara (figura 48), aunque la mayoría de los estudios en la cuenca han sido generados para la empresa SQM en el marco del EIA "Pampa Hermosa"¹⁸, y del Plan de Seguimiento Ambiental implementado desde entonces.

Son 18 los estudios que generan información sobre los recursos hídricos de la cuenca Salar de Llamara y cuatro los que

integran la cuenca a un estudio generalizado de la depresión central de la Región de Tarapacá o del norte de Chile (figura 49). Los estudios más antiguos (1970-1980) [179; 200; 235] no mencionaban el Salar de Llamara (ya que se omitía este lugar al pasar de la Pampa del Tamarugal al río Loa y al Salar de Atacama respectivamente), o bien solo mencionaban la quebrada de Guatacondo como límite sur de la Pampa del Tamarugal.

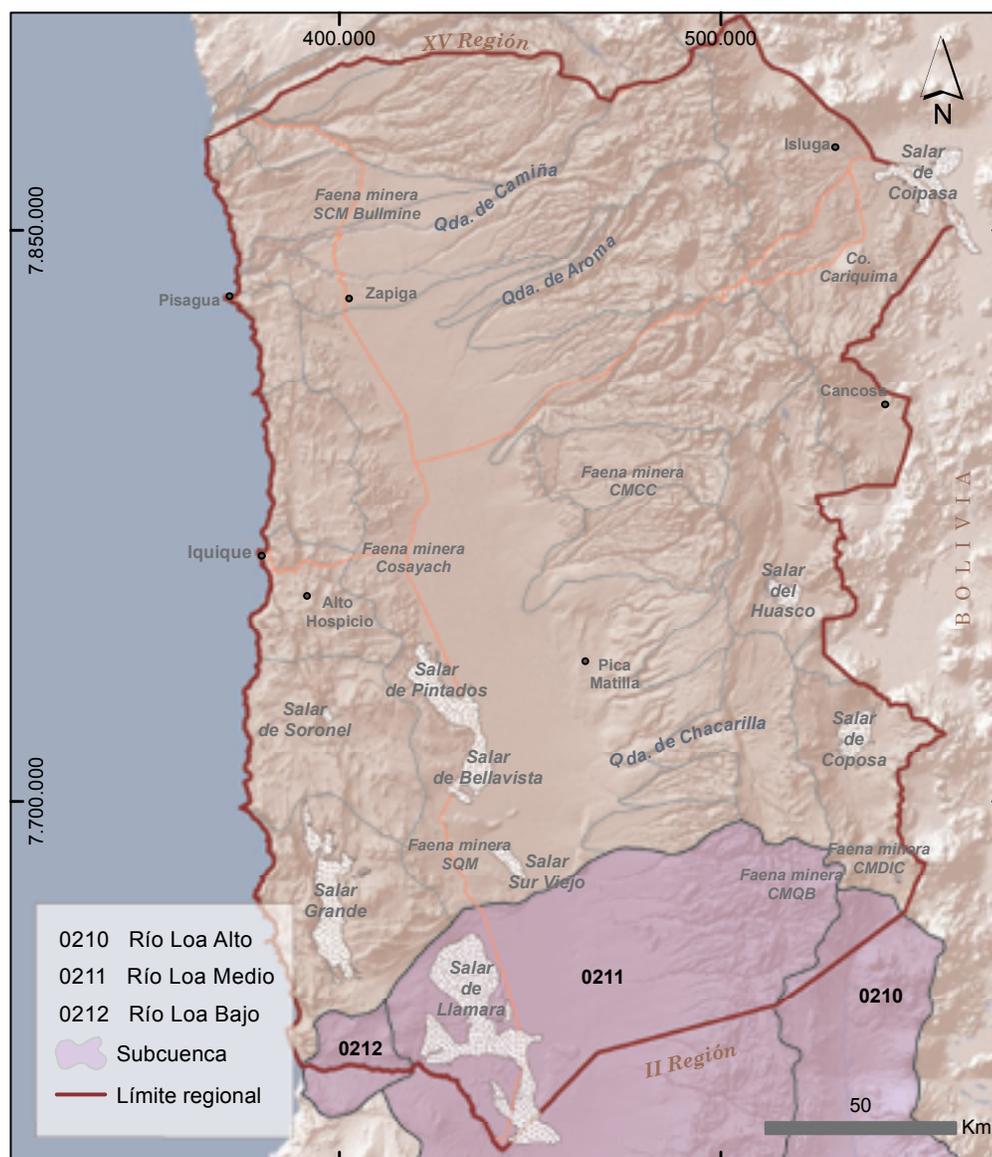


Figura 48. Delimitación de unidades hidrográficas de Llamara - Río Loa según DGA (2000).

¹⁸ DICTUC (2003); DICTUC (2005b); DICTUC (2006a); DICTUC (2006b); DICTUC (2007a); DICTUC (2007c); DICTUC (2007e); DICTUC (2008b)

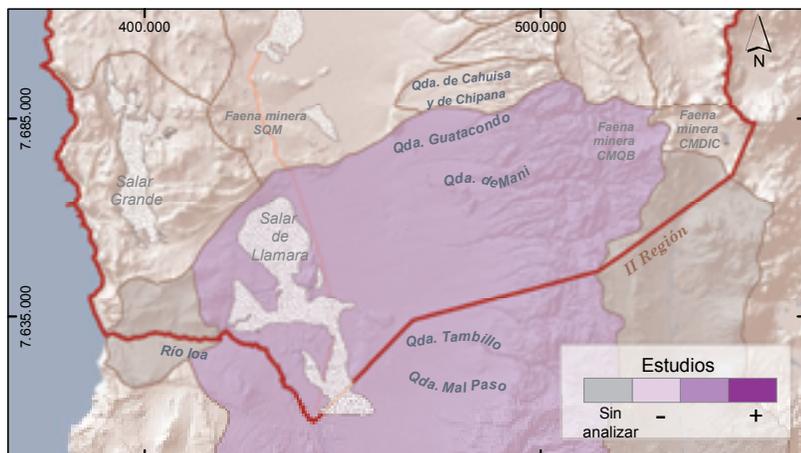


Figura 49. Zona hidrográfica Llamara - Río Loa clasificadas según la cantidad de estudios existentes.

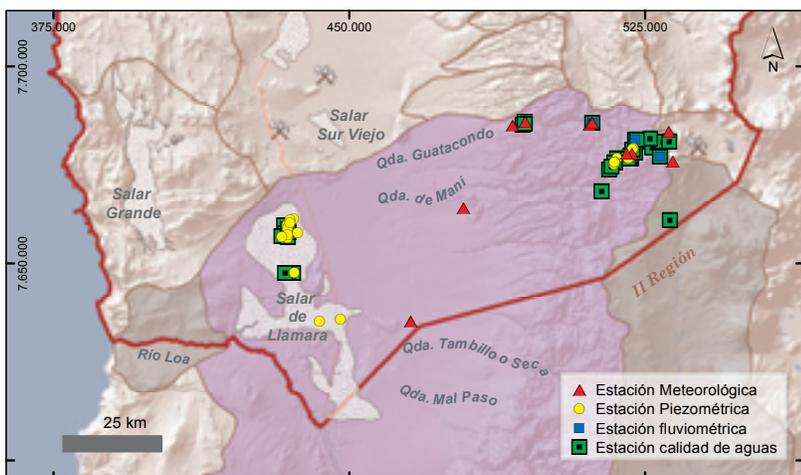


Figura 50. Mapa de estaciones de monitoreo y valores medios anuales de precipitación en la zona Llamara - Río Loa.

Los primeros estudios se dedicaron a describir las cuencas y sus características hidrográficas, indicando cuando corresponden valores de precipitación y aforos de escurrimientos [208]. IRH (1983) estima algunos valores medios de precipitación y de caudales.

La geoquímica de las salmueras del Salar de Llamara generó diversos estudios [68; 211; 210]. En particular se destaca el estudio "Utilización de Técnicas Isotópicas en Hidrología de zonas áridas. Aplicación en la provincia de Iquique, I Región" de Peña et al. (1985). La CORFO (1981) evalúa de manera preliminar el potencial del Salar de Llamara en sales inorgánicas de interés comercial. Concluye que no existen salmueras ni sales inorgánicas de interés a excepción de la anhídrita encontrada en este lugar.

En la parte alta de las quebradas de Guatacondo y Maní, se localizan las mineras CMDIC y CMQB, lo que llevó a la genera-

ción de datos e información en el marco de los EIA de las respectivas empresas. Por otro lado, la hidrogeología de la quebrada de Guatacondo fue estudiada en el marco de una memoria de la Universidad Católica del Norte [242].

En el año 2003 a solicitud de la compañía SQM, DICTUC realizó el estudio denominado "Estudio Hidrogeológico del Salar de Llamara, I Región" [95]. El estudio contempló el análisis de antecedentes geológicos e hidrogeológicos obtenidos de la construcción y habilitación de una serie de pozos, así como de trabajos realizados en el marco de diversas concesiones de exploración. Los resultados aquí obtenidos fueron complementados con estudios geológicos, geofísicos, hidrológicos e hidrogeológicos, con sus respectivas campañas de terreno.

Los estudios DICTUC (2003); DICTUC (2005b); DICTUC (2006a); DICTUC (2006b); DICTUC (2007a); DICTUC (2007c); DICTUC (2007e); DICTUC (2008b), parte del EIA "Pampa Hermosa" realizado para SQM entre el año 2006 y 2008. Representan los estudios que han generado más datos e información sobre la cuenca, a pesar de que no se generaron datos en las subcuencas afluentes (Guatacondo, Maní, Mal Paso y otras).

Por otro lado, la DGA realizó tres estudios para definir los DAA susceptibles de otorgar en el acuífero del Salar de Llamara en los años 1997 [118], 2006 [121] y 2009 [122].

3.1.2. Datos

Redes de monitoreo

La red de monitoreo de la DGA está constituida por estaciones meteorológicas y fluviométricas. No existen pozos de monitoreo de la DGA en el Salar de Llamara y solo la quebrada de Guatacondo tiene registros meteorológicos y fluviométricos.

En la cuenca del Salar de Llamara existen un total de (figura 50):

- Cinco estaciones meteorológicas vigentes, de las cuales dos pertenecen a la DGA (quebrada de Guatacondo).
- Tres estaciones fluviométricas vigentes de las cuales una pertenece a la DGA (quebrada de Guatacondo).
- 22 pozos de monitoreo (observación) vigentes, aunque no hay ninguno de la DGA.
- 27 estaciones de calidades de agua vigentes, de las cuales uno pertenece a la DGA (quebrada de Guatacondo).

Tabla 39. Características del modelo hidrogeológico del acuífero de Llamara, realizado por DICTUC (2007c).

FUENTE		DICTUC (2007c). Modelo de la evolución del nivel de la napa en el acuífero de Llamara. En: <i>Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa</i> . Sociedad Química y Minera de Chile S.A.			
DESCRIPCIÓN DEL MODELO		Modelo numérico (determinístico) del acuífero Salar de Llamara, desarrollado con el programa <i>ModFlow</i> a través de su interfaz gráfica <i>Groundwater Vistas</i> . Los límites del modelo quedan condicionados por los bordes impermeables del acuífero, los cuales corresponden a los contactos roca-relleno que delimitan el acuífero, así como por los límites de flujo subterráneo hacia la quebrada Amarga y el río Loa (bordes de dren y río).			
ACUÍFERO	Salar de Llamara	ÁREA MODELIZADA	1.244,24 km ²		
TAMAÑO DE CELDA	200 x 200 m	N° CAPAS	2	N° CELDAS	62.212 (ACT)
CALIBRACIÓN		<p>Se empleó como período base para la calibración en régimen permanente el año 2002, salvo dos sondajes en los que se realizaron mediciones en octubre de 2004. La diferencia en las fechas de estas mediciones no altera la calidad de los resultados, ya que el acuífero Salar de Llamara permaneció sin explotación hasta febrero de 2006. El error de cierre del balance hídrico es de 0,02%.</p> <p>Se ha realizado una validación del modelo ajustando los valores del coeficiente de rendimiento específico y su distribución en el modelo. Para ello se han utilizado 24 puntos de observación del nivel de la napa bajo bombeo. Se ha impuesto un margen de ajuste entre los niveles simulados y los observados de 0,90 m.</p>			
PARÁMETROS					
Kh (m/d)	Kh/ Kv	Ss (l/m)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
0,001-68,396 (Capa superior); 0,1-49,266 (Capa inferior)	10	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁸	1-10	542 (inicial); 466 (resultado de la calibración en régimen permanente)	Evaporación: 6,09 m/d (Tasa inicial), 325,1 l/s (resultado de la calibración en régimen permanente); profundidad de extinción: 6 m para las arenas y 1,5 m para las arcillas (inicial); transpiración de los Tamarugos; 1,9 l/s (resultado de la calibración en régimen permanente); afloramiento hacia la quebrada Amarga: 128,3 l/s (resultado de la calibración en régimen permanente); descarga hacia el río Loa: 10,6 l/s (resultado de la calibración en régimen permanente); explotación de aguas subterráneas: 329,3 l/s.
OBSERVACIONES					
Se destaca de este modelo el hecho de que es el único en su tipo. Se presenta como un punto de partida para desarrollar futuros modelos en la zona, aunque los pozos seleccionados para la calibración y validación presentan una zonación marcada aun cuando se ha realizado una distribución espacial de los parámetros hidráulicos de los acuíferos, por lo que los resultados se ajustan a dicha consideración.					

Modelos hidrológicos e hidrogeológicos

Los modelos desarrollados en la cuenca Salar de Llamara han consistido por una parte en modelos hidrogeológicos (determinísticos) del acuífero de Llamara [106; 96], en modelos hidrológicos relacionados con la estimación de la recarga hacia el acuífero de Llamara junto con el de la Pampa del Tamarugal [102] y en un modelo hidrológico relacionado con el comportamiento del río Loa en la cuenca Salar de Llamara [101].

Las características de los modelos hidrogeológicos se presentan en las tablas 39 y 40.

De los modelos expuestos anteriormente, el modelo realizado por la empresa DSM Minera S.A. ha sido el primero en

considerar en una sola unidad hidrogeológica los tres acuíferos más importantes de la Depresión Central (acuíferos Pampa del Tamarugal, Sur Viejo y Llamara). Asimismo, el contemplar una descarga del acuífero hacia el río Loa, se aprecia deja una incertidumbre en cuanto a las condiciones impuestas en el modelo, ya que no se especifica la cuantificación de dicha descarga.

Por otro lado, en el modelo realizado por DICTUC (2007c) se destaca que es el único en su tipo, ya que se presenta como un punto de partida para desarrollar futuros modelos en la zona, aunque los pozos seleccionados para la calibración y validación presentan una zonación marcada aun cuando se ha realizado una distribución espacial de los parámetros hidráulicos de los acuífe-

Tabla 40. Características del modelo hidrogeológico realizado por DICTUC (2004).

FUENTE	DICTUC (2004). Revisión del Estudio Estación Cerro Gordo: Modelo de Flujo numérico de aguas subterráneas. Houston - DSM Minera, S.A, 2002.				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	Modelo numérico (determinístico) desarrollado en <i>Visual ModFlow</i> mediante el método de diferencias finitas. El modelo se basó en los acuíferos Pampa del Tamarugal, Sur Viejo y Llamara los cuales son considerados como una sola unidad hidrogeológica. Por lo tanto, los límites del modelo quedan definidos por el norte con la quebrada Tiliviche, por el sur con el Río Loa, por el este con la Precordillera y por el oeste con la Cordillera de la Costa. Los límites norte, este y oeste fueron considerados como límites impermeables, mientras que el río Loa (límite sur) fue simulado mediante celdas de dren. La recarga se debió exclusivamente a la producida por las quebradas al este, de manera que se descartó cualquier aporte al norte, oeste y sur del modelo.				
ACUÍFERO	Pampa del Tamarugal, Sur Viejo y Llamara.	ÁREA MODELIZADA	18.960 km ²		
TAMAÑO DE CELDA	500 m – 5 km	Nº CAPAS	1	Nº CELDAS	-
CALIBRACIÓN	<p>Primero se realizó una calibración en régimen permanente con información de niveles de la napa para la década del 60 para el acuífero Pampa del Tamarugal y con información actual para el sector de Llamara, el cual no ha sido explotado a la fecha. El error medio absoluto obtenido de esta calibración es de 2,7 m. Seguidamente se realizó una calibración en régimen no permanente para el periodo comprendido entre 1960 – 1993, con los niveles de la napa para los años 1980, 1983 y 1986 y valores representativos del período 1993 a 1998. El error medio absoluto obtenido en las dos calibraciones fue de 2,7 m.</p> <p>Posteriormente se ha realizado un análisis de sensibilidad en el que se aprecia que el modelo es muy sensible a los cambios en los valores de conductividad hidráulica y muy poco sensible a cambios en el almacenamiento.</p>				
PARÁMETROS					
K (m/d)	Kh/Kv	Ss (l/m)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
0,01 – 10 (resultado de la calibración)	-	-	0,3 (resultado de la calibración)	1.423	Evapotranspiración: 1.786 l/s con una profundidad de extinción de 1 m; descarga en el sur hacia el río Loa: 139 l/s (resultado de la calibración); explotación de aguas subterráneas para después del 2001 es de 1.900 l/s.

ros, por lo que los resultados se ajustan a dicha consideración.

Complementando lo anterior, las características de los modelos hidrológicos se exponen en la tabla 41 y 42.

De estos modelos, el modelo desarrollado por DICTUC (2007c) se considera como el primer modelo realizado en zona no saturada con especial atención en las superficies que definen las cuencas hidrográficas correspondientes. De igual forma, se destaca la utilización de datos medidos en el terreno para la simulación del comportamiento hidrológico característico. Por otro lado, en el modelo realizado en una porción del río Loa por DICTUC (2006a), se subraya que los mayores caudales se registran en el sector de Quillagua independientemente de la probabilidad de ocurrencia. Asimismo, los caudales registrados en la desembocadura son superiores a los registrados en la estación Panamericana, aunque esta tendencia se invierte para caudales medios con una probabilidad de ocurrencia del 1% y un periodo de retorno de 100 años, debido posiblemente a las diferencias hidrológicas que los dos afluentes presentan. Esto pone de manifiesto la necesidad de incorporar más informa-

ción aguas arriba del área de estudio con el fin de visualizar dichos comportamientos en toda la cuenca del río Loa, y así, aproximarse a establecer una tendencia en las crecidas del río como herramienta de gestión.

3.2. HIDROGRAFÍA

La cuenca Salar de Llamara constituye una cuenca hidrográfica endorreica (ningún flujo superficial de agua fluye fuera de la cuenca).

Aun así, la cuenca Salar de Llamara está conectada hidrogeológicamente al sur con el río Loa y la quebrada Amarga (afluente del río Loa), por lo que la DGA la considera como subcuenca de la cuenca del río Loa, aunque es discutible, ya que es una conexión hidrogeológica, no hidrográfica.

Sin embargo, DICTUC (2007c) considera que la cuenca está compuesta por tres subcuencas, las cuales son, aparte de la quebrada de Guatacondo, reagrupaciones de varias pequeñas subunidades (Maní y otras, Mal Paso y otras). Desde el punto de vista fisiográfico, la parte más baja corresponde, como en

Tabla 41. Características del modelo hidrológico realizado por DICTUC (2006b) en la cuenca del Salar de Llamara

FUENTE	DICTUC (2006b). Actualización de la estimación de la recarga, acuíferos de Pampa del Tamarugal y Llamara. En: <i>Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa</i> . Sociedad Química y Minera de Chile S.A.				
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	Modelo de simulación hidrológica basado en el "Modelo Continuo de Estimación de Humedad del Suelo" (SMA) incluido en el programa <i>HEC-HMS</i> . La información necesaria para la modelación hidrológica corresponde a características físicas de las cuencas y la información meteorológica registrada en estaciones vecinas a la cuenca a modelizar. Se ha discretizado el modelo en cinco zonas de acuerdo al proceso hidrológico que se refiere: intercepción superficial, infiltración, almacenamiento en el suelo, percolación y almacenamiento de agua subterránea. El modelo se aplicó a las cuencas afluentes a la Pampa del Tamarugal y el Salar de Llamara, con los parámetros calibrados en las cuencas de Tarapacá y Guatacondo respectivamente, en series de tiempo de 28 y 27 años comprendida entre los años 1978-2005 para la Pampa y 1978-2004 para el Salar de Llamara.				
ACUÍFERO	Pampa del Tamarugal y Salar de Llamara	ÁREA MODELIZADA	2.075 km ²		
TAMAÑO DE BANDA	Bandas de altura 1.000 m por encima de los 2.000 m.s.n.m.	Nº ZONAS	5	Nº BANDAS	3
CALIBRACIÓN	<p>La calibración del modelo consistió en ajustar los valores de los parámetros para reproducir tendencias y valores globales de los escurrimientos superficiales registrados en las cuencas con control fluviométrico en la zona, es decir, la quebrada de Tarapacá y Guatacondo.</p> <p>Se realizó un análisis de sensibilidad del modelo de simulación con el objetivo de establecer el rango de variación que pueden experimentar la recarga y la evapotranspiración desde el suelo.</p>				
PARÁMETROS					
K (mm/d)	Kh/Kv	T (m ² /d)	Sy (%)	RECARGA (l/s)	OTROS
Intercepción superficial: 1.000; flujo subsuperficial: 0,08-2,50; flujo subterráneo: 163-223.	-	-	-	655-1.238 (Total Pampa del Tamarugal); 464-655 (Total Salar de Llamara).	Evaporación: depende de la cuenca analizada; coeficiente de almacenamiento, porcentaje de infiltración hacia el suelo, tasa infiltración máxima, temperatura límite infiltración, capacidad zona de raíces, número de embalses (unidad de simulación).

Tabla 42. Características del modelo hidrológico realizado por DICTUC (2006a) en el río Loa.

FUENTE	DICTUC (2006a). <i>Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa</i> . Sociedad Química y Minera de Chile S.A.		
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	Modelo probabilístico (estocástico) basado en un análisis crítico de las estadísticas fluviométricas de tres estaciones ubicadas en el río Loa (Quillagua, Panamericana y desembocadura), con el objetivo de analizar la consistencia de la información en el periodo de análisis, así como validar la correlación de caudales como método para extrapolar los registros en la zona. Finalmente, con estos resultados se realiza un análisis de frecuencia con el objetivo de obtener caudales medios mensuales asociados a distintas probabilidades de excedencia. Uno de los criterios fundamentales en la discretización de la información disponible, ha sido el impuesto por la Organización Meteorológica Mundial (OMM; http://www.wmo.int) la cual expone que para un análisis de este tipo se debe contar con una serie de datos de mínimo 10 años.		
CUENCA	Río Loa	ÁREA MODELIZADA	Entre Quillagua y desembocadura
CALIBRACIÓN	<p>Primero se ha realizado un análisis de homogeneidad y consistencia de las series fluviométricas por el método de los registros acumulados. Los test de consistencia se realizaron a los caudales medios mensuales con una probabilidad del 90%, comparando cada estación con la estación más próxima aguas arriba para establecer la confiabilidad de los registros longitudinalmente a lo largo del cauce. De este proceso se obtuvo un coeficiente de correlación entre 0,73 y 0,91, lo cual permitió a partir de una expresión matemática de ajuste producto de la correlación, extrapolar los registros en la zona entre estaciones consecutivas en el río.</p> <p>Para el análisis de frecuencia se obtuvieron los estadígrafos básicos realizando un ajuste de la distribución probabilística para cada uno de los meses del año. A través del <i>test Chi cuadrado</i> se estudió la bondad de ajuste de las distribuciones <i>Normal</i>, <i>Log Normal</i>, <i>Valores Extremos</i> y <i>Gamma 2</i>, cuyo proceso de análisis permitió apreciar que la distribución Log Normal fue la función que mejor representó los datos observados.</p>		

el caso de la Pampa del Tamarugal, a la Depresión Central a donde se ubica el salar de Llamara.

La subcuenca del Salar de Llamara tiene escurrimientos permanentes en la parte superior de las quebradas de Guatacondo y de Maní. Estos escurrimientos permanentes se infiltran antes de llegar a la Depresión Central, salvo durante eventos hidrometeorológicos extremos.

3.3. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

3.3.1. Subcuencas Guatacondo, Maní, Mal Paso y otras

La geología en el sector se caracteriza por presentar una secuencia volcánica jurásica a permo-triásica intruida por pórfidos terciarios [242].

En la parte alta de las quebradas de Guatacondo y Maní las unidades hidrogeológicas se definen por tres unidades:

- La primera unidad corresponde a los depósitos aluviales, coluviales y fluvio-aluviales del fondo de la quebrada, caracterizados por presentar una baja permeabilidad ó conductividad hidráulica ($k = 1,13 \times 10^{-4}$ y $1,35 \times 10^{-4}$ cm/s) [21; 242].
- La segunda unidad corresponde a depósitos terciarios del paleocauce los cuales se caracterizan por presentar materiales tipo arenas y gravas con un alto porcentaje de arcilla, lo que reduce sus valores de conductividad hidráulica los cuales varían entre 10^{-5} y 10^{-7} m/s [21; 242].
- La tercera unidad corresponde a la unidad de rocas sedimentarias y volcánicas, las cuales son rocas generadas por procesos hidrotermales en donde se desarrollan mineralizaciones de óxidos de cobre. Asimismo, presenta parámetros hidráulicos heterogéneos (específicamente la permeabilidad secundaria). Las conductividades hidráulicas varían entre $2,46 \times 10^{-4}$ y $2,01 \times 10^{-6}$ cm/s [21; 242].

Por otro lado, en la faena de CMQB se identificaron tres unidades hidrogeológicas las cuales presentan niveles de agua [21], de los cuales uno se encuentra asociado al depósito de gravas terciarias, otro al macizo rocoso fracturado en el supérgeno y un tercero en el hipógeno que se desarrollaría por sectores fracturados afectados por estructuras profundas [21].

En la parte alta de la quebrada de Guatacondo, en donde se emplaza la faena de CMQB, se realizó un mapa piezométrico con los registros de niveles piezométricos monitoreados por la misma compañía junto con los datos medidos en las campañas de terreno realizadas en el año 2011 y 2012 en el marco del EIA 2012 elaborado por la propia compañía [21]. En este mapa piezométrico se aprecia que las líneas de flujo del sector modelizado tienen una dirección de flujo preferencial y a escala

regional de este a oeste, con un gradiente hidráulico del 9%. Por otro lado, la quebrada Blanca actúa como un dren regional que evacua las aguas superficiales y subterráneas.

3.3.2. Acuífero Salar de Llamara

El acuífero del Salar de Llamara se localiza en la depresión intermedia (al igual que la Pampa del Tamarugal), con una extensa llanura longitudinal de 30 a 40 km de ancho y una altura media de 1.000 m s.n.m., caracterizado por una cubeta preterciaria (basamento) con potentes rellenos terciarios y cuaternarios [108].

El límite este del acuífero se definió en el sector occidental de la Precordillera, mientras que el límite oeste está constituido por los afloramientos de rocas impermeables de la Cordillera de la Costa. Los límites norte y sur están definidos por la cuenca Pampa del Tamarugal y el cauce del río Loa, respectivamente [106].

El amplio rango encontrado en las composiciones isotópicas de ^{18}O , al igual que en la Pampa del Tamarugal, demuestra la existencia de diferentes acuíferos con distintas áreas de recarga [254].

Similar al acuífero Pampa del Tamarugal, el acuífero del Salar de Llamara presenta una potencia de varios cientos de metros y está conformado por depósitos cuaternarios y terciarios. El acuífero está constituido por gravas en una matriz arenosa y arcillosa. Esta unidad infrayace a sedimentos finos de tipo arcilla y subyace a niveles de arena y arcilla de pobres características hidrogeológicas [118].

Según los criterios geológicos y geofísicos, se diferencian cinco unidades geológicas en la subsuperficie: el Basamento (metasedimentitas Paleozoicas y rocas sedimentarias Jurásicas), sedimentos terciarios semipermeables, depósitos aluviales y fluvio-lacustres, y evaporitas y depósitos aluviales recientes.

De igual forma, el modelo geológico conceptual se basa en un sistema de dos estratos: un estrato superior de 20 a 70 m de profundidad y un estrato inferior de 200 m en promedio de profundidad. El estrato superior, como en el caso de la Pampa del Tamarugal, presenta en ciertas zonas una permeabilidad muy baja confinando el acuífero. Por otro lado, el estrato inferior presenta las unidades más permeables.

DICTUC realizó un mapa piezométrico de la napa del acuífero en diciembre 2006 [106]; en este mapa se aprecia que el flujo subterráneo del acuífero en el sector norte sigue la dirección este-oeste (líneas de recarga) mientras que en la parte baja del acuífero la dirección del flujo cambia a norte-sur. Por otro lado, al oeste del Cerro Soledad la napa se presenta bastante plana, coincidiendo con la zona de mayor evaporación del salar [106]. En términos generales, la napa se encuentra relativamente cerca a la superficie llegando a aflorar en la zona central del salar en los denominados "puquíos" [106]. El agua subterránea, después de ser fuertemente evaporada, sigue su camino hacia el

sur. Pasado el cerro Soledad, confluye con el agua proveniente de la recarga generada por las quebradas de Mal Paso y otras para descargar en la quebrada Amarga y posteriormente hacia el río Loa. En la zona de la quebrada Amarga se presenta el menor nivel piezométrico de la napa (720 m s.n.m.) donde se produce el afloramiento de agua subterránea [106].

Los puquíos del Salar de Llamara: en el sector central del Salar de Llamara, al oeste del Cerro Soledad, se ubican los únicos cuerpos de agua superficial de la Depresión Intermedia (Pampa del Tamarugal y Salar de Llamara). Son tres los cuerpos de agua principales de superficie máxima de 0,6 ha. Estos cuerpos corresponden al afloramiento de agua subterránea producto del hundimiento del terreno superficial en el que se encuentra. Esta agua subterránea se encuentra en este sector entre 4 y 5 m más bajo que el terreno adyacente [106]. Estos cuerpos presentan una profundidad variable entre 80 y 20 cm.

Evolución histórica de los niveles

La compañía minera SQM S.A. inició un Plan de Seguimiento Ambiental¹⁹ mediante el monitoreo de los caudales de bombeo, niveles de la napa freática y la calidad química del agua subterránea a partir de febrero del 2006, junto al monitoreo específico del nivel del agua en los puquíos desde agosto del 2007. En junio del 2010, el informe de monitoreo elaborado por la consultora Geohidrología [142] constata que debido a la explotación de las aguas del acuífero inferior en los pozos ubicados en el sector norte del acuífero se ha producido una inversión de la componente vertical del flujo subterráneo (antes el acuífero inferior recargaba el acuífero superior; ahora el acuífero superior infiltra sus aguas hacia el inferior). La componente horizontal se vio también afectada (flujo radial hacia los pozos bombeados), incrementando la velocidad del flujo en el acuífero. El radio de influencia de la extracción se estimó en un valor inferior a los tres kilómetros. El descenso máximo observado en los pozos de monitoreo cercanos a los pozos de bombeo era de 8 a 9 metros. Durante el año 2007, se recuperó el nivel de los dos "puquios" monitoreados, después de que ambos cuerpos sufrieron una extracción no autorizada a principios de ese mismo año [142].

3.3.3. Cuenca Salar de Llamara

Recarga

Precipitación

Similar a la cuenca Pampa del Tamarugal, el 80% de las precipitaciones ocurren entre diciembre y marzo en la parte alta de la cuenca.

Los análisis realizados de la precipitación y los escurrimientos superficiales indican que el conocimiento de las precipitaciones en la zona es un buen indicador del comportamiento de los caudales [102].

La estimación de la precipitación para la subcuenca de Guatacondo varía mucho según las fuentes, dificultando la comparación de los datos entre sí (discrepancias en el área de la cuenca considerada). Para Maní y Mal Paso, la precipitación media de la cuenca fue estimada por una sola fuente [102] en 91 y 47 mm/año respectivamente.

Los valores medios anuales de la precipitación estimados por métodos estadísticos o modelos hidrológicos, se localizan en la estación de Collahuasi y oscilan, según las fuentes, entre 133 y 150 mm/año (figura 51).

Escorrentía

Las variaciones de los flujos superficiales a lo largo de las quebradas responden a procesos de recarga y descarga en el relleno aluvial [242] (figura 52).

El flujo base es constante la mayor parte del año salvo en el verano donde aumenta como consecuencia de las lluvias. El caudal de un pequeño bofedal con un flujo inferior a 1 l/s aumentó hasta casi 5 l/s aproximadamente (observación en la quebrada Ciénaga Grande en la campaña de marzo de 2012 [21]).

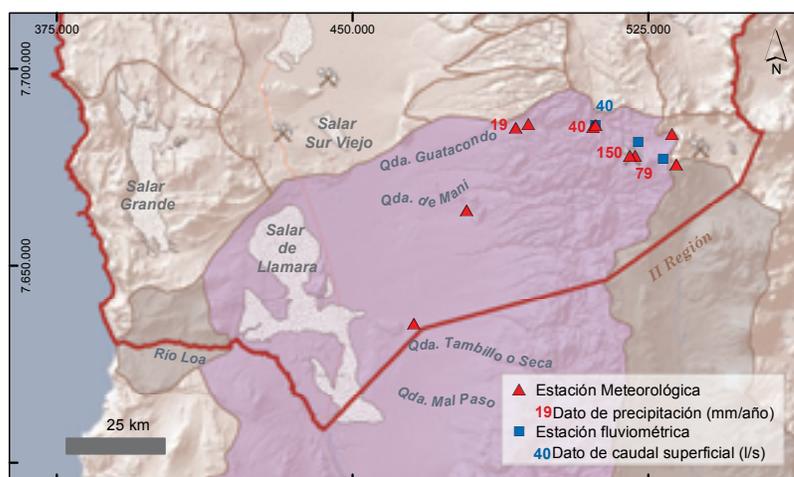


Figura 51. Mapa de valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudales superficiales (l/s) en la zona Llamara - Río Loa.

¹⁹ Para dar cumplimiento a la resolución ambiental N° 32/2005.

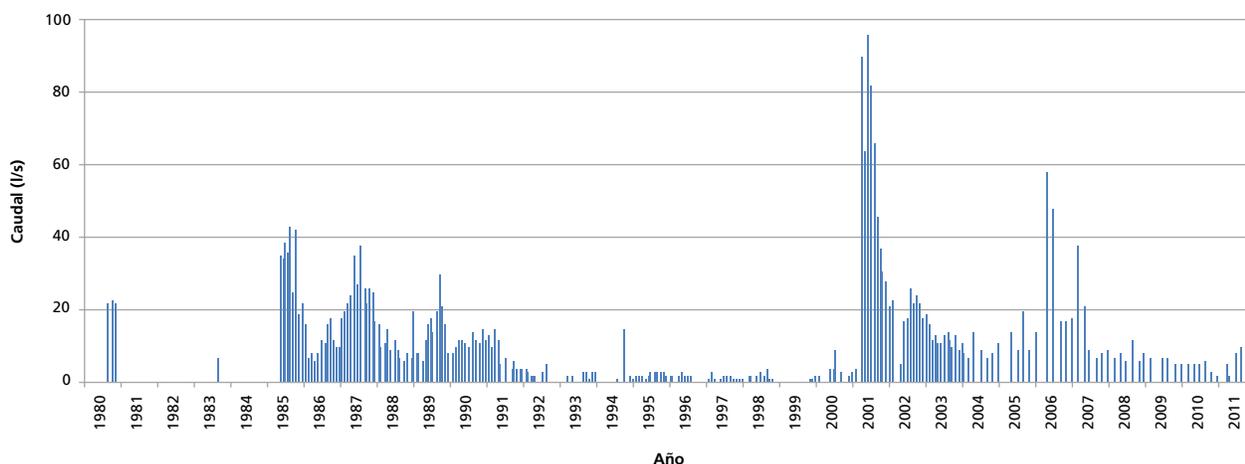


Figura 52. Serie cronológica de los caudales registrados en la estación fluviométrica de Guatacondo en Copaquire.

La descarga asociada a vertientes se manifiesta por la presencia de bofedales y vegas relacionadas con vertientes producidas por cambios de gradientes topográficos, la presencia de sedimentos finos que generan una barrera hidráulica, el control estructural (esencialmente por fallas que interceptan quebradas) y el estrangulamiento de las quebradas que reducen el área de conexión con el acuífero [242].

Existe igualmente mucha discrepancia en la estimación del caudal medio anual, bien por métodos estadísticos o mediante modelos hidrológicos. Dicho caudal varía de 18 a 40 l/s.

Recarga por flujos subterráneos

En las quebradas afluentes, los flujos subterráneos y superficiales se producen por el movimiento del agua a través de fracturas abiertas localizadas en el relleno aluvial, así como por simple escorrentía producida por la saturación del subsuelo en el sector. Orostegui (2005) estimó valores del flujo subterráneo en el relleno aluvial, los cuales varían entre 0,0026 y 0,0064 l/s a lo largo de la quebrada de Guatacondo.

Los flujos subterráneos recargan el acuífero Salar de Llamara desde las quebradas de Guatacondo por el norte y de Mal Paso por el extremo sur. Se descarta una recarga desde el lecho del río Loa por el extremo sur, ya que los afloramientos intrusivos graníticos cretácicos de la zona lo impiden [106].

Recarga total

Las recargas provienen de las precipitaciones que caen en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes [118] en el periodo de enero a marzo durante el denominado Invierno Altiplánico [102; 242]. La recarga del acuífero Salar de Llamara solo ha sido estimada por DICTUC [102] en base a los registros generados en la Quebrada de Guatacondo, ya que es la única subcuenca con estaciones de monitoreo de la DGA tanto fluviométricas como meteorológicas. Asimismo, el modelo conceptual del acuífero asume que la recarga ingresa a través

del flujo superficial, subsuperficial y principalmente como flujo subterráneo [106].

Inicialmente, la estimación de la recarga total al Salar de Llamara (figura 53) era menor, ya que solo se tomaba en cuenta las Quebradas de Maní y Guatacondo. Al integrar la Quebrada de Mal Paso [95], el total de la recarga se estimó entre 500 y 600 l/s, valor que se considera en la actualidad (tabla 43).

Tabla 43. Caudales de recarga de las diferentes subcuencas al acuífero Salar de Llamara en l/s (por fuente).

Ítem	IRH, 1983	DICTUC, 1994	DICTUC, 2003	DICTUC, 2006b
Guatacondo	-	105	122	91
Maní y otras	-	223	291	215
Mal Paso y otras	-	-	202	236
Total Salar de Llamara	350	328	615	542

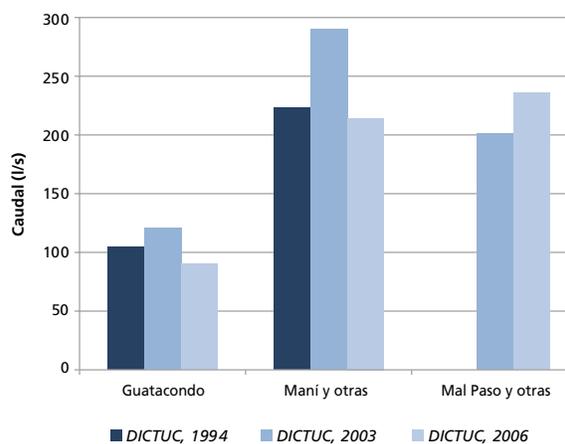


Figura 53. Caudales de recarga de la subcuenca al acuífero Salar de Llamara (por fuente).

Descarga

Evaporación

La evaporación ha sido estimada en 184 l/s (considerando el nivel freático a 5 m de profundidad en un 25% de la superficie total del acuífero, es decir a 115 km²) en 1997 [118] y en 354 l/s (quebrada Amarga más Salar) en el 2006 [104].

Se observa un valor promedio de 5,14 mm/día de evaporación superficial en los *puquíos*, considerado como un promedio de la evaporación en los días "sin neblina" / "con neblina", y para 24 y 48 horas [104]. Del mismo modo, se observó una sobrestimación de la tasa de evaporación producto de la presencia de la neblina matinal. Contrario a lo esperado, se obtuvo una evaporación total diaria menor en diciembre (temporada estival) que en agosto (temporada invernal) en algunos puntos del Salar de Llamara [104].

Transpiración

DICTUC (2007c) censó 3.376 ejemplares de Tamarugos en buen estado y 197 en regular estado. El caudal transpirado por el bosque de Tamarugos se calculó como la tasa de transpiración por árbol adulto, multiplicada por el número de Tamarugos en buen y regular estado. Como resultado se obtuvo una transpiración de 1,9 l/s.

Descarga por flujos subterráneos

Se identificó una descarga subterránea del acuífero del Salar de Llamara hacia el río Loa a través de la quebrada Amarga, la cual fue estimada en 143 l/s [118]. Se observaron afloramientos de agua subterránea canalizados por la quebrada Amarga, la cual se transforma en afluente del río Loa. DICTUC (2007c) estima este flujo en 128 l/s y además, identifica una descarga subterránea directa de menor importancia hacia el río Loa con un caudal de 10,4 l/s.

Aualmente, el caudal en la estación fluviométrica de la DGA en la desembocadura del río Loa es mayor que en la estación fluviométrica Panamericana debido a la descarga de la Quebrada Amarga entre las dos estaciones. Se estimó que a través del río Loa, entre Quillagua y la Desembocadura, discurre como mínimo un caudal promedio anual de 75 l/s aproximadamente [101].

Demanda y Usos

La DGA (1997a), considera factible otorgar 244,7 l/s de acuerdo a la tasa de evaporación en el Salar. Considerando una efectividad del 75%, la tasa resultante era de 184 l/s. Dado que existen derechos asignados en la Quebrada Amarga, la DGA demuestra en 1997 la imposibilidad de otorgar más derechos de aprovechamiento en la cuenca del Salar de Llamara.

La DGA (2006) adecuó las estimaciones de la recarga del acuífero con el fin de determinar el caudal máximo posible a otorgar, de manera que no se sobreexplota el acuífero. El caudal susceptible de ser extraído desde el acuífero del Salar de Lla-

mara alcanzaba un valor de 236 l/s, correspondiendo a la suma de la evaporación media (136 l/s), más el 5% del almacenaje equivalente a 100 l/s. De esta forma, anualmente este caudal correspondía a 7.442.496 m³. A partir de lo anterior, la DGA (2006) concluyó que la disponibilidad de aguas subterráneas para constituir DAA permanentes en el acuífero del Salar de Llamara era de 7.442.496 m³. Los derechos concedidos alcanzaban un volumen total anual de 6.071.468 m³, por lo cual quedaba por otorgar un volumen anual de 1.371.028 m³.

La DGA (2009) analiza los estudios geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos realizados por DICTUC [106] a petición de SQM en la cuenca del Salar de Llamara, demostrando diferencias respecto de las magnitudes de las variables de entradas y salidas del modelo hidrológico del acuífero de Llamara (insuficiencia de la información hidrométrica disponible y de las determinaciones de flujos de humedad mediante el método del domo). Aun así, dado que coincide con el modelo conceptual, la DGA considera los resultados válidos dentro de un cierto rango de magnitud. Por otra parte, la DGA utiliza el modelo regional definido por JICA (1995) para actualizar el balance hídrico de la cuenca (se deduce la relación existente entre la precipitación media y el coeficiente de escorrentía de las cuencas con registro hidrométrico temporal largo). El cálculo indica que el recurso renovable alcanza los 209 l/s, asociado a la evaporación y a la disponibilidad de acuerdo a los criterios de la DGA. Esta cifra corresponde a un volumen total de 6.591.024 m³ cuando la demanda comprometida en el acuífero del Salar de Llamara a septiembre del 2009 era de un volumen total anual de 6.921.364 m³. En base a la posibilidad de otorgar como DAA el 5% del volumen embalsado en el acuífero (correspondiendo a 100 l/s en el año 2006), se concluye que se reduce a 36 l/s en el año 2009.

En total, existe 7 DAA subterráneos otorgados en el acuífero del Salar de Llamara que corresponden a 244,7 l/s.

En la cuenca Salar de Llamara (definida en la delimitación de la DGA (2000) como subcuenca "Río Loa Medio") existen 9 pozos con derechos otorgados por un total de 260 l/s, de los cuales siete pertenecen a SQM y uno a la minera Septentrión. De estos nueve pozos, sólo cuatro cuentan con aprobación ambiental y con un caudal asociado de 120 l/s. Estos pozos son de propiedad de SQM.

Descarga total

El acuífero se descarga de manera natural a través de cuatro mecanismos: a) evaporación, que ocurre directamente desde el agua subterránea y que representa la mayor salida del sistema; b) descarga subterránea directa hacia el río Loa y hacia la Quebrada Amarga (que descarga superficialmente en el río Loa); c) descarga por transpiración del bosque de Tamarugos, la cual es despreciable debido a la baja densidad del bosque; y d) descarga artificial a través de los pozos de extracción.

Tabla 44. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en estaciones de monitoreo DGA en la quebrada Guatacondo.

Río	Item	CE (μS/cm)	B (mg/l)	As (mg/l)	Mn (mg/l)
Guatacondo en Copaquire	Año Inicio	1980	1980	1981	1997
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	n	52	47	49	40
	MIN	720	0,6	0,003	0,01
	MAX	4848	11	1,4	0,94
	\bar{x}	1160	1,5	0,161	0,25
	σ	747	1,9	0,283	0,25
	Datos. Elim.	1	0	0	0

3.4. CALIDAD DEL AGUA

Según la descripción geológica y geomorfológica de la región, el perfil fisiográfico de la parte sur de la región se caracteriza por la presencia de subcuencas con formación de salares fósiles tales como el Salar de Pintados, Bellavista y una extensión de estos, el Salar de Llamara [193; 271]. Este salar presenta en su extensión algunos *puquios* o manantiales con aguas superficiales de gran interés científico por la presencia de estromatolitos²⁰ y por sus aguas, las cuales presentan concentraciones

elevadas de STD clasificándola como salmueras [106; 171].

Dada la actividad minera industrial desarrollada por la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), se generó el Estudio de Impacto Ambiental "Pampa Hermosa" que cubre las cuencas Pampa del Tamarugal y Salar de Llamara. En consecuencia de los impactos previsto por el proyecto, se dictó una resolución de impacto ambiental con programas de monitoreo en las áreas impactadas por dicho proyecto, en especial, las quebradas de Guatacondo y Amarga y el Salar de Llamara. Desde el año 2007, se ha realizado un muestreo en la zona que incluyó las aguas superficiales y subterráneas para la realización de los análisis pertinentes de acuerdo a la Norma 1333²¹ según diversos usos considerados (DICTUC, 2008b).

En la figura 54 se aprecia que las aguas de Guatacondo en Copaquire no presentan variabilidad en la salinidad, al igual que en otras quebradas de la zona (según datos registrados en la red de calidad de aguas de la DGA)

La tabla 44 muestra los estadísticos de algunos parámetros tales como la concentración de As, B y Mn. En esta tabla se aprecia que las aguas de Guatacondo sobrepasan las concentraciones máximas permisibles según la norma NCh.409Of.84

En la tabla 45 se observa que los "puquios" del sector representan aguas muy evaporadas de tipo sódicas-cloruradas tal y como se señala en la figura 54 donde se especifican aguas del tipo Na⁺ / SO₄²⁻ para Guatacondo y Na⁺/ Cl⁻ para las aguas de pozos, "puquios", quebrada Amarga y la desembocadura del río Loa. Por otro lado, se aprecia una elevada concentración de metaloides.

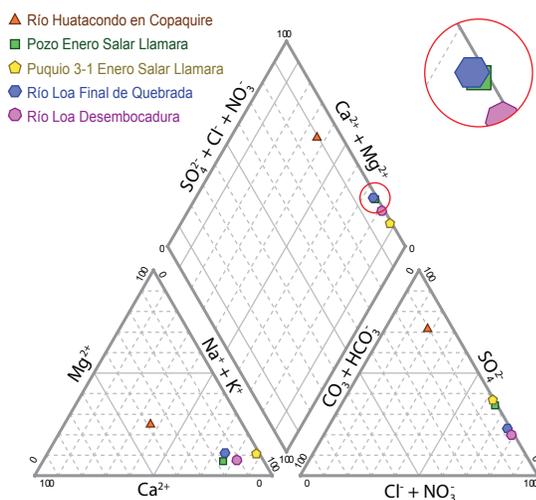


Figura 54. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales de la cuenca del Salar de Llamara.

²⁰ Estructuras estratificadas de formas diversas, formados por la captura y fijación de partículas carbonatadas por parte de cianobacterias en aguas someras.

²¹ Norma chilena de 1978 sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

Tabla 45. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en el "Salar de Llamara y desembocadura del río Loa".

Pozo / Quebrada	STD (mg/l)	pH	Iones dominantes		As (mg/l)	B (mg/l)	Fuente
			Cationes	Aniones			
Quebrada Guatacondo	2372	7,9	Ca ²⁺ ~ Na ⁺ ~ Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	0,01	2,1	DGA, 1998-2010; DICTUC, 2008b
Pozo SQM	7000	7,9	Na ⁺ > Ca ²⁺	Cl ⁻ ~ SO ₄ ²⁻	3	12	DICTUC, 2008b; PRAMAR, 2007
Puquios Salar de Llamara	100000	8,4	Na ⁺	Cl ⁻	6	3	DICTUC, 2008b; PRAMAR, 2007; Herrera et al., 2012
Quebrada Amarga	12430	7,8	Na ⁺	Cl ⁻	1	15	DICTUC, 2008b; PRAMAR, 2007
Río Loa desembocadura	19000	8,7	Na ⁺	Cl ⁻	1,7	49	DICTUC, 2008b; PRAMAR, 2007; Welch, 2009; Silvia, 2005

3.5. CONCLUSIÓN

El balance hídrico del acuífero del Salar de Llamara, previo al inicio de las extracciones, es nulo dado que el sistema endorreico está en equilibrio natural (entradas = salidas a largo plazo) (tabla 46). La situación de equilibrio natural cesa cuando se inician las extracciones (febrero 2006), resultando por consiguiente un balance negativo.

Si bien el acuífero Salar de Llamara ha sido estudiado, se ha hecho en base a datos escasos y muy localizados, tanto al nivel de mediciones en pozos como del caudal superficial y de la precipitación. Las incertidumbres en la caracterización hidrológica e hidrogeológica identificadas para la Pampa del Tamarugal se repiten en el caso del Salar de Llamara y se incrementan debido a la poca distribución espacial de los datos.

Tabla 46. Balance hídrico del acuífero Salar de Llamara.

	DICTUC, 1994; DGA, 1997	DICTUC, 2006
Recarga media (l/s)	328	542
Descarga total (l/s)	327	578,7
Balance (l/s)	0	-36,2

4. ZONA CAMIÑA-CAMARONES

4.1. INTRODUCCIÓN

4.1.1. Estudios

La hidrografía de la cuenca Camiña (figura 55) ha sido descrita en estudios antiguos (años 1970-1980) en los cuales se reportan aforos aislados [235; 200]. IRH (1983) genera un modelo hidrológico para estimar las variables hidrológicas en cuencas sin registros.

Solo dos estudios abordaron la hidrología e hidrogeología de la cuenca de Camiña (figura 56): el DIA de la Compañía Minera Bullmine "Producción de Yodo SCM Bullmine" [301] y el estudio de factibilidad del embalse de Umiña.

El estudio "Balance Hidrológico de Chile" de la DGA (1987), generó datos de precipitación, evaporación y escorrentía media para la cuenca (figura 57).

4.1.2. Datos

Red de monitoreo

La red de monitoreo está constituida por tres estaciones meteorológicas vigentes en la cuenca, dos de las cuales pertenecen a la DGA; tres estaciones fluviométricas vigentes, de las



Figura 55. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona Camiña - Camarones según DGA (2000).

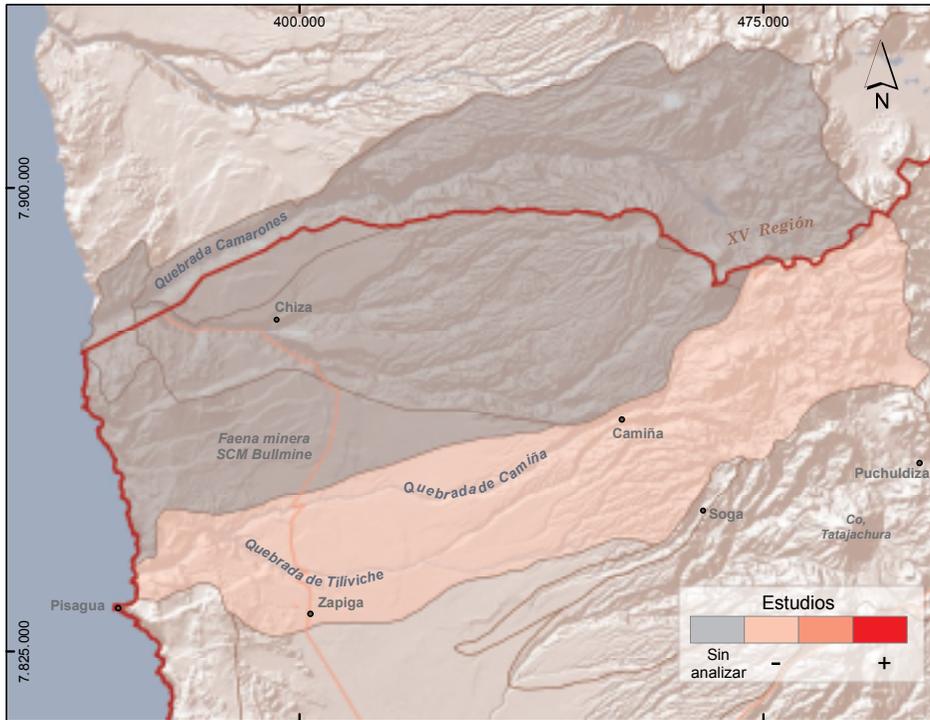


Figura 56. Zona hidrográfica Camiña - Camarones clasificadas según la cantidad de estudios existentes.

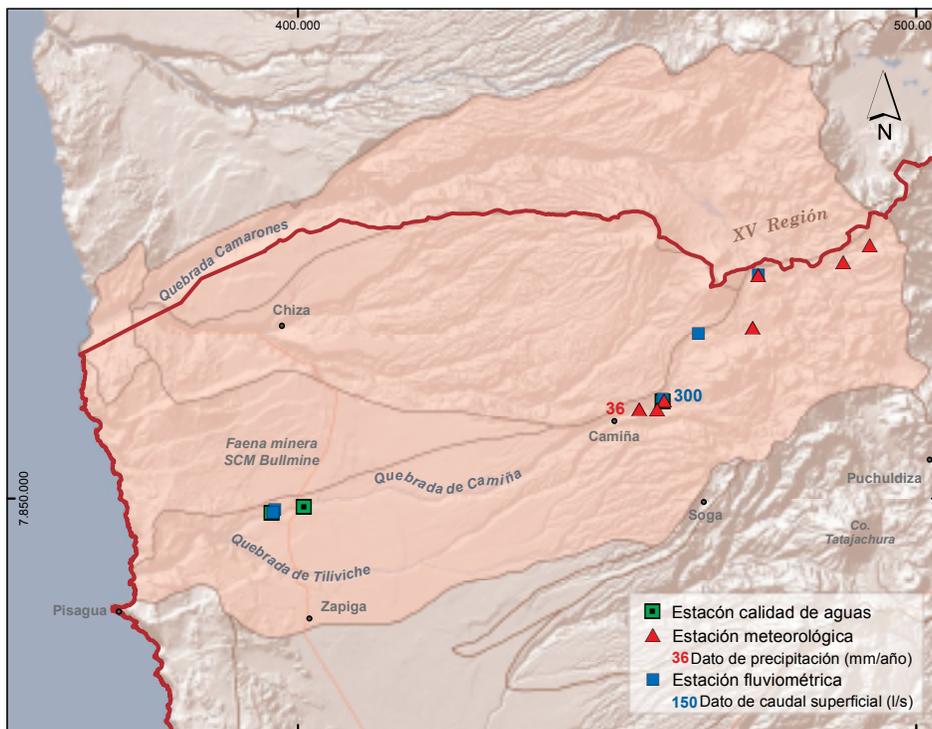


Figura 57. Mapa de estaciones de monitoreo y valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudal superficial (l/s) en la zona Camiña - Camarones.

cuales una es de la DGA; tres estaciones de calidad de agua, de las cuales una pertenece a la DGA.

Por otro lado, no existen pozos de monitoreo en la cuenca (figura 57).

4.2. HIDROGRAFÍA

Esta zona se caracteriza por ser una cuenca exorreica que desemboca en el mar a la altura de Pisagua. Posee un régimen permanente en la parte alta, con numerosas vertientes. El escurrimiento superficial no llega al mar y puede variar durante eventos hidrometeorológicos extremos.

4.3. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

4.3.1. Hidrogeología

En la cuenca aflora un conjunto litológico variado, en el cual se destacan potentes secuencias sedimentarias terciarias que albergan al principal acuífero de la zona.

Se han descritos dos acuíferos en la quebrada de Camiña: un acuífero freático en la parte confinada de los depósitos sedimentarios terciarios del sector medio y medio-bajo de la cuenca; y un acuífero superficial en el relleno aluvial Cuaternario del fondo de la quebrada, en el sector más alto de la cuenca [301].

El volumen total de agua subterránea embalsada en la cuenca es de 145,9 millones de m³ [301].

4.3.2. Hidrología

Recarga

Precipitación

Los antecedentes de precipitación indican que sobre la cuenca precipita todos los años, por lo que se favorece la recarga y la escorrentía.

El valor medio de precipitación sobre la cuenca varía según las fuentes entre 61 y 87 mm/año [114; 301]. Almeyda (1948) estima la precipitación de la cuenca en 157 mm/año, al igual que GCF Ing. Ltda. (2010), hasta Altusa. Las discrepancias se deben probablemente a las variaciones en el área considerada para la estimación.

En la estación de monitoreo de la DGA en Camiña, los últimos estudios coinciden en el valor medio anual de la precipitación en 36 mm/año (figura 57).

Escorrentía

Existen varios estudios que reportan aforos aislados en el río de Camiña [179; 208; 235]. La Dirección de Riego²² efectuó mediciones de los caudales de las crecidas en 1963 y 1964, reportado en [235]. El caudal máximo alcanzó los 15 m³/s.

La compañía minera Bullmine controla la escorrentía en dos puntos ubicados en el sector bajo de la cuenca (quebrada de Tana); este caudal debe su origen al drenaje del agua subterránea embalsada en el acuífero freático [301].

Salvo el estudio JICA (1995), las diferentes fuentes presentan un caudal medio anual parecido en la estación de monitoreo Camiña en Altusa: 291 a 350 l/s. En la estación Bullmine, el caudal medio anual es de 55 l/s [301].

Por otro lado, SGA Estrategias Sustentable (SGA) en abril del 2009 evalúa la recarga total en la cuenca entre 320 y 350 l/s.

La figura 58 muestra la serie cronológica de los caudales registrados por la DGA en la estación fluviométrica de Camiña.

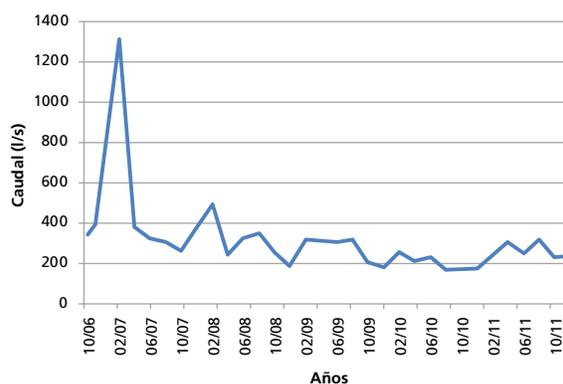


Figura 58. Serie cronológica de los caudales registrados en la estación fluviométrica de Camiña.

Tabla 47. Parámetros hidrológicos de recarga y descarga según fuente en la Quebrada de Camiña.

	House, 1962 datos Almeyda	DGA, 1987		SGA, 2009	GCF Ingenieros, 2010 ⁽ⁱ⁾
		Camiña en Altusa	Qda. Camiña		
Área cuenca (Km ²)	2.940	514	2.790	607,53	519
Precipitación (mm/año)	157	212	87,1	61,2	157,2
Evaporación (mm/año)	-	188,37	80	5% infiltración	-
Escorrentía (l/s)	5.000	350	610	-	324
Recarga (l/s)	-	-	-	320 - 350	-
Balance (l/s)	-	+ 30	0	-	-

⁽ⁱ⁾ Quebrada Camiña hasta Altusa

Descarga

Evaporación

El estudio "Balance Hidrológico de Chile" de la DGA (1987), entrega un valor medio de evaporación de 80 mm/año (188 mm/año en Altusa). SGA (2009) considera que el 5% de las precipitaciones se infiltran, lo que correspondería a una evaporación media de 58 mm/año.

Demanda y usos

Existen 127 DAA superficiales aprobados en la Cuenca de Camiña. Se registran dos pozos de extracción con un caudal total de 3,5 l/s.

La tabla 47 muestra los parámetros hidrológicos de recarga y descarga en la Quebrada de Camiña.

4.4. CALIDAD DEL AGUA

El norte de la región está delimitado por la cuenca del río Camiña que de acuerdo a los registros, las aguas no se consideran aptas para el consumo humano y regadío por el elevado contenido de As (0,60 mg/l). Por otro lado se aprecia que las concentraciones de B reportadas es de 6 mg/l y a su vez una conductividad hidráulica de 900 µS/cm. La figura 59 de diagramas triangulares establece aguas del tipo Na⁺ / SO₄²⁻. De igual forma en la tabla 48 se resumen los estadísticos para la quebrada de Camiña.

En la tabla 48 se aprecia que las concentraciones de As y Mn superan lo establecido en la norma NCh.409Of.87.

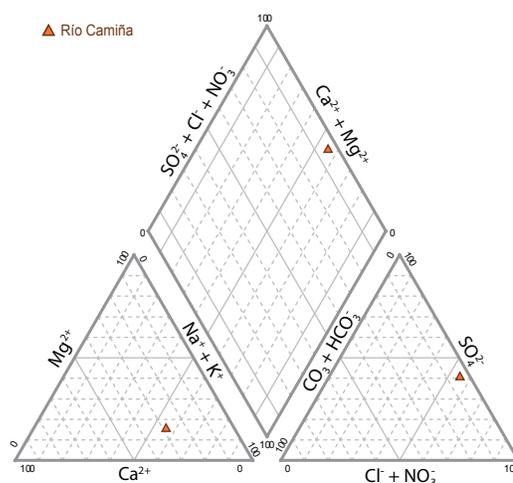


Figura 59. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas del río Camiña.

4.5. CONCLUSIÓN

La cuenca de Camiña es la menos estudiada de la región. Su condición de cuenca exorreica, con presencia de recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos y el desarrollo de actividades tanto agrícolas como mineras, justifican tener un mejor conocimiento y entendimiento de los recursos hídricos de la cuenca.

Tabla 48. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en estaciones de monitoreo DGA en la Quebrada de Camiña.

Quebrada	Item	CE (µS/cm)	B (mg/l)	As (mg/l)	Mn (mg/l)
Camiña en Altusa	Año Inicio	1983	1983	1983	1983
	Año Final	2012	2012	2012	2012
	n	58	53	58	43
	MIN	589	3	0,15	0,01
	MAX	1894	22	1,51	1,34
	Promedio	1081	8,1	0,46	0,12
	Desv. Estand.	290	3,38	0,20	0,23
	Datos Elim.	3	0	0	0

5. ZONA COSTERA

5.1. INTRODUCCIÓN

5.1.1. Estudios

Existen tres tipos de estudios que se dedicaron a estudiar las cuencas costeras de la I Región (figuras 60 y 61): estudios geomorfológicos del acantilado costero con sus formaciones de dunas [250; 251], estudios de la niebla costera (camanchaca) gracias a la Estación de Investigaciones Desérticas Alto Patache de la Universidad Católica de Chile (EIDAP UC) [58; 59; 228; 240; 303] y a las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIAs) [298; 299] realizadas a causa de las diferentes actividades produc-

tivas existentes entorno al puerto de Patache y a la explotación de sal. La DIA "Explotación de sal del Salar Grande" [51] generó datos geológicos mediante la perforación de pozos.

Es notable destacar el estudio "Geology, geomorphology, and petroleum possibilities of the, Iquique, Chile", realizado por Cecioni *et al.* (1988), el cual describe en detalle la Cordillera de la Costa, en particular el área de El Godo, al sureste de Iquique.

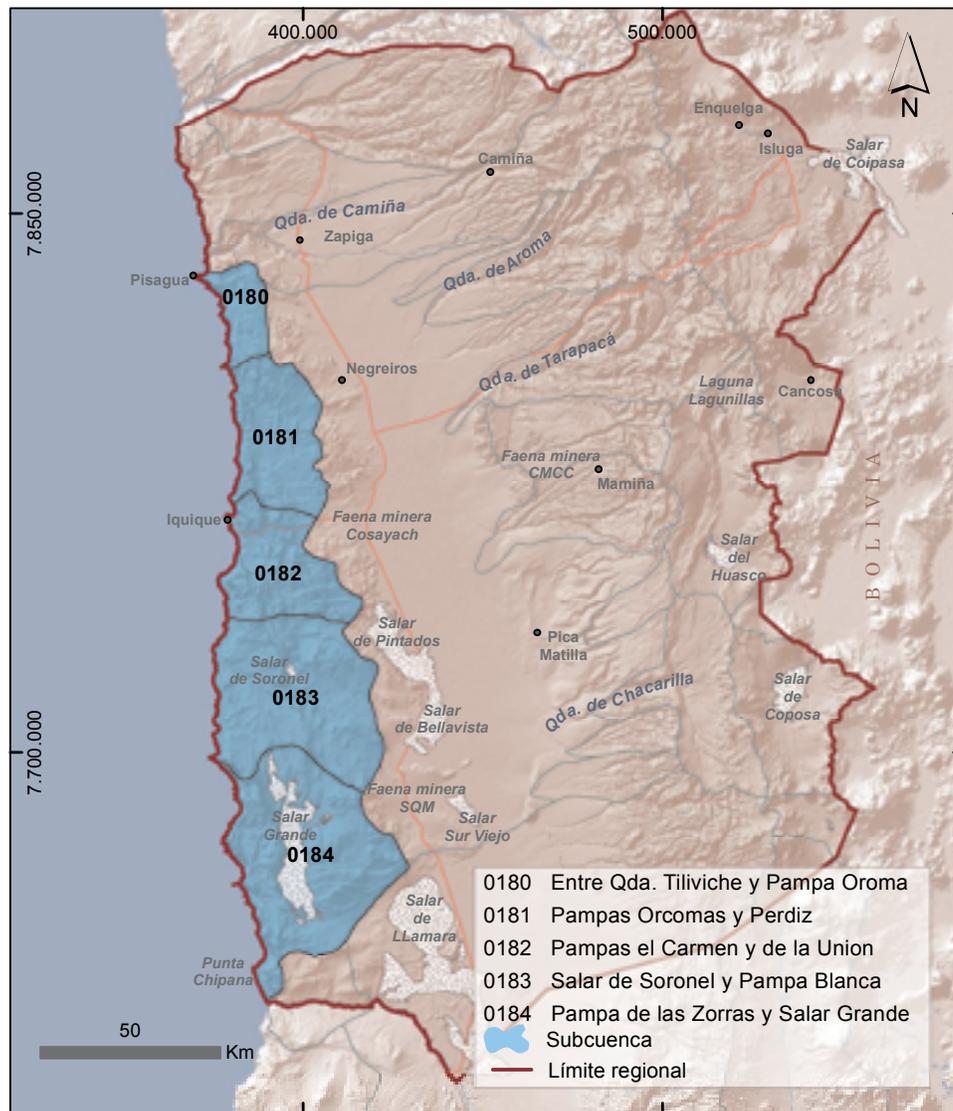


Figura 60. Delimitación de unidades hidrográficas de zona costera según DGA (2000).

5.1.2. Datos

Red de Monitoreo

La red de monitoreo está constituida por cuatro estaciones meteorológicas vigentes, de las cuales una pertenece a la DGA, ubicada en Iquique; 12 estaciones de calidad de agua vigentes pertenecientes a la CMDIC en Puerto Patache (figura 62).

5.2. HIDROGRAFÍA

Las cuencas costeras son de tipo arréico sin escurrimientos superficiales, aunque existen afloramientos de agua en Iquique y Los Verdes. Estos afloramientos, si bien son conocidos, nunca han sido descritos, caracterizados y cuantificados (se espera un caudal menor).

5.3. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Las características hidrogeológicas de la zona costera solo se mencionan en el Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional, Escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000, IPLA Ltda. (1986). En este estudio se describe un acuífero en el relleno cuaternario local entorno a la ciudad de Iquique, de profundidad total superior a 25 m. Se menciona la presencia de 4 sondajes en Iquique, con un nivel estatico inferior a 5 m y sin información estratigráfica.

Cecioni *et al.* (1988) reconoce la presencia generalizada de karst en la región, fósil en la costa y activo en la Cordillera de la Costa en las formaciones calcáreas del Jurásico Medio, relacionándolo con la posible presencia de petróleo mas no de agua.

Precipitación

La precipitación en la costa es casi nula, con valores medios anuales que varía de 0,7 a 5 mm/año, según las fuentes consideradas [141; 256].

Evaporación

La evaporación es del mismo orden de magnitud que en la región entera, con un valor medio anual en Cuya de 2.191 mm/año (en base a cinco años de registro) [256].

La niebla costera genera una cantidad de agua que logra formar los denominados "oasis de niebla" (ecosistemas constituidos esencialmente por *vegetación arbustiva, cactus, líquenes y tidlansias*) y que ha sido estimada en la estación de Alto Patache en 10 l/m²/día (entre 1997 y 2001) [58; 59]. La repartición temporal y espacial de la niebla muestra heterogeneidad: la niebla se reparte entre los meses de marzo y noviembre con variaciones interanuales. En el Cerro Guatalaya entre Alto Hospicio y Humberstone, la cantidad de agua ha sido estimada en 1 l/m²/día [58; 59].

Demanda y Usos

Existen 14 DAA subterráneos en la subcuenca Pampas el Carmen y de la Unión, correspondiendo a un caudal otorgado de



Figura 61. Zona hidrográfica costera clasificadas según la cantidad de estudios existentes.



Figura 62. Mapa de estaciones de monitoreo con sus respectivos valores medios anuales de precipitación (mm/año) en la zona costera.

27 l/s, 10 de los cuales son pozos ubicados en el acuífero de La Noria (con un total de 18 l/s otorgado).

Existen 14 pozos de extracción en Pampa el Carmen y de la Unión (acuífero La Noria).

5.4. CALIDAD DEL AGUA

No existe información de la hidroquímica y/o calidad de aguas en las cuencas costeras de la región de Tarapacá. Sin embargo, en la estación de Investigaciones Desérticas Alto Patache del Centro del Desierto de Atacama de la Universidad Católica de Chile, se recolectan aguas de nieblas costeras las cuales permiten investigar sobre los oasis de niebla en la región. En este sentido, Sträter et al. (2008) reporta la calidad de las aguas de las nieblas costeras en Patache, cuya zona comprende las Pampas de las Zorras y el Salar Grande. Estas nieblas poseen una acidez importante ($\text{pH} = 3,1$) la cual se atribuye a la contaminación por ácido sulfúrico desde la atmósfera causada a la vez por dos posibles razones: por la emisión de estos contaminantes desde industrias y plantas de energía localizadas en el centro y norte del país [303] y por la evaporación de los sulfatos desde el océano. Asimismo, presenta una salinidad de $810 \mu\text{S}/\text{cm}$, una concentración de As reportada por Sträter et al. (2008) de $0,05 \text{ mg}/\text{l}$. La clasificación geoquímica establece como iones dominantes al Na^+ y al SO_4^{2-} .

5.5. CONCLUSIÓN

Las cuencas costeras siempre han sido consideradas escasas en recursos hídricos y por ello no han sido objeto de estudios. No obstante, las cuencas costeras albergan recursos hídricos (niebla costera, acuífero de La Noria, presencia de vertientes costeras), que aunque sean escasos ameritan ser caracterizados.

Bibliografía

- [1] Acosta O. & Custodio E. (2008). *Impactos Ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile)*. En: Boletín Geológico y Minero, 119, p. 33 – 50. ISSN: 0366-0176
- [2] Acosta O. (2010). *A socially sustainable approach for the intensive use of aquifers in northern Chile*. En: Congreso WIM. Santiago, Chile.
- [3] Acosta O. (2010). *El caso Coposa: Cómo pasar del conflicto ambiental a la construcción de una gestión hídrica proactiva y transparente*. En: Transparencia en el ámbito público y privado: Balance y desafíos pendientes. Chile Transparente. Santiago, Chile, p. 117 – 123.
- [4] Acosta O.; Rengifo P. & Dzogolyk E. (2010). *Saline groundwater: An alternative for the sustainable exploitation of Andean Highland groundwater reserves*. En: Congreso WIM. Santiago, Chile.
- [5] Acosta O.; Rengifo P. & Muñoz J. (2009). *De la exploración hidrogeológica a la gestión hídrica avanzada, Salar de Coposa, norte de Chile*. En: Seminario GEOMIN 2009. Antofagasta, Chile.
- [6] Alamos F. & Peralta F. (1981). *Las aguas subterráneas en la Pampa del Tamarugal. Los recursos de agua y la reforestación*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Iquique, Chile.
- [7] Alamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda. (1982). *Medición y análisis de los recursos hídricos en la Pampa del Tamarugal*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [8] Alamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda. (1984). *Medición y análisis de los recursos hídricos en la Pampa del Tamarugal, Pica – Matilla y Río Piga y Collacagua*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [9] Alamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda. (1987). *Análisis crítico de la red de medición de niveles de agua subterránea. Región I, II, III, IV y V*. Dirección General de Agua (DGA). Chile.
- [10] Alfa Ingenieros Consultores Ltda. (1982). *Catastro Usuarios Provincia de Iquique. Tomo I (Pica, Matilla, Quebrada Tarapacá)*. Dirección General de Agua (DGA). Santiago, Chile.
- [11] Almeyda E. (1948). *Pluviometría de las zonas del desierto y las estepas cálidas de Chile*. Santiago, Chile.
- [12] Alvarez J. (1962). *Informe ENAP sobre posibilidades aguas subterránea en zona norte del país (provincia Tarapacá)*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile.
- [13] Aravena R. & Acevedo E. (1984). *Estudio de la relación hídrica de Prosopis Tamarugo Phil. Mediante isotopos estables, Oxígeno – 18 y Deuterio*. Chile.
- [14] Aravena R. & Suzuki O. (1983). *Evolución isotópica en ríos del norte de Chile*. Proyecto CORFO/ PNUD/ FAO/ Comisión Chilena de Energía Nuclear/ universidad de Chile. Chile.
- [15] Aravena R. (1995). *Isotope Hydrology and Geochemistry of Northern Chile Groundwaters*. En: Bull. Inst. fr. Études andines, p. 495 – 503.
- [16] Aravena R.; Suzuki O.; Peña H.; Pollastri A.; Fuenzalida H. & Grilli A. (1999). *Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile*. En: Applied Geochemistry, p. 411 – 412.
- [17] ARCADIS GEOTECNICA. (2001). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Expansión 110 KTPD Planta Concentradora Collahuasi. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Santiago, Chile.
- [18] ARCADIS GEOTECNICA. (2003). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto optimización Collahuasi. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Santiago, Chile.
- [19] ARCADIS GEOTECNICA. (2006). *Declaración de Impacto Ambiental (DÍA) - Traslado puntos de captación de aguas subterráneas en Cuenca Coposa. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Santiago, Chile.
- [20] ARCADIS GEOTECNICA. (2011). *Línea Base Ambiental Salar del Huasco. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Chile.
- [21] ARCADIS GEOTECNICA. (2012). *Estudio de Impacto Ambiental. Quebrada Blanca Fase 2. Teck Quebrada Blanca*. Santiago, Chile.
- [22] Aretech Geonova. (2008). *Historial de transferencia, transmisiones y otras mutaciones de derechos de aprovechamiento de aguas en conservadores de bienes raíces de las regiones Arica – Parinacota y Tarapacá*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [23] Atienzo K. *Cuantificación de metales y metaloides en matrices ambientales, mediante espectroscopia atómica*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2008.
- [24] Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (1994). *Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional. Etapa I. Primera región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [25] Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (2001). *Actualización recursos hídricos para restablecimiento de derechos ancestrales indígenas I y II regiones. Informe final, SIT N° 73*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago,

- Chile.
- [26] Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (2007). *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I norte. Región I a IV*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [27] BF Ingenieros Civiles. (1984). *Análisis crítico de la red fluviométrica nacional. Red de calidad de aguas I y II región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [28] BF Ingenieros Civiles. (1985). *Análisis de la red hidrometeorológica nacional. Regiones I, II, III y IV. Tomo I*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [29] Billingham G. (1893). *La irrigación en Tarapacá*. Santiago, Chile.
- [30] BIOTA Gestión y Consultoría Ambientales Ltda. (2005). *Descripción vegetacional Salar del Huasco, I región de Tarapacá*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Santiago, Chile.
- [31] BIOTA Gestión y Consultorías Ambientales Ltda. (2006). *Estudio de los sistemas vegetacionales azonales hídricos del altiplano*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Santiago, Chile.
- [32] Bolch, T. & Schröder, H. *Geomorphologische Kartierung und Diversitätsbestimmung der periglazialformen am Cerro Sillajhuay (Chile/Bolivien)*. Erlangen, Alemania, 2000.
- [33] Börgel R. (1975). *Algunas aproximaciones recientes al problema de la evolución geomorfológica de la Pampa del Tamarugal*. En: Revista Norte Grande, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, p. 375–386.
- [34] Bruggen J. (1918). *Informe sobre el agua subterránea de la región de Pica*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [35] CADE – IDEPE Consultores en Ingeniería. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad – cuenca río Loa*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [36] CADE – IDEPE. (1992). *Catastro General de Usuarios de Aguas de Cauces Ubicados en la Primera región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [37] CADE – IDEPE. (1994). *Catastro General de Usuarios de Aguas de Cauces Ubicados en la Primera región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [38] CADE-IDEPE. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [39] Carrasco C. (1999). *Disponibilidad de agua y desarrollo sustentable en la región de Tarapacá*. XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS. Antofagasta, Chile.
- [40] Carrasco C.; Sielfeld W.; Herrera V.; Tello V.; Torres C. & Torres J. (1993). *Estudio del ecosistema de Pampa Lagunilla*. Compañía Minera Cerro Colorado. Iquique, Chile.
- [41] Castillo G.; Castro M.; Bahamondes M. & Lorca V. (1993). *Caracterización de la calidad sanitaria de aguas de bofedales y vegas del área andina chilena*. En: Biblioteca Digital de la Universidad de Chile, p. (sin número).
- [42] Castillo O. (1960). *El agua subterránea en el norte de la Pampa del Tamarugal*. Boletín N° 5. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [43] Castillo O. (1966). *Profundidad, sentido de escurrimiento y calidad química de la superficie freática del agua subterránea del Salar de Pintados*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [44] Castillo O. (1967). *Plan de investigación de recursos de agua subterránea en la región precordillerana de los Altos de Pica*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [45] Castro L. (2004). *Recursos hídricos altoandinos, estrategias de desarrollo económico y proyectos de riego: Tarapacá, 1880-1930*. En: Chungara, Revista de Antropología Chilena, volumen 36, N° 1, p. 205 – 220.
- [46] Castro L. (2009). *Visión histórica del manejo de los recursos hídricos en el norte grande de Chile (fines del siglo XIX y comienzo del XX)*. 53° Congreso Internacional de Americanistas. Simposio “El acceso al agua en América: historia, actualidad y perspectivas”. México.
- [47] Castro M. (1991). *Caracterización antropológica de las poblaciones andinas de la I y II región*. Universidad de Chile y Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [48] Castro M. (1993). *Identificación y ubicación de áreas de vegas y bofedales de las regiones primera y segunda*. Universidad de Chile y Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [49] Castro M. & Bahamonde M. (2001). *Summer rains in the arid zones of the Andes mountain: the case of the aymaras and the atacameños*. En: Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community. Rio Janeiro, Brazil.
- [50] Cecioni G.; Meyerhoff A. & Teitz H. (1988). *Geology, geomorphology, and petroleum possibilities of the El Godo area, Iquique, Chile*. En: Journal of Petroleum Geology, p. 245 – 276.
- [51] CEGA Ingenieros Ltda. (2006). *Declaración de Impacto Ambiental - Explotación de sal del Salar Grande - I región*. Compañía Minera Cordillera S.A. Santiago, Chile.
- [52] Centro de Ecología Aplicada (CEA). (2009). *Estudio estacional de los salares de Coposa, Michincha y Huasco*. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Chile.
- [53] Centro de Estudios Científicos (CECS). (2009). *Estrategia Nacional de Glaciares. Fundamentos*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [54] Centro de Estudios para el Desarrollo (CED). (2006). *Conservación de la biodiversidad y manejo sustentable del Salar del Huasco*. Chile.
- [55] Centro de Estudios para el Desarrollo (CED). (2012). *Catastro de humedales y usos indígenas de la Provincia del Tamarugal*. Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI). Chile.
- [56] Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2010). *Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile*. Región de Tarapacá. Santiago, Chile.
- [57] Centro Privado de Servicios Aéreos (CEPRISER). (1993). *Trabajo de estimulación de las precipitaciones en la primera región, mediante siembra aérea de nubes con Agl, año 1993*. Chile.
- [58] Cereceda P.; Larrain H.; Osses P.; Lazaro P.; Pinto R. & Schemenauer R. (2001). *Penetración continental de la niebla de advección en Tarapacá, Chile*. En: 8vo Encuentro de Geógrafos América Latina. Santiago, Chile.
- [59] Cereceda P.; Larrain H.; Velasquez F.; von Igel B.; Egaña I.; Osses P.; Farías M. & Pinto R. (2004). *Caracterización del clima de desierto costero y su relación con algunos oasis de niebla en Tarapacá*. Chile. Chile.
- [60] Chadwick F.; Acosta O.; Rengifo P.; Uribe J.; Delgado J.L. (2012). *Generation of long-term hidrometeorological information to improve knowledge of the local water cycle, Collahuasi, Chile*. Chile.
- [61] Charrier R.; Héral G.; Pinto L.; García M.; Riquelme R.; Farías M. & Muñoz N. (2012). *Cenozoic tectonic evolution in the Central Andes in northern Chile and west central Bolivia: implications for paleogeographic, magmatic and mountain building evolution*. En: International Journal of Earth Sciences, p. (sin número). DOI: 10.1007/s00531-012-0801-4.
- [62] Clark J. (2012). *A new approach to groundwater recharge modelling in*

- the Andean High Cordillera*. Profesor guía: Pedersen T.; Guimera J. & Arora V. University of Victoria, EE.UU.
- [63] Comisión Regional de Recursos Hídricos; Comité Público – Privado para la Conservación de la Biodiversidad y Gestión Sustentable del Salar del Huasco & Centro de Estudios del Desarrollo (CED). (2005). *Plan de gestión para la conservación de la biodiversidad del Salar del Huasco*. Chile.
- [64] Comité Chileno para el estudio de las zonas áridas (1963). *Las zonas áridas de Chile*. Santiago, Chile.
- [65] Comité Sales Mixtas. (1980). *Informe prospección preliminar Salar de Coposa*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [66] Comité Sales Mixtas. (1981a). *Informe prospección preliminar Salar Huasco*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [67] Comité Sales Mixtas. (1981b). *Proyecto Salar del Huasco. Producción de sulfato de sodio*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [68] Comité Sales Mixtas. (1981c). *Informe prospección preliminar Salar de Llamara y Bellavista*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [69] Compañía de Salitre y Yodo de Chile (SCM COSAYACH). (2012). *Declaración de Impacto Ambiental. Aumento Producción de Yodo Cala-Cala*. Chile.
- [70] CONIC – BF Ingenieros Civiles Consultores. (2012). *Diagnóstico de obras hidráulicas para riego, región de Tarapacá*. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Chile.
- [71] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983a). *Catastro General Usuarios de Aguas Quebrada de Aroma I región – Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [72] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983b). *Catastro General Usuarios de Aguas Quebrada de Guatacondo I región – Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [73] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983c). *Catastro General Usuarios de Aguas Quebrada de Mamiña I región – Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [74] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983d). *Catastro General Usuarios de Aguas Quebrada de Quipisca I región – Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [75] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983e). *Catastro General de usuarios de Aguas de la Quebrada Camiña, Primera región. Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [76] Contreras L. & Jorquera M. *Evaluación de los genes arsenito oxidasa (aox) y arseniato reductasa (ars) en proteobacterias del sedimento del salar del Huasco, altiplano norte de Chile*. Departamento de ciencias del mar, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2009.
- [77] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1969). *División hidrográfica n 604 Pampa del Tamarugal. Catastro de pozos al 31 de Diciembre de 1969*. Chile.
- [78] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1970). *Informe de sondaje en pertenencia minera "Queen Elizabeth 1 – 12"*. Chile.
- [79] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1971). *Mapa Hidrográfico de Chile*. Chile.
- [80] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1982a). *Análisis de los ecosistemas de la I región de Chile*. Chile.
- [81] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1982b). *Informe de suelos. Sector Pampa del Tamarugal*. Chile.
- [82] Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF). (1988). *Plan de manejo Parque Nacional Volcan Isluga*. Chile.
- [83] Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF). (1997). *Plan de Manejo Reserva Nacional Pampa del Tamarugal*. Santiago, Chile.
- [84] Corporación Norte Grande (2011). *Trabajo de cooperación para monitoreo y seguimiento al "plan de trabajo para mantención de las funciones ecosistémicas del sistema lacustre Lagunillas", entre la comunidad indígena de Cancosa y Cía Minera Cerro Colorado (CMCC)*. Chile.
- [85] Cortes A. *Caracterización de la microflora acuática en la vertiente y la laguna permanente del salar del Huasco. Altiplano del norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2008.
- [86] Cuevas A. *Diagnóstico de la demanda de agua e identificación de conflictos socio-ambientales, para la propuesta de criterios de gestión sustentable de los recursos hídricos de la comuna de Pica*. Profesor guía: Romero H. Facultad de ciencias forestales y conservación de la naturaleza, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.
- [87] De la Lanza G., Cáceres C., Adame S., Hernández S. (1999). *Diccionario de Hidrología y Ciencias afines*. Instituto de Biología, UNAM y Plaza y Valdés Editores, México.
- [88] Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile (DICUC). (1988). *Modelo de Simulación Hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [89] Díaz-Martínez E.; Mamet B.; Isaacson P. & Grader G. (2000). *Permian marine sedimentation in northern Chile: new paleontological evidence from the Juan de Morales Formation, and regional paleogeographic implications*. En: South American Earth Sciences, p. 511 – 525.
- [90] Digert F.; Hoke G.; Jordan T. & Isacks B. (2003). *Subsurface stratigraphy of the neogene Pampa de Tamarugal basin, northern Chile*.
- [91] Dingman R. & Galli C. (1965). *Geology and Ground-Water Resources of the Pica Área, Tarapacá Province, Chile*. En: Geological Survey Bulletin 1189. Washinton, United States of America.
- [92] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (1998a). *Evaluación de recursos en zona sur de la Pampa del Tamarugal*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) Santiago, Chile.
- [93] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (1998b). *Informe hidrogeológico Salar Sur Viejo, I región*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) Santiago, Chile.
- [94] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (1999). *Acuífero de Sur Viejo. Caracterización hidrogeológica y evaluación de recarga subterránea*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [95] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2003). *Estudio Hidrogeológico del Salar de Llamara, I Región*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [96] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2004). *Revisión del estudio. Estación Cerro Gordo: Modelo de flujo numérico de aguas subterráneas*.

- Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) Santiago, Chile.
- [97] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2005a). *Análisis técnico de las solicitudes de cambios de puntos de captación y de derechos de aprovechamientos de ESSAT. Acuífero Pampa del Tamarugal*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [98] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2005b). *Simulación de la Evolución del Nivel de la Napa en el Acuífero de Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Soronal*. Anexo VIII Estudio Salar de Llamara, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [99] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2005c). *Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa*. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Santiago, Chile.
- [101] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2006a). *Análisis fluviométrico del río Loa entre Quillagua y desembocadura*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VII.1 Hidrología, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [102] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2006b). *Actualización de la estimación de la recarga acuíferos de Pampa Tamarugal y Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VII.2 Hidrología, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [103] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2006c). *Evolución del nivel de la napa en la Pampa Tamarugal*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Soronal*. Anexo VII, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [104] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007a). *Medición de la evaporación desde acuíferos de la Pampa del Tamarugal y Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VIII.1 Hidrogeología, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [105] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007b). *Modelación de la evolución del nivel de la napa en la Pampa del Tamarugal*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VIII.2 Hidrogeología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [106] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007c). *Modelación de la evolución del nivel de la napa en el salar de Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VIII.3 Hidrogeología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [107] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007d). *Geología del acuífero de la Pampa del Tamarugal*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo IX.1 Geología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [108] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007e). *Geología del salar de Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo IX.2 Geología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [109] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2008a). *Geología e hidrogeología del acuífero de Sur Viejo*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VIII.4 Hidrogeología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [110] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2008b). *Informe consolidado de monitoreo del nivel de la napa, caudales de extracción y calidad química del Acuífero del Salar de Llamara*. En: *Plan de Seguimiento Ambiental de Tamarugos, DIA Aducción Llamara*. Anexo I. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [111] Dirección General de Aguas (DGA). (1978a). *Calidad de Agua Primera región*. Chile.
- [112] Dirección General de Aguas (DGA). (1978b). *Clasificación de cuencas hidrográficas de Chile*. Chile.
- [113] Dirección General de Aguas (DGA). (1985). *Estudios de Hidrología Isotópica. Área Salar de Llamara. Desierto de Atacama, Chile*. Santiago, Chile.
- [114] Dirección General de Aguas (DGA). (1987). *Balace Hidrológico de Chile*. Santiago, Chile.
- [115] Dirección General de Aguas (DGA). (1992). *Análisis estadísticos de caudales en los ríos de Chile*. Chile.
- [116] Dirección General de Aguas (DGA). (1996a). *Delimitación de acuíferos de vegas y bofedales de las regiones de Tarapacá y Antofagasta*. Santiago, Chile.
- [117] Dirección General de Aguas (DGA). (1996b). *Determinación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en el sector del acuífero de la Pampa del Tamarugal*. Minuta técnica, SDT 68. Santiago, Chile.
- [118] Dirección General de Aguas (DGA). (1997a). *Disponibilidad de aguas subterráneas en el Salar de Llamara*. Minuta técnica, N° 72. SDT N° 112. Santiago, Chile.
- [119] Dirección General de Aguas (DGA). (1997b). *Divisoria de Cuencas por Comunas*. Santiago, Chile.
- [120] Dirección General de Aguas (DGA). (2000). *Divisoria de Subsubcuencas por Regiones*. Santiago, Chile.
- [121] Dirección General de Aguas (DGA). (2006). *Determinación de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas factibles de constituir en el acuífero del Salar de Llamara, I región*. Informe técnico, SDT N° 240. Santiago, Chile.
- [122] Dirección General de Aguas (DGA). (2009). *Reevaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Llamara*. Informe técnico, SDT N° 281. Santiago, Chile.
- [123] Dirección General de Aguas (DGA). (2011). *Actualización de la oferta y la demanda de recursos hídricos subterráneos del sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa del Tamarugal*. Informe técnico, SDT N° 311. Santiago, Chile.
- [124] Dirección General de Aguas (DGA) & Hernández S. (2005). *Sistematización, espacialización y análisis de datos isotópicos en muestras de agua del*

- norte de Chile. Informe técnico, SDT N° 221. Chile.
- [125] Dirección General de Aguas (DGA); Universidad Católica del Norte (UCN); Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) & ORSTOM. (1986). *Gestión y conservación de recursos hídricos I y II región*. Chile.
- [126] DSM Minera S.A. (2003). *Recursos de agua subterránea del Acuífero Sur Viejo*. Chile.
- [127] EDIC Ingenieros Ltda. (2003). *Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Iquique*. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Chile.
- [128] Empresa Nacional del Petróleo (ENAP). (1983). *Informe geológico Pozo: Pintados 1*. Chile.
- [129] Errol L. Montgomery & Associates. (2005). *Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca Salar de Lagunilla*. Compañía Minera Cerro Colorado. Chile.
- [130] Estrada A. *Estudio estacional y temporal de proteobacterias y fisicoquímica de sedimentos del bofedal de Pampa Lagunilla, altiplano del norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2010.
- [131] Fuenzalida H. & Rutllant J. (1986). *Estudio sobre el origen del vapor de agua que precipita en el invierno altiplánico*. Chile.
- [132] Gallardo A. (1961). *Informe geológico sobre el pozo de exploración de Pintados N° 1 – Tarapacá*. Empresa Nacional del Petróleo (ENAP). Santiago, Chile.
- [133] Gallardo A. (1961). *Sección estratigráfica del pozo Pintados-2, esc. 1_1.000*. Empresa Nacional del Petróleo (ENAP). Chile.
- [134] Galli C. (1968). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulo Juan de Morales. Provincia de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [135] Galli C.; & Dingman R. (1962). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulos Pica, Alca, Matilla, Chacarilla*. Institutos de Investigaciones Geológicas. Chile.
- [136] Garín C. (1986). *Inventario de glaciares de los Andes chilenos desde los 18° a los 32° de latitud sur*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [137] García F. (1967). *Geología del Norte Grande de Chile*. En: Sociedad Geológica de Chile. Symposium sobre el geosinclinal andino. Santiago, Chile.
- [138] Garrido N. *Proyecto sistema de energización sustentable para Huatacondo, comuna de Pozo Almonte, región de Tarapacá*. Profesor guía: Contreras M. Escuela de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2010.
- [139] Gayo E.; Latorre C.; Jordan T.; Nester P.; Estay S.; Ojeda K. & Santoro C. (2012). *Late quaternary hydrological and ecological change in the hyperarid core of the northern Atacama Desert (~ 21°S)*. Chile.
- [140] Gayo E.; Latorre C.; Santoro C.; Maldonado A. & De Pol – Holz R. (2011). *Hydroclimate variability in the low – elevation Atacama Deserto over the last 2.500 years*. En: Climate of the Past Discussions. Chile.
- [141] GCF Ingenieros Limitada. (2010). *Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I, II y III regiones. Informe técnico, SIT N°221*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [142] Geohidrología. (2010). *Informe consolidado de monitoreo del nivel de la napa, caudales de extracción y calidad química del Acuífero del Salar de Llamara*. Proyecto: *Plan de Seguimiento Ambiental de Tamarugos*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [143] Geraldo E. (1972). *Anteproyecto regadío Pica – Matilla. Informe sobre la factibilidad de incrementar el área de riego en la zona Pica – Matilla*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [144] GESCAM Consultores Ambientales & Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC). (2004). *La cuestión del agua en la Provincia de Iquique. Síntesis de un debate*. Chile.
- [145] GHD. (2008a). *Declaración de Impacto Ambiental. Mejoramiento del sistema de tratamiento de agua potable de la localidad de Huara, región de Tarapacá*. Aguas del Altiplano. Huara, Chile.
- [146] GHD. (2008b). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto mejoramiento sistema de tratamiento de agua potable de la localidad de Pozo Almonte*. Aguas del Altiplano. Pozo Almonte, Chile.
- [147] GHD. (2009a). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto mejoramiento del sistema de tratamiento de agua potable de la localidad de Huara, I Región*. Aguas del Altiplano. Huara, Chile.
- [148] GHD. (2009b). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto mejoramiento del sistema de tratamiento de agua potable, localidad de La Tirana, Región de Tarapacá*. Aguas del Altiplano. La Tirana, Chile.
- [149] GHD. (2010a). *Declaración de Impacto Ambiental. Sistema de recolección y tratamiento de aguas servidas de Huara*. Ilustre Municipalidad de Huara. Huara, Chile.
- [150] GHD. (2010b). *Declaración de Impacto Ambiental. Sistema de recolección y tratamiento de aguas servidas de la localidad de La Tirana*. Ilustre Municipalidad de Pozo Almonte. Pozo Almonte, Chile.
- [151] GHD. (2011a). *Declaración de Impacto Ambiental. Mejoramiento del Sistema de Tratamiento de Agua Potable de la ciudad de Alto Hospicio, Región de Tarapacá (Sitio A)*. Aguas del Altiplano. Comuna de Alto Hospicio, Chile.
- [152] GHD. (2011b). *Declaración de Impacto Ambiental. Mejoramiento del Sistema de Tratamiento de Agua Potable de la ciudad de Alto Hospicio, Región de Tarapacá (Sitio B)*. Aguas del Altiplano. Comuna de Alto Hospicio, Chile.
- [153] GP Consultores Ltda. (2005). *Estudio Hidrogeológico y Biológico del Sistema Jachucoposa*. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Chile.
- [154] Grilli A. (1985). *Una aproximación al Estudio de la Evaporación desde Salares*. En: VII Congreso Nacional – Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Chile.
- [155] Grilli A. (1987). *Evaluación de la evaporación desde salares, utilizando trazadores naturales ambientales*. En: VIII Congreso Nacional – Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Chile.
- [156] Grilli A.; Aguirre E. & Duran M. (1999). *Origen de las aguas subterráneas del sector Pica – Salar del Huasco, provincia de Iquique, I región de Tarapacá*. En: XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS – Chile. Antofagasta, Chile.
- [157] Grilli A.; Pollastri A.; Ortiz J. & Aguirre E. (198-). *Evaluación de tasas de evaporación desde salares, utilizando técnicas isotópicas. Aplicación en el Salar de Bellavista, I región Chile*. Chile.
- [158] Grilli A. & Vidal F. (1986). *Evaporación desde Salares: Metodología para evaluar los recursos renovables. Aplicación en las regiones I y II*. En: Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (vol. I, año I, N° 2), p. (sin número). Chile.
- [159] Guerra P. (1975). *Guatacondo: Un Caso de Transformación Agraria y Cultural en la Zona Árida*. En: Revista Norte Grande, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, Vol I. N°s. 3 -4, p. 387 – 400. Chile.
- [160] Guerrero V. (1992). *Factores socio – políticos de la degradación*

- ambiental en la provincia de Iquique*. En: Revista de Ciencias Sociales, N° 001, p. 3 – 20. Iquique, Chile
- [161] Guerrero V. (1994). *Salar de Huasco: en busca del agua perdida*. En: Revista Ciencias Sociales, p. 38 – 54.
- [162] Hauser A. (1997). *Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile*. Servicio Nacional de Geografía y Minería Boletín (SERNAGEOMIN), N° 50. Santiago, Chile.
- [163] Hernández M. *Evaluación experimental y numérica de la evaporación desde aguas subterráneas someras. Aplicación a suelos salinos de la cuenca del Salar del Huasco*. Profesor guía: Muñoz J. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2009.
- [164] Herrera V. *Distribución y especiación de algunos elementos traza en salares andinos, I región, Chile*. (2002). Facultad de Ciencias Básicas y Matemáticas, Universidad Católica de Valparaíso, Chile, 2002.
- [165] Herrera V.; Carrasco C.; Sielfeld W.; Mahendra K.; Berrios V. & González C. (2004). *Evaluación del efecto de suplemento de agua sobre el ecosistema de Jachucoposa*. Chile.
- [166] Herrera, V.; Carrasco, C.; Briceño M.; Silva, M. & Ramirez, E. (2010a). *Behavior dissolved and precipitated material in surface water of Salar del Huasco, high Plateau northern Chile*. En: *International Conference Arid and Semi-Arid development through water augmentation*. Valparaíso, Chile, 14-16 diciembre.
- [167] Herrera V.; Carrasco C., González C., Ramírez E., Ostría E., Angel A. & Atienzo K. (2010b). *Hidrogeoquímica y comportamiento del agua en tres cuencas del altiplano del norte de Chile*. En: *IV Congreso Iberoamericano de Química Analítica en conjunto con el X Encuentro Nacional de Química Analítica y Ambiental*. Concón-Valparaíso, Chile.
- [168] Herrera V.; De Gregori I. & Pinochet H. (2009a). *Assessment of trace elements and mobility of arsenic and manganese in lagoon sediments of the Huasco and Coposa salt flats, Chilean Altiplano*. En: *Chilean Chemical Society*, Vol. 54, N° 4, p. 1 – 23.
- [169] Herrera V.; De Gregori I. & Pinochet H. (2009b). *Trace elements and operational speciation of antimony, arsenic, copper, iron, manganese and zinc in soils of two High-Andean salars of northern Chile*. En: *Chilean Chemical Society*, Vol. 54, N° 3.
- [170] Herrera, V.; Lictevoud, E.; Maass, C.; Córdoba, D.; Beltrán, P.; Aguilera, J. & Carrasco, C. (2012a). *Sistematización y diagnóstico de la información sobre hidroquímica y calidad de aguas de Tarapacá, Norte de Chile*. En: *XI Encuentro de Química Analítica y Ambiental*. Antofagasta, Chile, 12-16 noviembre.
- [171] Herrera V.; Beltrán P.; Alvarado P.; Meza R.; Córdoba D.; Castañeda A. & Carrasco C. (2012b). *Evaluación espacio-temporal de la calidad química en sector puquios del Salar de Llamara, norte de Chile*. En: *XI Encuentro de Química Analítica y Ambiental*. Antofagasta, Chile, 12-16 noviembre.
- [172] House H. (1962). *Recursos de agua subterránea de la zona norte*. Ministerio de Obras Públicas (MOP). Santiago, Chile.
- [173] Houston J. (2001). *La precipitación torrencial del año 2000 en Quebrada Chacarilla y el cálculo de recarga al acuífero Pampa Tamarugal, norte de Chile*. En: *Rev. geol. Chile* v.28 n.2 Santiago. Ed. ISSN 0716-0208. DOI: 10.4067/S0716-02082001000200002.
- [174] Houston J. (2004). *High-resolution sequence stratigraphy as a tool in hydrogeological exploration in the Atacama Desert*. En: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, p. 7 – 17. DOI: 10.1144/1470-9236/03-013. Chile.
- [175] Houston J. (2006a). *Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes*. En: *Elsevier Science Hydrology*, p. 402 – 412. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.036. Chile.
- [176] Houston J. (2006b). *Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact*. En: *International Journal of Climatology*. 26: 2181 – 2189. DOI: 10.1002/joc.1359 Santiago, Chile.
- [177] ICC – CONIC Ingenieros Consultores Ltda. (1982). *Estudio de las precipitaciones de la región de Tarapacá*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [178] Ingeniería Alemana S.A. (2011). *Declaración de Impacto Ambiental. Sistema de agua potable rural Chanavayita*. Ministerio de Obras Públicas (MOP). Santiago, Chile.
- [179] Ingeniería y Recursos Hidráulicos (IRH). (1983). *Evaluación de los recursos de aguas superficiales de la provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [180] Ingeniería y Recursos Hidráulicos (IRH). (1985). *Procesamiento de datos pluviométricos, pluviográficos y nivométricos de la I a la VII región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [181] Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales - Corporación de Fomento de la Producción (IREN – CORFO). (1975). *Catastro Pampa del Tamarugal*. Santiago, Chile.
- [182] Instituto Nacional de Estadísticas (INE); Comisión Económica para América Latina (CEPAL). (2005). *Chile: Proyecciones y Estimaciones de Población. Total País.1950-2050*. Serie de la publicación (CEPAL): OI N° 208. <http://www.ine.cl>.
- [183] Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2008). *Anuario Regional de Tarapacá 2008*. Dirección Regional de Tarapacá. www.inetarapaca.cl.
- [184] Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2012). *Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012*. http://www.censo.cl/2012/08/resultados_preliminares_censo_2012.pdf
- [185] Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (IREN). (1976a). *Carta nivel de cobertura vegetal de los suelos de Chile, Primera región*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO).
- [186] Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales - Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) & IREN. (1976b). *Inventario de recursos naturales por método de percepción del satélite Landsat. I Región de Tarapacá*. Chile.
- [187] Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales - Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) & IREN. (1979). *Fragilidad de los ecosistemas naturales de Chile*. Santiago, Chile.
- [188] IPLA Ltda. (1986). *Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional. Escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000*. Santiago, Chile.
- [189] IPLA Ltda. (1996). *Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile. Informe final. Regiones I, II, III, IV. SIT 26*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [190] Jaksic F.; Marquet P. & González H. (1997). *Una perspectiva ecológica sobre el uso del agua en el norte grande. Región de Tarapacá como estudio de caso*. En: *Seminario Minería y uso de agua de Chile*. Chile.
- [191] Japan International Cooperation Agency (JICA). (1979). *Report on geothermal power development project in Puchuldiza área*. Gobierno de la República de Chile. Chile.
- [192] Japan International Cooperation Agency (JICA). (1981). *Report on geothermal power development project in Puchuldiza área*. Gobierno

de la República de Chile. Chile.

- [193] Japan International Cooperation Agency (JICA); Pacific Consultants Internacional & Dirección General de Aguas (DGA). (1995). *The study on the development of water resources in northern Chile (El Estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte Norte de Chile)*. Gobierno de la República de Chile. Chile.
- [194] Jhonson J. *Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno*. Profesor guía: Muñoz J. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2009.
- [195] Kampf S. (1999). *El clima del altiplano y los recursos de aguas subterránea en el norte grande de Chile: Una visión comprensiva*. Santiago, Chile.
- [196] Karzulovic J. & García F. (1978). *Evaluación de los recursos hídricos de la provincia de Iquique. Antecedentes básicos*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [197] Karzulovic J. & García F. (1979). *Evaluación de recursos hídricos Provincia de Iquique. I Región de Tarapacá*. Dirección General de Aguas (DGA). Iquique, Chile.
- [198] Karzulovic J. (1980). *Informe hidrogeológico del sondaje profundo de Chacarilla Cuenca artesiana de Pica*. Provincia de Iquique. Santiago, Chile.
- [199] Kiefer E.; Dörr M.; Ibbeken H. & Götz H. (1997). *Gravity-based mass balance of an alluvial fan giant: the Arcas Fan, Pampa del Tamarugal, Northern Chile*. En: Revista Geológica de Chile, Vol. 24, N° 2, p. 165 – 185.
- [200] Klohn W. (1972). *Hidrografía de las Zonas Desérticas de Chile*. Santiago, Chile.
- [201] Knight Piésold S.A.; ARCADIS GEOTECNICA; Rock Drilling S.A. & GP Consultores Ltda. (2005). *Estudio de Impacto Ambiental Actualización Faena Minera Cerro Colorado*. Compañía Minera Cerro Colorado. Santiago, Chile.
- [202] Lahsen A. (1976). *La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile*. En: Actas primer congreso geológico Chileno. Santiago, Chile.
- [203] Lahsen A. (1978). *Evaluación de los resultados de la exploración del campo geotérmico de Puchuldiza I región Tarapacá*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [204] Lanino M. (2005). *Antecedentes climáticos de la estación experimental Canchones, en la Pampa del Tamarugal*. Chile.
- [205] Larrain H. & Couyoumdjian R. (1975). *El plano de la quebrada de Tarapacá de Antonio O'Brien. Su valor geográfico y socio-antropológico*. En: Revista Norte Grande, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, p. 329 – 362.
- [206] Lecarpentier C. (1973). *Géomorphologie et eaux souterraines: présentation de la carte géomorphologique de la Pampa del Tamarugal (Désert Nord Chilien)*. En: Bull – Inst Fr. Et. And., p. 29 – 57. (00113)
- [207] Lliboutry L. (1975). *Nieves y glaciares de Chile: Fundamentos de la glaciología*. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [208] Lobo E. (1978). *Recursos de Agua en Chile*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile (00130)
- [209] Lobos, F. *Variación espacio-temporal en la extensión de la superficie glaciar del cerro Sillajhuay entre 1989 y 2008, Comuna de Pica-Colchane, Región de Tarapacá, Chile*. Profesor guía: Cereceda P. & Osses P. Facultad de historia, geografía y ciencias políticas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2009.
- [210] López P.; Auqué L.; Garcés I.; Chong G.; Valles V. & Gimeno M. (1996). *Aplicación de la modelización geoquímica al estudio de pautas evolutivas en las salmueras del Salar de Llamara (Chile). Aproximación de método inverso*. En: Estudios Geológicos, v. 52, p. 197 – 209.
- [211] López P.; Auqué L.; Garcés I. & Chong G. (1999). *Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamara, Chile*. En: Revista Geológica de Chile, V. 26 N°1, p. 89 – 108. DOI: 10.4067/S0716-02081999000100005.
- [212] López C. & Manzur A. (2005). *Acciones ciudadanas y análisis de impacto vinculados a extracción de aguas subterráneas en salares Altoandinos, región de Tarapacá, Chile*. Santiago, Chile.
- [213] López P. & Garcés I. (2002). *Evolución química de las salmueras del Salar de Huasco (Chile) en condiciones experimentales controladas*. En: Revista Real Academia de Ciencias. Zaragoza 57, p. 201 – 209.
- [214] Luza J.; Pastenes J. & Zagal A. (1977). *Catálogo taxonómico de la florula de Pica*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Chile.
- [215] Madaleno I. & Gurovich A. (2007). *Usos conflictivos del agua en el Norte de Chile*. En: Boletín de la A.G.E. N° 45, p. 353 – 372.
- [216] Magaritz M.; Suzuki O. & Peña H. (1985). *Isotopic and chemical study of the water resources in the Iquique Province*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [217] Magaritz M.; Aravena R.; Peña H.; Suzuki O. & Grilli A. (1989). *Water chemistry and isotope study of streams and springs in northern Chile*. En: Elsevier Science Publishers B.V., p. 323 – 341.
- [218] Magaritz M.; Aravena R.; Peña H., Suzuki O. & Grilli A. (1990). *Source of Groundwater in the Desert of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Groundwater from the Andes*. En: Ground water, Vol. 28, N° 4, p. 513 – 517.
- [219] Maturana V. *Bioconcentración de arsénico y hierro en plantas de bofedales asociados a las vertientes de los salares altoandinos, norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2010.
- [220] Meneses C. (1980). *Identificación, descripción y evaluación de fuentes de información sobre el uso del recurso agua. I Región de Tarapacá*. Chile.
- [221] Millones M. *La herencia de la modernidad: Tarapacá en la sociedad del riesgo*. Profesor guía: Leiva S. Departamento de ciencias sociales, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2008.
- [222] Ministerio de Obras Públicas (MOP) y BHP Billiton. (2003). *Declaración de Impacto Ambiental. Mejoramiento ruta A-65, sector Cuesta Duplijsa. I Región*. Ministerio de Obras Públicas (MOP). Santiago, Chile.
- [223] Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2011). *Plan regional de infraestructura y gestión del recurso hídrico al 2021, Región de Tarapacá*. Chile.
- [224] Montenegro C. *Actualización de los antecedentes geoquímicos y geofísicos del campo geotérmico de Puchuldiza y su comparación con el área de exploración geotérmica de Guanacota, Región de Tarapacá*. Profesor guía: Deckart K. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008.
- [225] Montero P. (1969). *Estudio de regadío para la zona de Pica. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO)*. Santiago, Chile.
- [226] Morales P. (2011). *Valoración económica de 4 humedales altoandinos de la I región (Huasco, Coposa, Caya y Lirima)*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Chile.
- [227] Mortimer C. & Saric N. (1975). *Cenozoic studies in northernmost Chile*. En: Geologische Rundschau, p. 395 – 420.
- [228] Muñoz – Schick M.; Pinto R.; Mesa A.; Moreira – Muñoz A. (2001).

- Oasis de neblina en los cerros costeros del sur de Iquique, Región de Tarapacá, Chile, durante el evento El Niño 1997-1998. En: Revista chilena historia natural, v. 74 N° 2, p. (sin número).
- [229] Muñoz J. (1973). *Geología de Chile*. Chile.
- [230] Naranjo J. & Paskoff R. (1985). *Evolución cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, norte de Chile (18° -21 °S)*. En: IV Congreso Geológico Chileno. Antofagasta, Chile.
- [231] Navarrete C. *Remoción de arsénico (v) por biomasa de escamas de pescado*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2010.
- [232] Nester P.; Gayo E.; Latorre C.; Jordan T. & Blanco N. (2007). *Perennial stream discharge in the hiperarid Atacama desert of northern Chile during the last pleistocene*. En: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). Ed. H. E. Wright, Jr., p. 19.724 – 19.729.
- [233] Nester P. *Basin and paleoclimate evolution of the Pampa del Tamarugal forearc valley, Atacama Desert, northern Chile*. Faculty of the Graduate School, Cornell University, EE.UU., 2008.
- [234] Nester P. & Jordan T. (2012). *The Pampa del Tamarugal forearc basin in Northern Chile: the interaction of tectonics and climate*. En: Cathy Busby and Antonio Azor. *Tectonics of sedimentary basins: recent advances*, first edition, p. 369 – 381.
- [235] Niemeyer H. (1980). *Hoyas hidrográficas de Chile: Primera región*. Chile.
- [236] Niemeyer H. & Cereceda P. (1984). *Geografía de Chile. Tomo VIII, Hidrografía*. Chile.
- [237] Novoa A. & Bravo N. (1963). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulos Mamiña*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile.
- [238] Novoa A. (1970). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulos Iquique y Caleta Molle (N° 21 y 22)*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [239] Oikos Chile. (2004). *Estudio para la implementación de medidas para el control de la contaminación hídrica*. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Santiago, Chile.
- [240] Orellana H. *Aspectos geodinámicos del desierto costero de Atacama, sector Alto Patache (oasis de niebla) y Bajo Patache*. Profesor guía: Victoria M. Escuela de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2010.
- [241] Orellana J. (1970). *Utilización de pozos CORFO en área Pica – Matilla*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [242] Orostegui J. *Hidrogeología de la Quebrada de Guatacondo, I región de Tarapacá, Chile*. Profesor guía: Herrera C. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, 2005.
- [243] Orrego J. (2002). *El Estado de las Aguas Terrestres en Chile: Cursos y Agua Subterráneas*. En: Publicación Fundación Terram. Santiago, Chile.
- [244] Ortiz C. (2008). *Mediciones de evaporación con el domo en la Pampa del Tamarugal y el Salar de Llamara*. En: Seminario Internacional “La evaporación en la estimación de los recursos hídricos en cuencas del norte de Chile. Chile.
- [245] Ortiz M.; Morales L.; Silva P. & Acevedo E. (2012). *Estimación del nivel freático a partir del NDVI Landsat en la Pampa del Tamarugal (Chile)*. En: Revista de Teledetección N° 37, p. 42 – 50. Chile.
- [246] Ostría E. *Parámetros fisicoquímicos y plantas de los suelos de los bofedales asociados a las vertientes de los salares del Huasco y Coposa. Norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2007.
- [247] Ostría E. *Biodisponibilidad de arsénico en los bofedales de los salares del Huasco y Coposa. Altiplano, norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2009.
- [248] Oyarzo M. *Curvas intensidad – duración – frecuencia en las regiones I y II*. Profesor guía: Vidal F. Departamento de Física y Meteorología, Universidad de Valparaíso, Santiago, Chile, 1994.
- [249] Oyarzun R.; Cubas P. & Oyarzun F. (2008). *Apuntes geológicos, botánicos y antropológicos de un viaje por la Región de Tarapacá, Desierto de Atacama, Chile*. Chile.
- [250] Paskoff R. (1979). *Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del norte grande de Chile*. En: Norte Grande, Instituto Geográfico Universidad Católica de Chile. N°6, p. 7 – 22.
- [251] Paskoff R.; Cuitiño L. & Petiot R. (1998). *Carácter relictivo de la Gran Duna de Iquique, región de Tarapacá, Chile*. En: Revista Geológica de Chile, V. 25 N°2, p. (sin número). DOI: 10.4067/S0716-02081998000200008.
- [252] Pavez A. (2008). *Las aguas subterráneas en la costa del Perú y el norte de Chile*. Chile.
- [253] Peña H.; Grilli A.; Salazar C.; Orphanopoulos D.; Suzuki O.; Aravena R. & Rauert W. (1987). *Estudio de hidrología isotópica en el área del Salar de Llamara. Desierto de Atacama, Chile*. Dirección General de Aguas (DGA) y Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). Chile.
- [254] Peña H.; Suzuki O. & Grilli A. (1985). *Utilización de técnicas isotópicas en hidrología de zonas áridas. Aplicación en la Provincia de Iquique, I región – Chile*. En: VIII Congreso Nacional de Sociedad Chilena en Ingeniería Hidráulica. Chile.
- [255] Peralta F. (1983). *Recursos hídricos de la Pampa del Tamarugal*. En: Seminario “Desarrollo de zonas desérticas de Chile”. Chile.
- [256] Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC). (2009). *Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de aguas en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa II Informe Final Parte IV*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [257] Pramam Ambiental. (2006a). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Soronal*. Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH). Santiago, Chile.
- [258] Pramam Ambiental. (2006b). *Caracterización hidrogeológica del Salar Sur Viejo*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Soronal. Anexo XVI*. Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH). Santiago, Chile.
- [259] Pramam Ambiental. Laboratorio de relación Suelo-Agua-Planta (SAP) de la Universidad de Chile & Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2006 - 2008). *Plan de Seguimiento Ambiental Salar de Llamara. Informe de monitoreo, etapa de operación. Proyecto Aducción Llamara*. Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH). Santiago, Chile.
- [260] Pramam Ambiental. (2007). *Estudio de Impacto Ambiental. Zona de Mina Nueva Victoria*. Sociedad Química y Minera S.A. (SQM). Santiago, Chile.
- [261] Proust Consultores. (2008). *Informe derecho, extracciones y tasas unitarias de consumo de agua del sector minero. Regiones centro – norte de Chile. Informe técnico, SIT N° 146*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [262] Quezada J.; Cerda J. & Jensen A. (2010). *Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile*. En: *Andean Geology* formerly *Revista Geológica de Chile*, p. 78 – 109.
- [263] Ramírez E. *Propiedades físico – químicas de matrices abióticas en hábitats de escorrentías del Salar de Coposa, altiplano norte de Chile*.

- Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2006.
- [264] Ramírez E. *Distribución de arsénico total en hábitats de alimentación de flamencos: aguas, sedimentos, fitoplancton y zooplancton. Salar del Huasco. Altiplano norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2007.
- [265] REG Ingenieros Consultores Asociados Ltda. (1987). *Actualización de las estadísticas fluviométrica de la I a la VII Región*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [266] REG Ingenieros Ltda. (1991). *Estudio de síntesis de catastros de usuarios de agua e infraestructuras de aprovechamiento. Informe técnico, SIT N°6*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [267] Rengifo P.; Acosta O. & Muñoz J. (2012). *Estimación de la recarga por precipitación al acuífero de las cuencas del Salar de Coposa y Michincha*. Chile.
- [268] Rengifo P.; Dzogolyk E. & Acosta O. (2010). *Use of deep groundwater reserves: Practical experience in deep water production*. En: Congreso WIM. Santiago, Chile.
- [269] Rengifo P.; Dzogolyk E.; Acosta O. & Delgado J. *Exploración y explotación de acuíferos altiplánicos profundos: Caso de estudio y aplicación de cuenca de Coposa, Chile*. Compañía Minera Doña Ines de Collahuasi. Chile.
- [270] Reyes P.; Diaz C. & Orellana F. (2009). *Trace elements and operational speciation of antimony, arsenic, copper, iron, manganese and zinc in soils of two high-andean salars of northern Chile*. En: Chilean Chemical Society, Vol. 54, N°3, p. 1 – 18.
- [271] Risacher F.; Alonso H. & Salazar C. (1998). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II, III Regiones – Chile*. Santiago, Chile.
- [272] Risacher F.; Alonso H. & Salazar C. (2003). *The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review*. En: Earth Sciences, p. 249 – 293. DOI: 10.1016/S0012- 8252 (03) 00037- 0
- [273] Roja R. *Groundwater flow model for Pampa del Tamarugal aquifer – Northern Chile*. Profesor guía: Dassargues A. Vrije Universiteit Brussel, Belgium, 2005.
- [274] Rojas R. & Dassargues A. (2006). *Stochastic analysis of the recharge uncertainty of a regional aquifer in extreme arid conditions*. En: XI International Congress Int. Assoc. For Mathematical Geology. Belgium.
- [275] Rojas R. & Dassargues A. (2007). *Groundwater flow modelling of the regional aquifer of the Pampa del Tamarugal, northern Chile*. En: Hydrogeology Journal 15, p. 537 – 551. DOI: 10.1007/s10040-006-0084-6
- [276] Rojas R.; Batelaan O.; Feyen L. & Dassargues A. (2010). *Assessment of conceptual model uncertainty for the regional aquifer Pampa del Tamarugal - North Chile*. En: Hydrol. Earth. Syst. Science, p. 171 – 192.
- [277] Ruiz G. (1969). *Abastecimiento futuro de agua potable del norte grande*. Chile.
- [278] Salazar C. (1995). *Aplicación de técnicas de hidrología isotópica en el área de la provincia de Iquique, I Región*. En: IV Jornada de trabajo. Programa hidrológico internacional. Chile.
- [279] Salazar C.; Rojas L. & Pollastri A. (1998). *Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal. I Región*. Informe técnico, SIT N° 48. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [280] Salazar C.; Rojas L.; Lillo A. & Aguirre E. (1999). *Análisis de requerimientos hídricos de vegas y bofedales en el norte de Chile*. Chile.
- [281] Sanchez J. (1974a). *Antecedentes hidrogeológicos de Pampa de Huara, Provincia de Tarapacá, Chile*. En: Revista Norte Grande, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, p. 97 – 100.
- [282] Sánchez J. (1974b). *Posibilidades de aprovechamiento de aguas subterráneas en la rehabilitación de terrenos de cultivo en Pampa del Tamarugal*.
- [283] Santis L. *Análisis químico de soluciones acuosas naturales y de lixiviación de minerales de cobre*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2010.
- [284] Santoro C.; Núñez L.; Standen V.; González H.; Marquet P. & Torres A. (1998). *Proyecto de irrigación y la fertilización del desierto*. En: Estudio Atacameños N° 16, p. 321 – 336.
- [285] Sayes J. (1972). *Geología del Salar de Pintados – Bellavista. Provincia de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Iquique, Chile.
- [286] Schlunegger F.; Kober F.; Zeilinger G. & von Rotz R. (2010). *Sedimentology-based reconstructions of paleoclimate changes in the Central Andes in response to the uplift of the Andes, Arica region between 19 and 21°S latitude, northern Chile*. En: Geol Rundsch, p. 123 – 137.
- [287] Schultz A. (1959). *Mapa geológico de Tarapacá*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [288] Schultz A. (1972). *Mapa geológico de Tarapacá y sus aplicaciones*. En: Seminario sobre uso de los recursos de agua en Chile. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile
- [289] Schultz A. (1984). *Catastro de Pozos por región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [290] Secretaria Comunal de Planificación. (2012). *Declaración de Impacto Ambiental. Optimización y mejoramiento de operación del relleno sanitario de Pica*. Pica, Chile
- [291] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2003). *Mapa Geológico de Chile: versión digital. Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003)*. Santiago. Chile.
- [292] SIGA Ingeniería y Consultoría S.A. (2009). *Diagnóstico manejo de cauce Quebrada de Tarapacá. Región de Tarapacá*. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Chile.
- [293] Silva L. (1977). *Carta Geológica de Chile. Hojas Pisagua y Zapiga, Provincia de Iquique, Tarapacá (I Región) Chile*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [294] Silva M. *Distribución de arsénico total presente en lessonia nigrescens (Bory, 1826) y en aguas de su hábitat, zona costera de la provincia de Iquique - norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2006.
- [295] Silva M. *Estudios comparativo en geoquímica de aguas lenticas: vertiente Jachucoposa y desembocadura río Loa*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2005.
- [296] SITAC Servicio de Ingeniería. (2007). *Balance Hídrico Nivel Regional. Tarapacá, Antofagasta, Atacama*. Corporación de fomento de la Producción. Santiago, Chile.
- [297] Skarmeta J. & Marinovic N. (1981). *Carta Geológica de Chile (N°51). Hoja Quillagua*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [298] Sociedad Contractual Minera – Minera Copiapo. (2011a). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto Norte-Norte. Producción de Yodo Pampa Chiza*. Chile.
- [299] Sociedad Contractual Minera – Minera Copiapo. (2011b). *Declaración de Impacto Ambiental. Aducción agua de mar en sector Junín*. Chile.
- [300] Sociedad Contractual Minera – Minera Copiapo. (2012). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto Trazado de agua a Chiquiquiray*. Chile.
- [301] Soluciones en Gestión Ambiental (SGA). (2009). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto Producción de Yodo SCM Bullmine*. SCM Bullmine.

- Santiago, Chile.
- [302] SRK (Sudamérica) S.A. (1996). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Lagunas*. Sociedad Química y Minera. Santiago, Chile.
- [303] Sträter E.; Westbeld A. & Klemm O. (2010). *Pollution in coastal fog at Alto Patache, Northern Chile*. En: *Environ Sci Pollut Res*, p. (sin número). DOI: 10.1007/s11356-010-0343-x.
- [304] Sustentable S.A. (2010). *Estudio de Impacto Ambiental. Exploración Geotérmica Puchuldiza Sur 2*. Geoglobal Energy (GGE). Santiago, Chile.
- [305] Sustentable S.A. (2011). *Declaración de Impacto Ambiental. Exploración Minera Puchuldiza*. Minera Southern Legacy Chile Ltda. Santiago, Chile.
- [306] Suzuki O. & Aravena R. (1984). *Hidrología Isotópica y el Recurso del Área Esmeralda - Pica - Matilla*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [307] Suzuki O. & Aravena R. (1985). *Hidrología Isotópica y el Recurso Agua del Sector Esmeralda - Pica - Matilla*. En: *Nucleotecnica*, Vol. 4, N° 8, p. 41 – 51.
- [308] Suzuki O.; Silva C.; Fritz P. & Salati E. (1979). *Isotope hydrology of groundwaters in the Pampa del Tamarugal, Chile*. Chile.
- [309] Suzuki O. (2007). *The future of Northern Chile and water resources*. En: *Environmental Issues Analysis*.
- [310] Taylor G. (1947). *Ground water studies in Tarapaca Province*. Chile. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [311] Tomlinson A.; Blanco N.; Maksae V.; Dilles J.; Grunder A. & Ladino M. (2001). *Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca - Chuquicamata, Región I y II (20°30' - 22°30'S)*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Chile.
- [312] Toro J. (1967). *Evaporación de distintos tipos de suelos de la Pampa del Tamarugal*. Chile.
- [313] Torres C. *La salinidad y su relación con el contenido de Boro y Arsénico en cuerpos de agua del Salar del Huasco, I Región de Tarapacá*. Profesor guía: Cortes J. Departamento de Química, Universidad de Tarapacá, Chile, 1997.
- [314] Tröger U. & Gerstner D. (2004). *Estudio de investigación de la situación hidrogeológica en la formación altos de Pica. Informe técnico, SDT N° 174*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [315] Trujillo P. & Bravo R. (1978). *Prospección campo de Puchuldiza. Resumen de actividades*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [316] Universidad de Chile. (1973). *Estudio de los recursos hídricos de la cuenca del río Loa*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [317] Universidad de Chile. (1991). *Caracterización geográfica del sistema físico - ambiental de las regiones I y II*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [318] Universidad de Chile. (2009). *Caracterización de los humedales de Lirima y Caya. Región de Tarapacá*. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Chile.
- [319] Universidad de Concepción. (2010). *Diagnóstico de fuentes de aguas no convencionales en el regadío inter-regional*. Ministerio de Agricultura – Comisión Nacional de Riego. Chile.
- [320] Valverde V. (1996). *Ficha informativa sobre humedales Ramsar*. Corporación Nacional de Forestal (CONAF). Chile
- [321] Velozo L. (1974). *Características Geomorfológicas de la Pampa de O'Brien, Pampa del Tamarugal, Tarapacá*. En: *Revista Norte Grande*, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, p. 101 – 111.
- [322] Velozo L. & Sanchez M. (1991). *Características Geomorfológicas. Área litoral: Iquique-Caleta Molle*. En: *Revista de Geografía Norte Grande*, p. 3 – 8.
- [323] Vergara H. (1978). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulos Ujina*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile.
- [324] Weischet W. (1975). *Las condiciones climáticas del desierto de Atacama como desierto extremo de la tierra*. En: *Revista Norte Grande*, Instituto de Geografía - Universidad Católica de Chile, Volumen 1 (3-4), p. 363 – 374.
- [325] Welsch L. *Geoquímica y biodisponibilidad de arsénico y cobre en la desembocadura del río Loa, norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2009.

Glosario

216

Acuífero. Del latín *aqua*, *agua* y *fero*, llevar. Terreno permeable que contiene una napa de agua subterránea. *Ver napa de agua subterránea.*

Afloramiento. Parte de un terreno visible a la superficie del suelo.

Afluente. El *afluente* o *tributario* es una corriente de agua, río o arroyo (de segundo orden) que vierte sus aguas en otro principal. En caso de tener idéntico caudal, es aquel que tiene menor extensión en su recorrido, desde el origen hasta la confluencia.

Aforo. Medida del caudal (de un río, manantial, etc.). *Véase caudal.*

Aguas Subterráneas. *Ver napa de agua subterránea.*

Agua Superficial. Agua en estado líquido o sólido que fluye o se almacena sobre la superficie del suelo y en contacto directo con la atmósfera.

Aguas meteóricas. Aguas provenientes de la precipitación: lluvia, rocío, pedrisco y/o nieve.

Algoritmo. Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.

Altiplano. El *Altiplano* o *Puna* es una región de América del Sur que comprende el norte de Chile, el centro y sur de Perú, la parte occidental de Bolivia y el noroeste de Argentina. Corresponde a cuencas sedimentarias formadas sobre los 3.500 m s.n.m. por la actividad tectónica y volcánica acontecida en estas latitudes.

Análisis de sensibilidad. En modelación, el análisis de sensibilidad es el proceso por el cual un modelo es probado para establecer una medida del cambio relativo en los resultados del modelo causado por un cambio correspondiente en los parámetros del modelo. Este tipo de análisis provee información sobre el nivel de certeza (o no) para asegurar los resultados del modelado.

Anisotropía. Cualidad de los materiales en los que el comportamiento varía según la dirección considerada. En los acuíferos esta propiedad está condicionada por la distribución y ordenamiento de los materiales, considerando en un mismo punto valores de conductividad hidráulica horizontal distintos a los valores en la vertical.

Ápice. Cumbre o punto más alto de una geoformación como una montaña. Específicamente es el punto más alto de un abanico aluvial, usualmente el punto donde las corrientes que forman el abanico emergen de las montañas o de los cañones confinados.

Árido. Caracteriza un clima o una zona con precipitaciones anuales inferiores a 250 mm. El término semiárido caracteriza precipitaciones anuales entre 200 y 400 mm.

Balance hídrico. El *balance hídrico* o *hidrológico* consiste en establecer una igualdad entre las entradas y salidas de agua de un sistema (cuenca hidrográfica, embalse, acuífero, etc.).

Bofedal. Humedal de altura, pradera nativa poco extensa con permanente humedad. Está habitado por especies vegetales herbáceas que presentan crecimiento en cojines, semiglobosa y cuerpos compactos en superficie.

Calibración. Proceso por el cual los valores obtenidos a partir de un modelo son comparados con valores o registros tomados en el terreno, o bien, mediante sistemas de referencia que permitan acercar el modelo al comportamiento real del sistema modelado. En física, es el proceso de ajustar con la mayor exactitud posible las indicaciones de un instrumento de medida con los valores de la magnitud que ha de medir.

Calidad del agua. Características físicas, químicas y biológicas que definen la composición del agua.

Carta geológica. Mapa donde se representan sobre una base planimétrica-altimétrica (mapa topográfico), los diferentes tipos de rocas, fallas, pliegues y estructuras que afloran en una región determinada.

Carta geomorfológica. Mapa donde se representan las características propias de la corteza terrestre; la geometría y disposición de las formas del relieve; la naturaleza y estructura de las formas superficiales; los procesos, ritmo de formación y edad de las formas del relieve. *Ver Geomorfolología.*

Caudal. En términos hidrológicos el *caudal* (también llamado *gasto*) se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo. Al proceso de medición del caudal se denomina "aforo". Asimismo, el caudal se puede definir como el producto de la sección del canal por la velocidad media del flujo que discurre a través.

Celda. Es una unidad de discretización espacial en la cual un modelo puede cuantificar dinámicamente variables de estado (ej. almacenamientos por intercepción superficial en el perfil del suelo y subterráneo); flujos de intercambio (ej. evapotranspiración, escurrimientos,

infiltración, etc.) y otros tipos de variables relacionadas con la dinámica del flujo.

Cobertura cartográfica. La *cobertura* o *capa cartográfica* es un archivo geoespacial propio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que representa elementos territoriales en 2 y 3 dimensiones mediante puntos, líneas y polígonos.

Coefficiente de almacenamiento. Relación entre el volumen de agua liberado por una columna de acuífero de superficie igual a la unidad cuando el nivel piezométrico desciende una unidad; y un volumen unitario de acuífero.

Coefficiente de determinación. Coeficiente que mide el grado de dependencia entre variables, tomando el valor 0 en caso de correlación nula o el valor 1 en caso de correlación total.

Coefficiente fenomenológico. El *coeficiente fenomenológico* o *cinético* es el coeficiente de viscosidad (de cizalla; η), que establece la relación entre el flujo de un proceso y la afinidad de dicho proceso mediante una ecuación definida por la ley de Newton.

Columna estratigráfica. Representación gráfica en forma de corte vertical de una serie de materiales depositados en un punto. En regla general, los materiales más antiguos se encuentran en la parte inferior y los más modernos en la parte superior de la columna.

Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad. Volumen de agua que atraviesa un material por unidad de tiempo, bajo el efecto de un gradiente hidráulico unitario en una unidad de superficie perpendicular a la dirección del flujo, de acuerdo a la Ley de Darcy. Representa la facilidad con la que un material permite el paso del agua a través de él.

Cono de deyección o abanico aluvial. Acumulación de material en forma de abanico ensanchado hacia abajo, transportado por corrientes de montaña (fuerte pendiente y caudal irregular) y depositado en el punto en el cual la corriente pierde velocidad y capacidad a transportar materiales (sobre una llanura o un amplio valle). Se caracteriza por una suave pendiente entre 1 y 10 grados, dependiendo de la pendiente por la que se desliza.

Coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator). Sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator que se construye como la proyección de Mercator normal, pero tangente a un meridiano en vez de hacerlo por el Ecuador. A diferencia del sistema de coordenadas geográficas, expresadas en longitud y latitud, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros únicamente al nivel del mar que es la base de la proyección del elipsoide de referencia.

Cordillera. Unidad de relieve formada por un conjunto de montañas relacionadas entre sí por su constitución geológica, estructura y génesis.

Corte geológico o perfil geológico. Sección transversal o longitudinal de parte de la corteza terrestre entre dos puntos de una determinada región, en el cual se representan las estructuras geológicas y las secuencias litológicas.

Estratigrafía. Parte de la geología que estudia la disposición y características de las rocas de acuerdo a su propia génesis y su relación con el ambiente deposicional característico.

Cuenca hidrográfica. Superficie delimitada por una línea divisoria de agua y constituida por un conjunto de pendientes inclinadas hacia una corriente de agua y en la cual vierte sus aguas de escurrimiento. Existen varios tipos de cuencas: *endorreicas* (cuyas aguas no tienen salida fluvial hacia el mar, sino que desembocan en lagos, lagunas o pequeños cuerpos de agua), *exorreicas* (descarga sus aguas en el mar) y *arreicas* (sus aguas no desembocan ni en lagos ni en mares, pues se evaporan o se infiltran).

Cuenca sedimentaria. Región de hundimiento progresivo de un sector de la corteza (subsidente) en la cual se acumulan sedimentos producidos principalmente por la erosión de la superficie de la tierra y su posterior transporte. Existen varios tipos de cuencas sedimentarias, de las cuales se destacan: *cuenca de antepaís* formadas junto a orógenos compresivos debido a la flexión de la litosfera terrestre bajo el peso de las rocas apiladas durante la colisión tectónica; y *cuenca de antearco* o *cuenca de fosa-arco* que es la parte de antearco adyacente al arco-isla que se caracteriza por el depósito de sedimentos en capas horizontales en contraste con el prisma de acreción altamente formado, adyacente a la fosa oceánica.

Datum. Punto de referencia para la realización de mediciones de posición horizontal y/o vertical, y que de acuerdo a un conjunto de parámetros geométricos y geodésicos que lo definen permite asociar las mediciones realizadas con un modelo de representación de la superficie terrestre. En Chile se utilizan los datum SAD 69, PSAD 56 y WGS 84 (*World Geodetic System 84*, que significa Sistema Geodésico Mundial 1984).

Delimitación Hidrográfica. La *delimitación hidrográfica* o *delimitación de una cuenca hidrográfica* es determinar o fijar con precisión los límites de una cuenca hidrográfica. Espar del estudio y el análisis hidrológico ya que permite delimitar el área del sistema hidrológico utilizado para calcular el balance hídrico. La metodología empleada para la delimitación puede ser manual (sobre un plano topográfico o directamente en pantalla) o digital de forma semiautomática, mediante herramientas SIG e información base geoespacial.

Demografía. Estudio estadístico de una colectividad humana, referido a un determinado momento o a su evolución.

Depósito lacustre, aluvial, salino, eólico y glaci. Material terrestre de cualquier tipo, consolidado o no, acumulado por procesos o agentes naturales (agua, viento, hielo, volcanes y otros agentes). Existen varios tipos de depósito de acuerdo al tipo de sedimentación y al mecanismo que los genera, tales como: *lacustre* (depositado en el fondo de los lagos); *aluvial* (depositado por un río a lo largo de su llanura de inundación); *eólicos* (depositados por el viento); *glacis* o *glaciares* (depositados por el hielo o por el agua de deshielo).

Depresión. En geomorfología, el término *depresión* designa la zona del relieve terrestre situada a una altura inferior a las regiones circundantes. En un terreno u otra superficie, es una concavidad de extensión determinada.

Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA). Derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los

requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe el Código de Aguas chileno¹.

Desalación / Desalinización de agua. Proceso mediante el cual se quita la sal del agua de mar o agua salobre para producir agua potable u otros fines, de acuerdo a los estándares de calidad correspondientes

Diagrafía de Pozo. Registro continuo en un pozo de parámetros físicos, principalmente la resistividad eléctrica, polarización espontánea e inducida, radioactividad natural e inducida, rayo gamma natural, temperatura, conductividad, etc.

Diagramas de Piper, de Stiff y de Schoeller. Gráficos hidrogeoquímicos que permiten estudiar la composición de las aguas, representando el quimismo de las muestras a partir de las concentraciones de sus compuestos mayoritarios [Cloro (Cl⁻), Bicarbonato (HCO₃⁻), Sulfato (SO₄²⁻), Sodio (Na⁺), Calcio (Ca²⁺), Potasio (K⁺) y Magnesio (Mg²⁺)]. Representan, con diagramas triangulares, la proporción de tres componentes en la composición de un conjunto o de una sustancia. Los diagramas de Stiff o poligonales representan en escala logarítmica la concentración de aniones y cationes en semirrectas paralelas, uniendo los extremos generando un polígono. Los diagramas de Schoeller o de columnas verticales representan el valor en miliequivalentes por litro (meq/l) de distintos aniones, cationes o una suma de ellos, utilizando una escala logarítmica y uniendo los puntos mediante una secuencia de líneas.

Diferencias finitas. Método o expresión matemática (de la forma $f(x + b) - f(x + a)$) que consiste en una aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un limitado número de puntos seleccionados.

Divisoria de aguas. Es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que representa el límite entre dos cuencas hidrográficas vecinas.

Drenaje. En geomorfología, el drenaje o red drenaje se refiere a la red natural de transporte gravitacional de agua, sedimento o contaminantes, formada por ríos, lagos y flujos subterráneos, alimentados por la lluvia o la nieve fundida.

Ecorregión. Región geográfica con determinadas características climáticas, geológicas, hidrológicas y biológicas.

Ecosistema. Sistema natural formado por un conjunto de seres vivos (biocenosis) y el medio físico donde se relacionan (biotopo). Se trata de una unidad de organismos relacionados entre sí y su ambiente.

Datación radiométrica. Método para determinar la edad absoluta de rocas, minerales y restos orgánicos fosilizados (paleontológicos) utilizando la variación regular a lo largo del tiempo de isótopos radioactivos en estos elementos. Se compara la abundancia natural de isótopos radioactivos con sus descendientes utilizando la semivida o periodo de semidesintegración.

Efluente. En hidrología, un *efluente* o *distributivo* corresponde a un curso de agua que, desde un lugar llamado confluencia, se des-

prende de un lago o río como una derivación menor, ya sea natural o artificial. En hidrogeología también se denomina "río efluente" o "río ganador" al que recibe volumen líquido desde un acuífero. Por el contrario, un "río influente" o "río perdedor" es el río que cede agua por infiltración a las napas freáticas.

Elementos finitos. Los *elementos finitos* o *método de los elementos finitos* es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. Se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado.

Endémico. Propio y exclusivo de determinadas localidades o regiones.

Enfermedades hídricas. Las *enfermedades hídricas* (o *efectos adversos del agua sobre la salud humana*) son aquellas afecciones causadas por la contaminación del agua por desechos humanos, animales o químicos. Las enfermedades más comunes son: el cólera, la fiebre tifoidea, la shigella, la poliomielitis, la meningitis, la hepatitis, la diarrea, etc.

Ensayo de bombeo. Un *ensayo de bombeo* o *prueba de bombeo* consiste en extraer una cantidad de agua de una captación durante un cierto período de tiempo, observando la variación que se produce en los niveles piezométricos del acuífero. Permite conocer la capacidad o el rendimiento de una captación y determinar las características hidráulicas del acuífero.

Erosión. Desgaste o destrucción producida en la superficie de un cuerpo por la fricción continua o violenta de otro. La erosión de la superficie terrestre es el resultado de la acción combinada de varios factores o agentes externos, como la temperatura, el agua, el viento, la gravedad y la vida vegetal y animal.

Escala. Relación entre la distancia en la fotografía, carta o mapa u otro elemento gráfico, y su distancia correspondiente en el terreno. Un mapa con escala pequeña (1:25.000, 1:50.000, 1:200.000) proporciona menos detalle, aunque la cobertura espacial será mayor, que un mapa con escala grande (1:5.000, 1:2.000...) que proporciona mayor información y detalle pero, en contraparte, representa una área de territorio menor.

Escarpe. Declive áspero del terreno.

Escurrimiento. Agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie del suelo y llega a una corriente principal para finalmente ser drenada hacia la salida de la cuenca. De acuerdo con las partes de la superficie terrestre en las que se realiza el escurrimiento, éste se puede dividir en: *escurrimiento superficial* o *escorrentía* (parte del agua que escurre sobre el suelo y por los cauces de los ríos); *escurrimiento subsuperficial* (parte del agua que se infiltra y se desliza a través de los horizontes superiores del suelo); y *escurrimiento subterráneo* (parte del agua que percola hacia el agua subterránea).

Estación de monitoreo de agua de niebla, calidad de agua, fluviométrica, meteorológica y piezométrica. Punto de medición

¹ Código de Aguas 1981. Art.5. Más información sobre el Código de Aguas en <http://www.leychile.cl>

y registro regular de diversas variables, ya sean meteorológicas, de agua de niebla, de calidad de agua, fluviométricas, piezométricas, etc. Ver capítulo IV: *Observatorio del agua*.

Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Es el procedimiento técnico-administrativo que sirve para identificar, predecir, prevenir e interpretar los impactos ambientales que producirá la ejecución de un proyecto en su entorno, todo ello con el fin de que la institución ambiental competente pueda aceptarlo, rechazarlo o modificarlo.

Evaporación. Proceso físico mediante el cual, el agua pasa del estado líquido o sólido al estado gaseoso mediante la transferencia de energía calórica. Se expresa en mm o litros por unidad de tiempo.

Evapotranspiración. Proceso de pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm por unidad de tiempo.

Evolución morfoclimática. Modificación de una organización altitudinal como consecuencia de fluctuaciones climáticas.

Falla. Discontinuidad que se forma por fractura en las rocas de la corteza terrestre, a lo largo de la cual ha habido movimiento de uno de los lados respecto del otro.

Flujo superficial y subsuperficial. Ver definición de *escurrimiento*.

Forestal. Perteneciente o relativo a los bosques y a los aprovechamientos de leñas, pastos, etc. Asimismo, se entiende como bosque forestal a una replantación de especies realizada para fines de protección y reacondicionamiento de un espacio de interés ecológico, económico y turístico.

Fortran. Es un lenguaje de programación de alto nivel de propósito general, procedimental e imperativo, que está especialmente adaptado al cálculo numérico y a la computación científica.

Fosilizar. Conjunto de procesos que hacen que un organismo (o cuerpo orgánico), alguna de sus partes o los rastros de su actividad, pasen a formar parte del registro fósil o se convierta en fósil.

Fotografía aérea. La *fotografía aérea* o *aerofotografía* es una imagen de la superficie del terreno en blanco y negro, color o en longitudes de onda del infrarrojo, que ha sido capturada con una cámara fotogramétrica análoga o digital desde un avión en vuelo. Son fuente de información básica para la elaboración de cartografía del territorio, planificación urbana, prospección agrícola, minera y de recursos naturales en general.

Fractura. Separación bajo presión de terrenos, rocas e incluso minerales.

Galerías. Una *galería* o *socavón* es un sistema de irrigación subterráneo que permite captar aguas subterráneas y conducir las hasta un punto determinado, mediante una excavación subterránea subhorizontal en forma de túnel, a diferencia de los pozos, que se construyen con la misma finalidad.

Geodatabase (GDB). Una *geodatabase (GDB)* o *base de datos espacial (BD)* se define como una colección de uno o más ficheros de datos o tablas almacenadas de manera estructurada, tal que las interrelaciones que existan entre diferentes campos o conjuntos de datos puedan ser utilizadas por el sistema de gestor de base de datos (SGBD) para su manipulación y recuperación.

Geofísica. Rama de las Ciencias de la Tierra que estudia las características físicas de la Tierra utilizando técnicas de medición indirectas como la gravimetría, geomagnetismo, sismología, radar geológico, resistividad aparente, etc. Con la ayuda de hipótesis geológicas, la geofísica busca validar un modelo matemático resultante de medidas hechas en el terreno.

Geoforma. Se refiere a cualquier componente o rasgo físico de la superficie terrestre que ha sido formado por procesos naturales y que tiene una forma particular.

Geología. Ciencia que estudia la tierra, en todos sus aspectos y alcances, su origen, constitución, evolución, los procesos que se realizan en ella tanto interna como externamente a lo largo del tiempo geológico (Geo = Tierra, Logo = Tratado, discurso lógico).

Geomorfología. Ciencia que estudia las formas del relieve terrestre teniendo en cuenta su origen, la naturaleza de las rocas, el clima de la región y las diferentes fuerzas endógenas y exógenas que de modo general, entran como factores constructores del paisaje (Geo = Tierra, Morfo = Forma, Logo = Tratado, discurso lógico).

Geoquímica. Rama de las ciencias de la tierra que estudia la composición y dinámica de los elementos químicos en la Tierra y las reglas que gobiernan la distribución de dichos elementos.

Georreferenciación. Técnica o proceso utilizado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que consiste en asignar una serie de coordenadas geográficas procedentes de un objeto espacial (representado por un punto, línea, área o volumen) de referencia conocida, a un objeto espacial de destino. Este proceso permite localizar una imagen (o mapa) en un sistema de coordenadas y Datum determinado, mediante el registro de tres o más puntos de control, de tal manera que se defina con precisión el mapa sobre la superficie terrestre.

Geotermal. Actividad hidrológica mediante la cual el agua aflora caliente debido a su circulación por zonas profundas.

Glaciar. Masa de hielo perenne, formada por acumulación de nieve, cualesquiera sean sus dimensiones y formas. En Chile existen varios tipos de glaciares tales como: *Glaciares de piedemonte*, *Glaciares de valle*, *Glaciares de montaña*, *Glaciares de Circo*, *Glaciarretes*, *Glaciares rocosos*, etc. Ver capítulo IV.

Geíser. Fluencia violenta más o menos vertical, con intermitencia de agua y/o vapor y con caracteres térmicos y minerales específicos. Está vinculada en general a áreas volcánicas.

Glaciología. Rama de las ciencias de la Tierra que estudia el hielo y los glaciares.

Gradiente hidráulico. Pendiente de la superficie piezométrica en el acuífero en una dirección dada. Se determina por la relación de la diferencia de niveles entre dos puntos y la distancia que los separa.

Hidrogeología. La *hidrogeología* o *hidrología subterránea* es la ciencia que estudia el agua subterránea, su origen, dinámica, distribución y circulación en el suelo y las rocas, teniendo en cuenta su interacción con las condiciones geológicas y el agua de superficie.

Hidrogeoquímica. Especialidad de la Hidrogeología e Hidroquímica que estudia los procesos químicos que afectan a la distribución y circulación de los compuestos químicos en las aguas subterráneas.

Hidrología. Ciencia de la tierra que estudia el ciclo del agua, es decir los intercambios entre la atmósfera, la superficie terrestre y su subsuelo. Se divide en hidrología de superficie e hidrología subterránea o hidrogeología

Hidrometeorología. Rama de la ciencia de la atmósfera (Meteorología) y de la Hidrografía que estudia la transferencia de agua y energía entre la superficie y la atmósfera.

Hidroquímica. Especialidad de la hidrología, que estudia los procesos químicos que afectan a la distribución y circulación de los compuestos químicos en las aguas, basadas especialmente en la teoría y los conocimientos químicos, pero también en la biología y geología como ciencias que interactúan con el medio acuoso y que pueden modificar su quimismo.

Hidrotermal. Que se refiere a circulaciones de aguas calientes asociadas a la actividad ígnea y el agua existente en los cuerpos afectados.

Humedal. Zona de tierras, generalmente planas, cuya superficie se inunda de manera permanente o intermitentemente. Al cubrirse regularmente de agua se produce una saturación del suelo, quedando desprovisto de oxígeno y dando lugar a un ecosistema híbrido entre los puramente acuáticos y los terrestres.

Imagen satelital. Representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial o nave espacial.

Ión. Átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica.

Isótopo. Átomos de un mismo elemento que tienen igual número de protones y electrones (igual número atómico), pero diferente número de neutrones (difieren en su masa atómica).

Isoyeta o Isohiet. Línea que une, en un mapa, los puntos que reciben igual cantidad de precipitación.

Línea de flujo. Una *línea de flujo* o *línea de corriente* es la trayectoria seguida por un elemento (o partícula) suspendido en un fluido móvil.

Litología. Características petrológicas (referente a las propiedades físicas, químicas y físico-químicas de una roca) de un sustrato, cuerpo o elemento rocoso.

Lixiviación. La *lixiviación* o *extracción sólido-líquido* es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno o más de los componentes solubles del sólido. En geología, la lixiviación es el proceso de lavado de un estrato de terreno o capa geológica por el agua.

Magma. Masa ígnea en fusión existente en el interior de la Tierra, que se consolida por enfriamiento.

Malla. Una *malla* o *red* es un conjunto de celdas conectadas mediante nodos en donde se produce un intercambio de información entre ellos. Dependiendo de la configuración de la malla, la información de cada entidad puede estar incluida bien en la propia celda o directamente en los nodos.

Manantial. Agua que brota naturalmente de la tierra o entre las rocas.

Mapa. Representación gráfica y métrica en 2 dimensiones de una parte de la superficie terrestre, en la que se da información relativa

a una ciencia determinada. Existen un sinnúmero de tipos de mapas entre ellos están los que se mencionan en este trabajo:

- **Mapa topográfico:** representación parcial, del relieve de la superficie terrestre a una escala definida.
- **Mapa de isotermas:** representa las curvas que unen los puntos con igual temperatura en la unidad de tiempo considerada.
- **Mapa geológico:** representación de las características geológicas de una superficie determinada
- **Mapa hidrogeológico:** mapa que representa las condiciones de la ocurrencia y distribución de las aguas subterráneas, específicamente la interrelación de la estructura geológica, el terreno y el agua subterránea.
- **Mapa piezométrico:** representación cartográfica de la superficie piezométrica de un acuífero, construida por interpolación de medidas puntuales del nivel del agua subterránea en diferentes puntos.

Metalogenia. Ciencia que estudia los mecanismos de formación de los yacimientos minerales y define herramientas metodológicas y guías de prospección utilizables en la exploración minera.

Mineralización. Concentración local de sustancias metálicas (o proceso que permite tal concentración).

Mineralogía. Ciencia que estudia los minerales en sus diferentes estados de agregación y sus propiedades físicas y químicas.

Modelo. Representación teórica de un objeto, sistema o idea. Su elaboración exige definir una primera idea general y previa del objeto de modelizar, la estructura del sistema (límites, características geométricas, etc.) y formular las leyes que relacionan las entradas del sistema y sus respuestas (salidas), de acuerdo con los parámetros que intervienen en dichas relaciones. El propósito de los modelos es ayudar a explicar, entender o mejorar un sistema. Los modelos pueden ser de varios tipos: reducidos, analógicos, determinísticos (numéricos) y estocásticos (probabilísticos), etc.

Modelos de Elevación Digital. El *modelo de elevación digital* o *modelo digital de elevación* (MDE) es una representación digital de la distribución espacial de la elevación de la superficie del terreno. La unidad básica de información es un valor de elevación, altura o posición vertical (coordenada Z), al que acompañan los valores correspondientes de posición horizontal (coordenadas X e Y) expresados en un sistema de proyección, para cada uno de los puntos del terreno.

Molinete. El *molinete* o *correntómetro* es un instrumento constituido por una rueda con aspas, la cual, al ser sumergida en una corriente de agua gira proporcionalmente a la velocidad de la misma y a partir de un transductor eléctrico, indica el número de revoluciones con que gira la hélice. Esta velocidad angular se traduce a velocidad del agua (en m/s), utilizando una fórmula de calibración que previamente se ha determinado para cada instrumento en particular.

Morfoestructural. Característica de las formas (morfos) y la disposición interna (estructura) que adopta el relieve.

Napa (de agua subterránea). Agua subterránea que rellena totalmente los intersticios de un terreno poroso y permeable de manera que siempre haya conexión entre los poros, por el agua.

Nebliómetro. Instrumento estándar que mide el volumen de agua de niebla captado en una unidad de tiempo determinada.

Nivel piezométrico. Altura o profundidad (por debajo la superficie del suelo) del límite entre la zona no saturada y la zona saturada de un acuífero. En el caso de un acuífero libre, se llama *nivel freático*; en caso de no estar influenciado por extracción de agua subterránea, se llama *nivel estático*; en el caso contrario, se llama *nivel dinámico*.

Nodos. En informática, un nodo es un punto de intersección o unión de varios elementos que confluyen en el mismo lugar.

Norias. Pozos o captaciones que captan agua subterránea en acuíferos freáticos. Generalmente, son perforaciones verticales realizadas en forma manual para extraer agua subterránea y que por lo general, presentan un diámetro mucho mayor que el de un sondaje.

Oasis. Zona con vegetación y agua aislada en el desierto. En general, se genera gracias a una fuente de agua (manantial o capa freática poco profunda).

Orógeno. Estructura lineal situada en el límite entre una placa continental y otra oceánica, o bien en la unión de dos placas continentales. Presenta pliegues, mantos de corrimiento y fallas.

Ortofoto. Imagen fotográfica del terreno con el mismo valor cartográfico que un plano, que ha sido sometida a un proceso de rectificación diferencial que permite realizar la puesta en escala y nivelación de las unidades geométricas que lo componen.

Paleo. Prefijo que significa en general “antiguo” o “primitivo”, referido frecuentemente a eras geológicas anteriores a la actual. Por ejemplo: paleoambiente, paleoclimatología, paleoecológico, paleogeográfico, etc.

Pampa. Cada una de las llanuras extensas de América Meridional que no tienen vegetación arbórea.

Parámetro. Variable que, en una familia de elementos, sirve para identificar cada uno de ellos mediante su valor numérico. Existe un sinnúmero de parámetros, entre ellos los que se mencionan en este trabajo: *parámetros físico-químicos* (turbidez, conductividad, pH, dureza, etc.), *parámetros hidrológicos* (coeficiente de escorrentía, caudal medio, velocidad del flujo, etc.), *parámetros hidrogeológicos* (porosidad, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad, etc.).

Perfil fisiográfico. Representación de los procesos que han originado los distintos paisajes de una región, dentro de los cuales habrá cierta homogeneidad en su geogénesis, permitiendo conocer las características internas de los suelos.

Período de retorno. Tiempo esperado o tiempo medio entre dos sucesos improbables y con posibles efectos catastróficos. En hidrología, el período de retorno generalmente expresado en años, puede ser entendido como el número de años en que se espera que se repita un cierto caudal (o lluvia).

Piedemonte. Acumulación de material muy heterogéneo (dependiendo de la escala de observación), constituido por bloques, cantos, arenas, limos y arcillas inconsolidados ubicados al pie de las cadenas montañosas. La diagénesis y litificación de estos materiales da lugar a una familia o grupo de rocas características.

Pliegue. El *pliegue* o *plegamiento* es el efecto producido en la cor-

teza terrestre por el movimiento conjunto de rocas sometidas a una presión lateral. Por la disposición de sus capas, los pliegues se dividen en *anticlinal* (plegamiento en el terreno en forma de A o de V invertida, donde los estratos más antiguos están hacia el núcleo) y *sinclinal* (plegamiento en el terreno en forma de V, donde los estratos más jóvenes están hacia el núcleo).

Pluviómetro. Instrumento que sirve para calcular la cantidad de lluvia (o precipitación pluvial) que cae en una zona concreta durante un período de tiempo determinado.

Pozos. Excavación vertical que perfora la tierra para alcanzar una reserva de agua subterránea y permite su extracción. De acuerdo a su funcionalidad existen varios tipos de pozos, entre ellos: *pozo de explotación* (para la extracción del agua subterránea); *pozo de monitoreo* (para el registro de parámetros hidrogeológicos como nivel piezométrico, calidad de agua, etc.); *pozo de exploración* (para identificar horizontes potencialmente acuíferos)

Precipitación. Agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra.

Precordillera. Nombre con el que se denominan las estribaciones más bajas de una cadena montañosa, siendo principalmente utilizado en Argentina y Chile en relación a la cordillera de los Andes.

Puquios. Del *quechua* “*pukyu*” que significa “vertiente de agua pura y cristalina”. (Ver *manantial*).

Quebrada. Designa un paso estrecho entre montañas y, por tanto, equivale a desfiladero por donde se origina un arroyo o riachuelo que discurre a través de manera temporal o permanente.

Radiación Solar. La *radiación solar* o *energía emitida por el sol*, es un proceso físico, por medio del cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas. La energía que emite el sol, recibida en la superficie terrestre, es la fuente de casi todos los fenómenos meteorológicos y de sus variaciones en el curso del día y del año.

Recarga y Descarga. Designa los recursos hídricos que ingresan a un sistema (recarga o entradas) y que salen del mismo (descarga o salidas). El equilibrio entre ambos, en un intervalo de tiempo determinado, describe el concepto de balance hídrico. El sistema puede ser una cuenca hidrográfica, un acuífero, un embalse, etc. En el caso de una cuenca hidrográfica, las entradas pueden darse en forma de precipitación, flujo subterráneo y/o trasvase. Las salidas pueden darse en forma de evaporación, evapotranspiración, extracción antrópica, infiltraciones profundas, flujos salientes hacia otro cuerpo receptor.

Red de monitoreo. Conjunto de estaciones en las cuales se mide y registra con cierta frecuencia uno o más parámetros tal como la cantidad de lluvia, caudales, niveles de agua, temperatura, etc. Se pueden medir de forma manual o mediante equipos compuestos por sensores, codificadores, transmisores, decodificador y equipo informático.

Red hidrográfica. Sistema de circulación lineal, jerarquizado y estructurado que asegura el drenaje de una cuenca hidrográfica.

Régimen permanente y no permanente (intermitente o transitorio). Condición del escurrimiento en relación con el tiempo. El régimen es permanente cuando la velocidad del escurrimiento y las otras variables (densidad, temperatura, presión) no cambian con el tiempo

(permanecen constante en el tiempo) o las variaciones son mínimas en relación con los valores medios. Se llama también flujo estacionario. El régimen es no permanente si la velocidad y las otras variables varían con el tiempo.

Relave. Los *relaves* o *cola* son desechos tóxicos, subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas.

Rendimiento específico. El *rendimiento específico* (*Sy*) de un acuífero es la relación entre la cantidad de agua que puede drenar libremente el material y el volumen total de la formación, resultando siempre menor que la *porosidad total* y asociado al concepto de *porosidad eficaz*.

Recurso renovable y no renovable. Un *recurso renovable* es un recurso natural que se puede restaurar por procesos naturales, en un periodo corto a escala humana y a una velocidad superior a la de su consumo. Sin embargo, un *recurso* es *no renovable* cuando su tasa de destrucción supera, ampliamente o no, su velocidad de creación; una vez agotado no habrá más disponible para uso futuro.

Reutilización de agua. Procedimiento que consiste en utilizar de nuevo las aguas procedentes de un uso previo después de uno o más tratamientos que le permita alcanzar cierta calidad sanitaria y estética.

Ridge. Formación geológica que consiste en una cadena de montañas o colinas que forman una cima continua elevada a cierta distancia. Asimismo, un *ridge* se cataloga también para aquellas cadenas montañosas localizadas en el suelo profundo oceánico que presentan lados muy pronunciados y una topografía menos regular que una plataforma.

Roca. Agregado de minerales de uno o más tipos en diversas proporciones. Dependiendo de su génesis y composición, las rocas se pueden dividir en tres grandes grupos: sedimentarias (formadas por la acumulación de sedimentos a la superficie terrestre), ígneas (formadas por el enfriamiento y solidificación del magma) y metamórficas (formada por la alteración textural o composicional de cualquiera de las otras rocas, incluso metamórfica, debido a procesos de calentamiento, presión o actividad química de fluidos).

Las rocas, debido a su composición mineralógica, textura y origen, reciben nombres característicos entre las cuales, se destacan:

- **Ignimbritas:** rocas ígneas formadas por una amplia deposición y consolidación de flujos de ceniza.
- **Andesita:** rocas ígneas de grano fino formadas en un 75% de minerales tipo feldespato y plagioclasas con ausencia del cuarzo y ortoclasa.
- **Dacita:** roca ígnea con una composición similar a la andesita pero con menos plagioclasas y más contenido en cuarzo.
- **Diorita:** roca ígnea de grano grueso con composición tipo andesita.
- **Granito:** roca ígnea de grano grueso dominada por minerales claros, formada por un 50% de ortoclasa, 25% de cuarzo y

plagioclasas o silicatos ferromagnesianos. Los granitos y las granodioritas comprenden el 95% del total de rocas ígneas intrusivas.

- **Basalto:** roca ígnea de grano fino dominada por minerales oscuros, compuestas por plagioclasas y silicatos ferromagnesianos. Los basaltos y las andesitas representan el 98% del total de rocas extrusivas.
- **Gabro:** roca ígnea de grano grueso con la composición de basalto.
- **Pizarra:** roca metamórfica de grano fino con un buen desarrollo de fuerte clivaje (el clivaje describe el desarrollo de capas en una roca luego de su deformación y metamorfismo).
- **Caliza:** roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por el mineral de la calcita, formada por procesos orgánicos o inorgánicos.
- **Limolitas:** roca sedimentaria formada por grano de tamaño intermedio entre las arcillas y las areniscas.
- **Areniscas:** roca sedimentaria detrítica formada por la cementación de granos individuales o de un grupo de ellos y que comúnmente están compuestas por cuarzo.

Son diversas las rocas que existen, pero las anteriormente definidas se realiza con el propósito de asociar al lector con las rocas más comunes de la región. Para otros tipos, consulte "The dictionary of mining, mineral and related terms" de la Universidad de Hacettepe².

Salar. Un *salar* o *depósito salino* es un lago superficial mas o menos temporario cuyos sedimentos están constituido esencialmente por sales (boratos, cloruros de sodio o sal común, salitre o nitrato natural, sulfatos, etc.) y otros elementos como el litio y el yodo. Generalmente, los salares se clasifican en: *caótico* o *de terrones*, *laminares* o *poligonales* y *mixtos*. Pueden ser activos o inactivos, con o sin lagunas superficiales.

Salmueras. Agua con una alta concentración de sal (NaCl) disuelta (>50mg/l, según la clasificación del agua por su contenido en sales).

Sedimentación. Acumulación por deposición de sedimentos o de todos aquellos materiales alterados y transportados previamente.

Semiárido. Ver *definición árido*.

Sensor. Instrumento capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas.

SIG (Sistema de Información Geográfica). Integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, sistematizar, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica.

Sistemas lóticos y lénticos. Los *sistemas lóticos* son aquellos sistemas que incluyen hábitats acuáticos de aguas corrientes como ríos, riachuelos y quebradas desprovistos de vegetación acuática emergente. Sin embargo, los *sistemas lénticos* son aquellos sistemas de aguas

² <http://www.maden.hacettepe.edu.tr/dmmrt/index.html>

estancadas que incluyen hábitat de tipo humedal, pantanos, lagos, lagunas, jagüeyes, es decir cuerpos de agua y por lo general con vegetación acuática emergente.

Sobrexplotación. Utilizar en exceso los recursos naturales.

Socavón. Ver definición de galería subterránea.

Sondaje. Perforación en la superficie para obtener información de la calidad del suelo o de la roca. Se utiliza principalmente para estudios de infraestructura, hidrogeología, caracterización de suelos, etc.

Subcuenca. Subdivisión de una cuenca hidrográfica. Corresponde a la superficie hidrográfica de los afluentes de una corriente de agua principal.

Subducción. Deslizamiento del borde de una placa de la corteza terrestre de mayor densidad por debajo del borde de otra de menor densidad.

Tamarugo o prosopis tamarugo. Especie de Leguminosa endémico del norte de Chile que crece particularmente en la "Pampa del Tamarugal", con clima árido y suelos salinos. Es un árbol que puede llegar a los 25 metros de altura y generalmente presenta un tronco corto muy ramificado o desarrolla varios vástagos del mismo tamaño.

Tanque evaporimétrico. Instrumento utilizado para medir la evaporación efectiva o tasa de evaporación. Proporciona una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua.

Tectónica. Relacionado con las fuerzas involucradas en la configuración de la litosfera generando todo tipo de estructuras o fallas por la dinámica estructural interna de la tierra que se caracteriza en ciclos tectónicos con eventos de importancia; en la Región de Tarapacá han sido cinco:

- **Ciclo Tectónico Pampeano** comprendido desde el Proterozoico Superior (1.000 a 650 M.a.) al Cámbrico Inferior (540 a 530 M.a.); y el **Ciclo Tectónico Famantiano** comprendido desde el Cámbrico Superior al Devónico Inferior (510 a 390 M.a.).
- **Ciclo Tectónico de Gondwana** comprendido desde el Devónico Superior (385 a 370 M.a.) al Pérmico Inferior (300 a 275 M.a.).
- **Ciclo Tectónico Preandino** comprendido desde el Pérmico Su-

perior (260 a 253 M.a.) al Jurásico Inferior (250 a 245 M.a.).

- **Ciclo Tectónico Andino** comprendido desde el Jurásico Inferior (245 M.a.) al Presente.

Teledetección. Técnica mediante la cual se obtiene información de un objeto o área de la superficie terrestre, a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento (sensor remoto) situado a cierta distancia del elemento sometido a investigación.

Terreno. Conjunto de sustancias minerales que tienen origen común o cuya formación corresponde a una misma época

Topografía. Ciencia y arte de representar en un plano la superficie o el relieve de detalle de una determinada área.

Transmisibilidad o transmisividad. Parámetro hidrogeológico que representa el producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor saturado de acuífero (en un medio isótropo). Puede ser interpretado como el caudal de agua que atraviesa una franja de acuífero, orientada perpendicularmente al flujo, de anchura unidad y bajo un gradiente hidráulico unitario.

Trazabilidad. Posibilidad de identificar el origen y las diferentes etapas de un proceso de producción y distribución de un bien de interés.

Variación intercensal. Ritmo de evolución de la población en un periodo determinado, expresado en porcentaje. Permite calcular cuánto creció o disminuyó la población entre dos años censales.

Vega. Parte de tierra baja, llana y fértil.

Vertiente y vertientes termales. Ver manantial. Las *vertientes termales* son aquellos sitios por donde corre el *agua termal*, que brota a temperatura superior a la media ambiental.

Vulcanismo. Proceso de formación de volcanes y otras formas de actividad ígnea extrusiva. Se produce cuando el material fundido del interior de la Tierra sale a la superficie a través de grietas, fisuras y orificios.

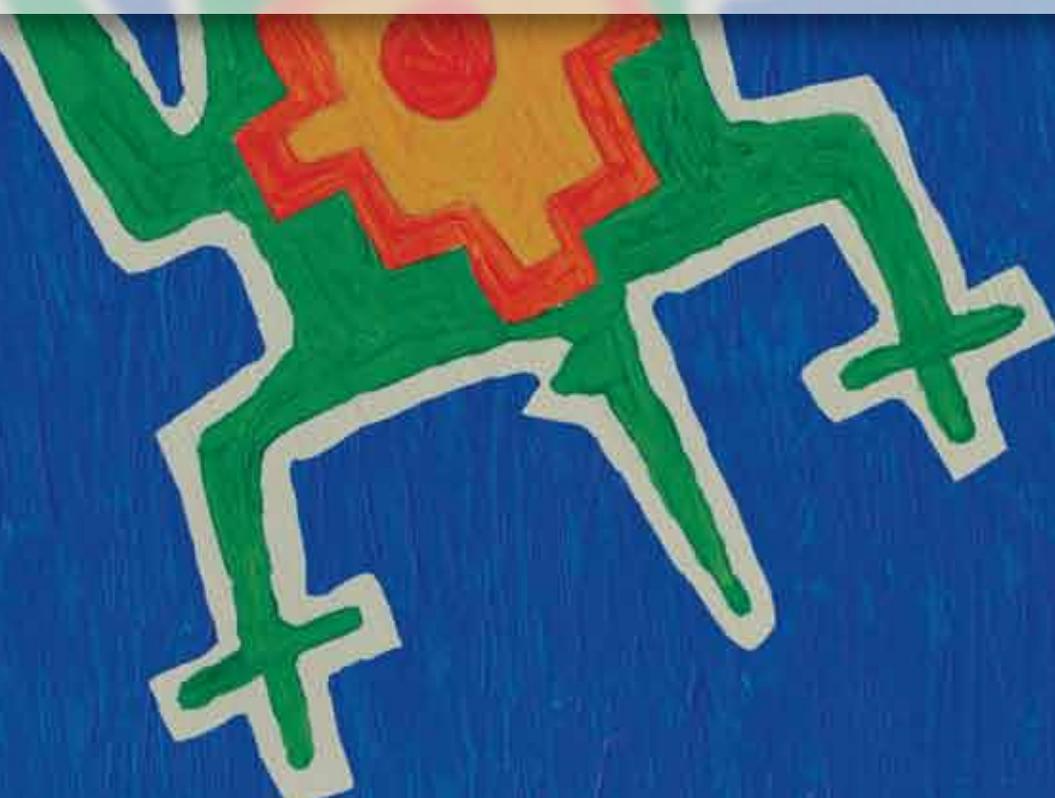
Yacimientos. Sitio donde se halla naturalmente una roca, un mineral o un fósil. Estrictamente, es una concentración significativa, en una zona, de un determinado mineral, gas, fósil o roca, susceptible de ser explotado -beneficiado- conforme a un uso.



Región de Tarapacá



Universidad ARTURO PRAT del Estado de Chile



La presente publicación corresponde al informe final del estudio “Diagnóstico y sistematización de la información de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá”, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) durante el año 2012. El objetivo ha sido generar un diagnóstico completo y preciso del conocimiento y de la información existente sobre los recursos

hídricos de la región, con el fin de identificar las brechas de conocimiento para orientar el trabajo futuro de investigación y transferir este conocimiento a la comunidad. Se enmarca dentro de la estrategia con la cual el CIDERH aborda la problemática hídrica regional, constituyendo la primera etapa en la caracterización de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá.



Vivar 493, 3er Piso, Edificio Don Alfredo, Iquique, Chile
Fono: (56)(57) 530800 – E-mail: contacto@ciderh.cl
www.ciderh.cl

