

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

**“SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS
RECURSOS HÍDRICOS DEL SALAR DE ATACAMA
PARA UN FUTURO PLAN DE GESTIÓN”**

**INFORME TÉCNICO
SDT N° 392**

REALIZADO POR:

División de Estudios y Planificación

Santiago, Diciembre de 2016

INDICE

1 INTRODUCCIÓN	4
1.1 OBJETIVOS	6
1.1.1 Objetivo General.....	6
1.1.2 Objetivos Específicos	6
2 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES PÚBLICOS DISPONIBLES	7
3 MODELO CONCEPTUAL	27
3.1 MODELO CONCEPTUAL	29
3.2 METODOLOGÍA DEL BALANCE HÍDRICO.....	30
3.3 EVAPORACIÓN	31
3.3.1 Métodos para determinar la evaporación en napas someras	32
3.3.2 Estudios de evaporación en salar de Atacama	27
3.4 DATOS DISPONIBLES.....	39
3.4.1 Red de monitoreo	39
3.4.2 Monitoreo de niveles	41
4 RECOMENDACIONES	42
5 CONCLUSIONES	42
6 BIBLIOGRAFÍA	44
7 ANEXO	46
7.1 ESTACIONES DE MONITOREO EN EL SALAR DE ATACAMA.....	46
7.1.1 Precipitación.....	46
7.1.2 Temperatura	46
7.1.3 Humedad	47
7.1.4 Evaporación	47
7.1.5 Velocidad del viento	47
7.1.6 Red Fluviométrica	48
7.1.7 Lisímetros	48
7.1.8 Piezómetros	49

FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación cuenca del Salar de Atacama.	4
Figura 2. Sub cuencas actualizadas y zonas ecológicas correspondientes.	5
Figura 3. Mapa de isopiezas del margen Este del Salar de Atacama.....	8
Figura 4. Zonificación del Salar de Atacama realizada por Mardones (1986) y replicada para el estudio de Disponibilidad de agua en la cuenca (DGA, 2010). Fuente: SIT 210, 2010.	9
Figura 5. Resultados de las tasas de evaporación medidas durante el periodo 1983-84. Fuente: Mardones, 1986.	10
Figura 6. Zonificación de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: DGA-Orphanopoulos, 1998.....	11

Figura 7. Delimitación definitiva de las subcuencas. Fuente: DGA-GCF SIT 210, 2010.	14
Figura 8. Sectores de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: SDT-324 DGA, 2012.	17
Figura 9. SHACs de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: SDT-339 DGA, 2013.	19
Figura 10. SHAC de la zona sur de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Minuta 1 DEP-DGA, 2014.	22
Figura 11. Modelo conceptual hidrogeológico. Fuente: SDT-324, 2012.	29
Figura 12. Diseño de lisímetro de carga variable instalado en el Salar de Atacama. Fuente: SIT 357, 2014.	36
Figura 13. Diseño de lisímetros de carga constante, a) Sistema implementado por Collahuasi-GP consultores en el Salar del Huasco, b) Esquema de funcionamiento. Fuente: Jonhson, 2009.	37
Figura 14. Equipamiento de los domos. Fuente: Jonhson, 2009.	38
Figura 15. Estaciones DGA instaladas en el Salar de Atacama. Fuente: elaboración propia.	40
Figura 16. Catastro de pozos. Fuente: SIT 357, 2014.	41

TABLAS

Tabla 1. Zonas de evaporación según Mardones y valoración de las definidas en el informe SIT 210.	13
Tabla 2. Disponibilidad del recurso hídrico del Salar de Atacama. Fuente DGA-GCF SIT-210, 2010.	15
Tabla 3. Identificación de sectores de la cuenca del Salar de Atacama. SDT-324 DGA, 2012.	16
Tabla 4. Oferta de los recursos hídricos subterráneos. Fuente: SDT-324 DGA, 2012.	18
Tabla 5. Balance entre zonas de descarga y recarga de sub-cuencas aportantes. Fuente: SDT-339 DGA, 2013.	20
Tabla 6. Oferta Hídrica de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: SDT-339 DGA, 2013.	21
Tabla 7. Balance hídrico por sectores. Fuente: Minuta 1 DEP-DGA, 2014.	22
Tabla 8. Oferta de los recursos hídricos vs demanda comprometida. Fuente: IT DARH 234, 2014.	24
Tabla 9. Resumen de las principales conclusiones de los antecedentes recopilados.	25
Tabla 10. Métodos de estimación de evaporación desde napas someras. (Fuente: Johnson, 2009)	33
Tabla 11. Estaciones pluviométricas con datos disponibles. Fuente: DGA.	46
Tabla 12. Estaciones de monitoreo de temperatura con datos disponibles. Fuente: DGA.	46

Tabla 13. Estaciones de monitoreo de humedad con datos disponibles. Fuente: DGA.....	47
Tabla 14. Estaciones de monitoreo de humedad con datos disponibles. Fuente: DGA.....	47
Tabla 15. Estaciones de monitoreo de velocidad del viento con datos disponibles. Fuente: DGA.....	47
Tabla 16. Estaciones de monitoreo fluviométrico con datos disponibles. Fuente: DGA.....	48
Tabla 17. Estación de monitoreo instalada por la DGA. Fuente: SDT 357	48
Tabla 18. Ubicación de piezómetros instalados por la DGA. Fuente: SDT 357 ...	49

1 INTRODUCCIÓN

La cuenca del Salar de Atacama, con un área de 18.100 km² aproximadamente, corresponde a una cuenca endorreica ubicada entre la Cordillera de Los Andes (por el Este) y la Cordillera de Domeyko (por el Oeste), mientras que el Salar de Atacama propiamente con una extensión de 3.000 km² se ubica en la zona terminal de la cuenca, a una altura aproximada de 2.300 m.s.n.m., siendo la evaporación hacia la atmósfera la única salida natural del agua. (DGA, 2012)

De acuerdo a la Estación San Pedro la precipitación promedio anual en la cuenca se estima en 69,1 mm/año (DGA, 2013).

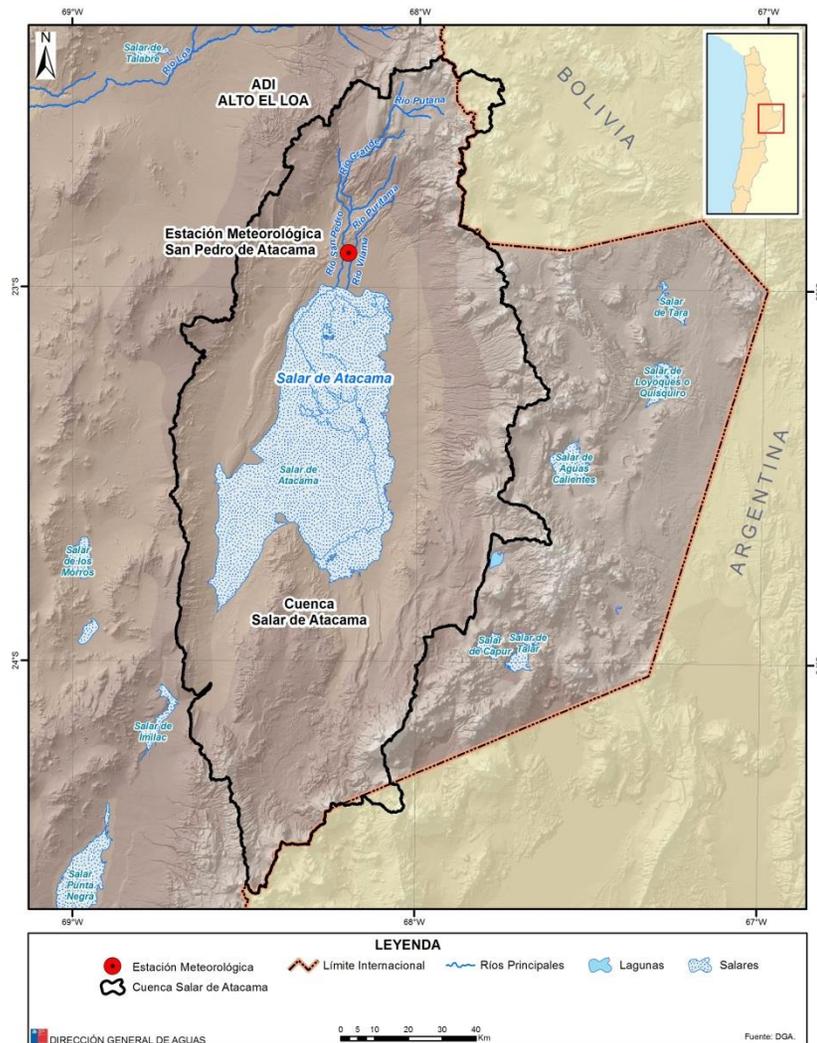


Figura 1. Mapa de ubicación cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia.

La cuenca actualmente está conformada por 6 sub-cuencas aportantes al Salar (A1, A2, B1, C1, C2, N1), y por 4 zonas ecológicas de protección, una de ellas es núcleo (N), según se observa en la Figura 2.

El núcleo salino es un cuerpo homogéneo formado por costras duras de cloruro de sodio, de relieve muy irregular, fracturado, dentado y quebradizo, que constituye principalmente la parte central y oeste del Salar de Atacama. La zona marginal (sectores A, B y C), que se ubica entre el núcleo y los acuíferos que rodean los depósitos salinos, es una zona plana con el agua subterránea bastante superficial, con presencia de vegetación y en ella se emplazan los sistemas lacustres.

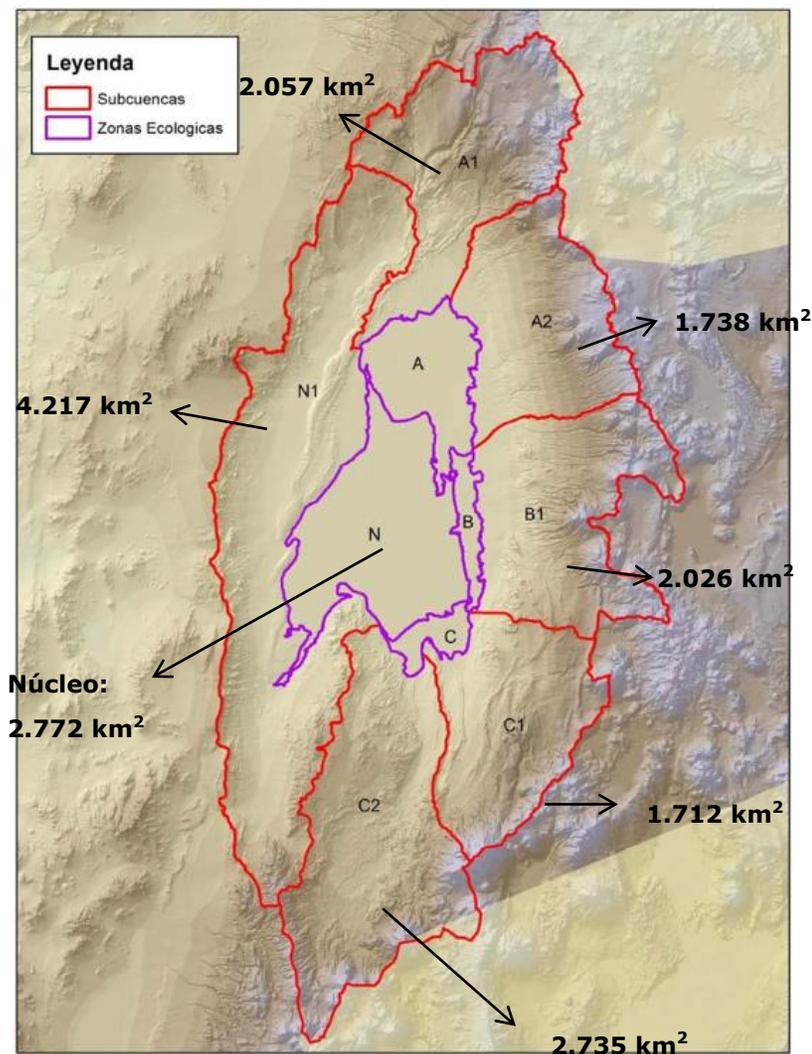


Figura 2. Sub cuencas actualizadas y zonas ecológicas correspondientes.
Fuente: SDT 339, 2013.

La salmuera que se encuentra en el acuífero ubicado bajo la costra del Salar es una valiosa fuente de recursos minerales como el litio, potasio, nitratos y otros, los cuales son explotados por diversas empresas mineras hace ya varios años. Desde el punto de vista ambiental, las aguas subterráneas afloran en algunos sectores generando lagunas, las cuales resultan fundamentales para la biodiversidad que allí se desarrolla.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Generar una síntesis de antecedentes generales hidrológicos e hidrogeológicos existentes sobre el Salar de Atacama.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Recopilar, analizar y sistematizar los antecedentes públicos disponibles en la Dirección General de Aguas relacionados a los recursos hídricos del Salar de Atacama.
- Analizar la metodología aplicada por Mardones en el cálculo del balance hídrico en el Salar de Atacama.
- Analizar metodologías existentes para el cálculo de la evaporación y que han sido utilizadas en el Salar.

2 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES PÚBLICOS DISPONIBLES

La recopilación de la información existente tiene como objetivo la compilación de todos los trabajos relacionados con los recursos hídricos de la zona de estudio y publicados por la DGA hasta la fecha. De esta forma, en el presente capítulo se representa una selección y resumen de los estudios considerados como relevantes para la caracterización del Salar de Atacama.

La revisión de antecedentes se hizo a partir de 12 estudios existentes que son de dominio público en la Dirección General de Aguas (DGA).

La información se ha clasificado en orden cronológico. Así mismo, se incluye al final de este capítulo un cuadro resumen con los principales resultados de cada referencia.

- **CORFO (1977). CHI-535. Hidrogeología del Norte Grande.**

El estudio estima la recarga en el acuífero aluvial mediante la Ley de Darcy y datos propios del estudio. Estima una recarga de 1.600 l/s para el acuífero libre y 293 l/s para el acuífero semiconfinado ubicado en el Norte.

Se presenta en este estudio un mapa con la piezometría de la zona, mediante el cual se zonificó en 5 sectores de Norte a Sur separados por divisorias de aguas subterráneas (A, B, C, D y E). Los sectores A, B y C se consideraron con mayor potencial para ser explotadas a diferencia de los D y E, donde la recarga es insuficiente. Así mismo, se ubicó la interfaz salina en superficie y en su extremo inferior.

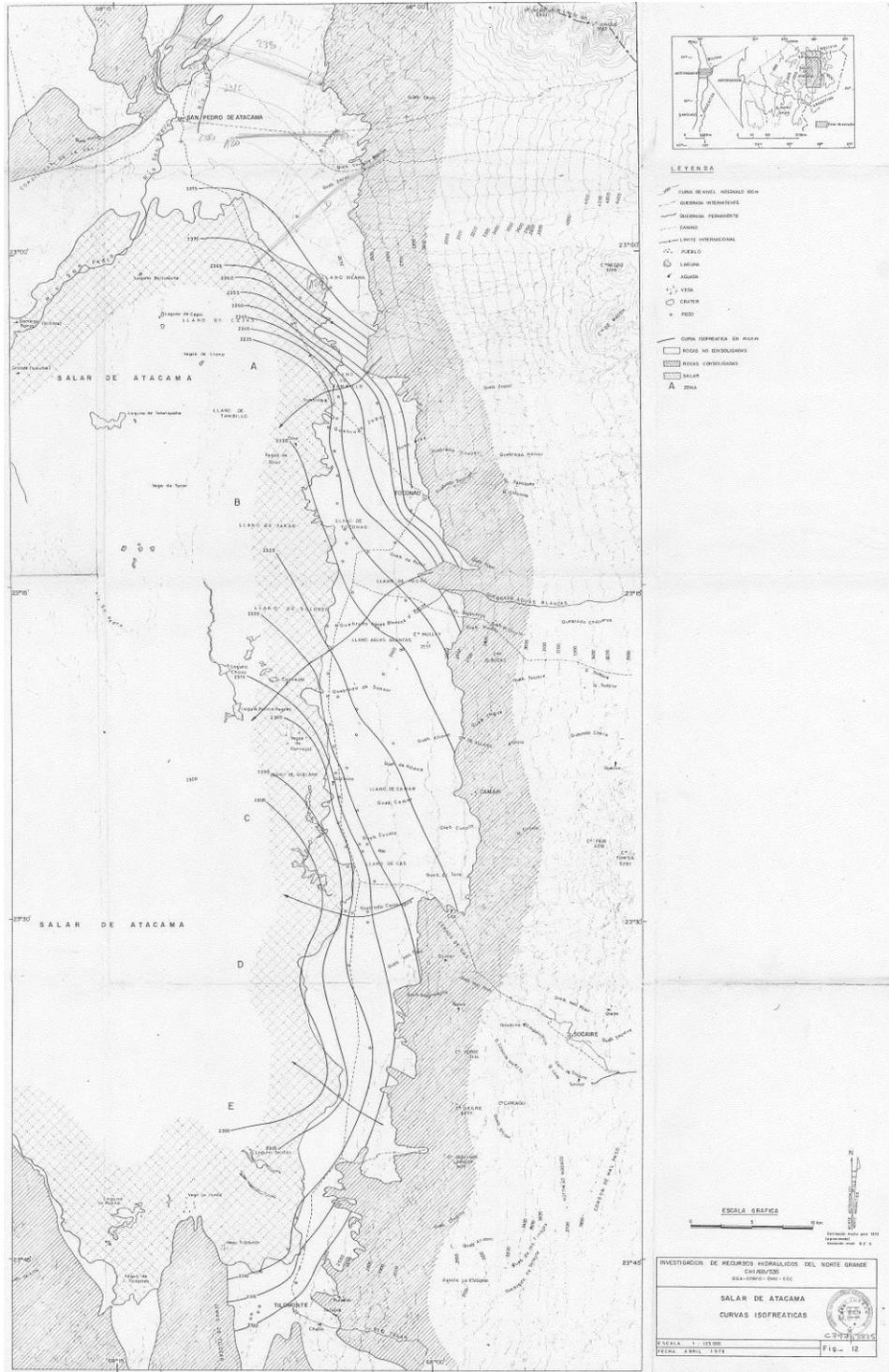


Figura 3. Mapa de isopiezas del margen Este del Salar de Atacama.
 Fuente: CORFO, 1977.

- **Mardones (1986). Caracterización geológica e hidrogeológica del Salar de Atacama.**

Considera en su balance para el Salar, como entradas, los cauces superficiales, el acuífero libre y el acuífero semiconfinado y como única salida la evaporación. La precipitación sobre el Salar no se considera en el balance, ya que ésta se evapora sin alterarlo. El autor dividió en 5 zonas el margen oriente de la cuenca y también al acuífero semi-confinado.

El balance dió como resultado 5.506 l/s de entradas y 5.390 l/s de salida. La diferencia se debe a la metodología en el cálculo realizado, ya que, para las lagunas se utilizó el área de evaporación correspondiente a la época seca. Este error fue corregido en DGA-GCF, (2010), que considera que la interfaz salina es una zona dinámica directamente afectada por la recarga natural de los acuíferos adyacentes.

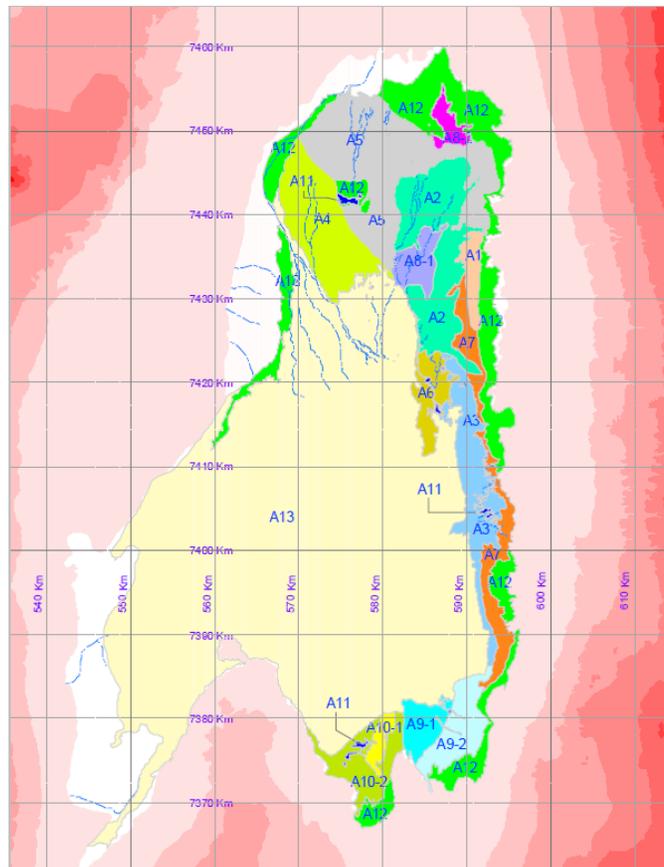


Figura 4. Zonificación del Salar de Atacama realizada por Mardones (1986) y replicada para el estudio de Disponibilidad de agua en la cuenca (DGA, 2010). Fuente: SIT 210, 2010.

A 1. Costra limo salino (blanda) Superficie: 20 km ² N.F promedio: 0.50-0.55 m Evaporación: 0.4 mm/día Volumen evaporado: 92.5 l/s	Evaporación: 1.45 mm/día Volumen evaporado: 185.18 l/s
A 2. Costra limo salino sobre costra dura, costra dura (Ca CO ₃) Superficie: 130 km ² N.F (pr): 0.37 m Evaporación: 0.10 mm/día Volumen evaporado: 150.17 l/s	A 9. Zona E (Tilomonte) A 9-1 Limo Salino Superficie: 30 km ² N.F (pr): 0.32 m Evaporación: 1.5 mm/día Volumen evaporado: 520.8 l/s
A 3. Costra delgada sobre sal granulada Superficie: 80,32 km ² N.F (pr): 0.34 m Evaporación: 1.45 mm/día Volumen evaporado: 1348 l/s	A 9-2 Limo Salino Superficie: 48 km ² N.F (pr): 0.6 m Evaporación: 0.1 mm/día Volumen evaporado: 55.5 l/s
A 4. Yeso Limoso, blando Superficie: 120 km ² N.F (pr): 0.72 m Evaporación: 0.3 mm/día Volumen evaporado: 416.4 l/s	A 10. Zona E (Tilopozo) A 10-1 Limo Salino sobre costra dura de Ca CO ₃ Superficie: 8 km ² N.F (pr): 0.25 m Evaporación: 1 mm/día Volumen evaporado: 92.5 l/s
A 5. Yeso limoso, blando Superficie: 200 km ² N.F (pr): 1.11 m Evaporación: 0.1 mm/día Volumen evaporado: 231.3 l/s	A 10-2 Limo Salino sobre costra dura de Ca CO ₃ Superficie: 50 km ² N.F (pr): 0.25 m Evaporación: 0.2 mm/día Volumen evaporado: 115.74 l/s
A 6. Costra de Na Cl dura (0.30 m) Superficie: 100 km ² N.F (pr): 1.0 m Evaporación: 4.4 mm/año Volumen evaporado: 13.9 l/s	A 11 Lagunas Superficie: 13.4 km ² (Máxima en invierno). 11.8 km ² (Máxima de verano) Evaporación: 5.8 mm/día Volumen evaporado: 792 l/s
A 7. Zona C Costra salino limosa de yeso y halita Superficie: 45 km ² N.F : 0.31 m Evaporación: 1 mm/día Volumen evaporado: 520.8 l/s Superficie: 17 km ² N.F.: 0.5 m Evaporación: 0.5 mm/día (05 mm/día) Volumen evaporado: 98.3 l/s 619.17 l/s	A 12 Vegas Superficie: 180 km ² Evaporación: 0.3 mm/día Volumen evaporado: 624.7 l/s
A 8. Zona D A 8-1 Limo salino sobre costra dura de Ca CO ₃ Superficie: 26 km ² N.F (pr): 0.47 m Evaporación: 0.1 mm/día Volumen evaporado: 30.06 l/s	A 13 Núcleo, costra de Na Cl dura > 0.25 m Superficie: 1620 km ² N.F: 0.67 m Evaporación: 2.0 mm/año Volumen evaporado: 102.7 l/s Volumen total evaporado: 5,390.22 l/s
A 8-2 Limo Salino Superficie: 16 km ² N.F (pr): 0.27 m	

Figura 5. Resultados de las tasas de evaporación medidas durante el periodo 1983-84. Fuente: Mardones, 1986.

- **DGA. (1987). Balance Hídrico de Chile. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.**

En este balance, se considera por primera vez toda la cuenca del Salar de Atacama. Entre sus resultados más relevantes se tiene una precipitación de 33,1 m³/s, una evapotranspiración real de 28,21 m³/s y una evaporación de 5 m³/s.

- **DGA-Orphanopoulos (1998). Evaluación disponibilidad hídrica del Salar de Atacama.**

Se realizó una nueva zonificación de la cuenca, mediante criterios geológicos, hidrológicos y de acuerdo al catastro de derechos constituidos y solicitados. Se destacó que la recarga obtenida por Orphanopoulos es de 3.610 l/s, superior en 718 l/s a la de Mardones.

Los resultados obtenidos por este estudio son los consideradas en la Minuta Técnica N°60 de la DGA (1999).

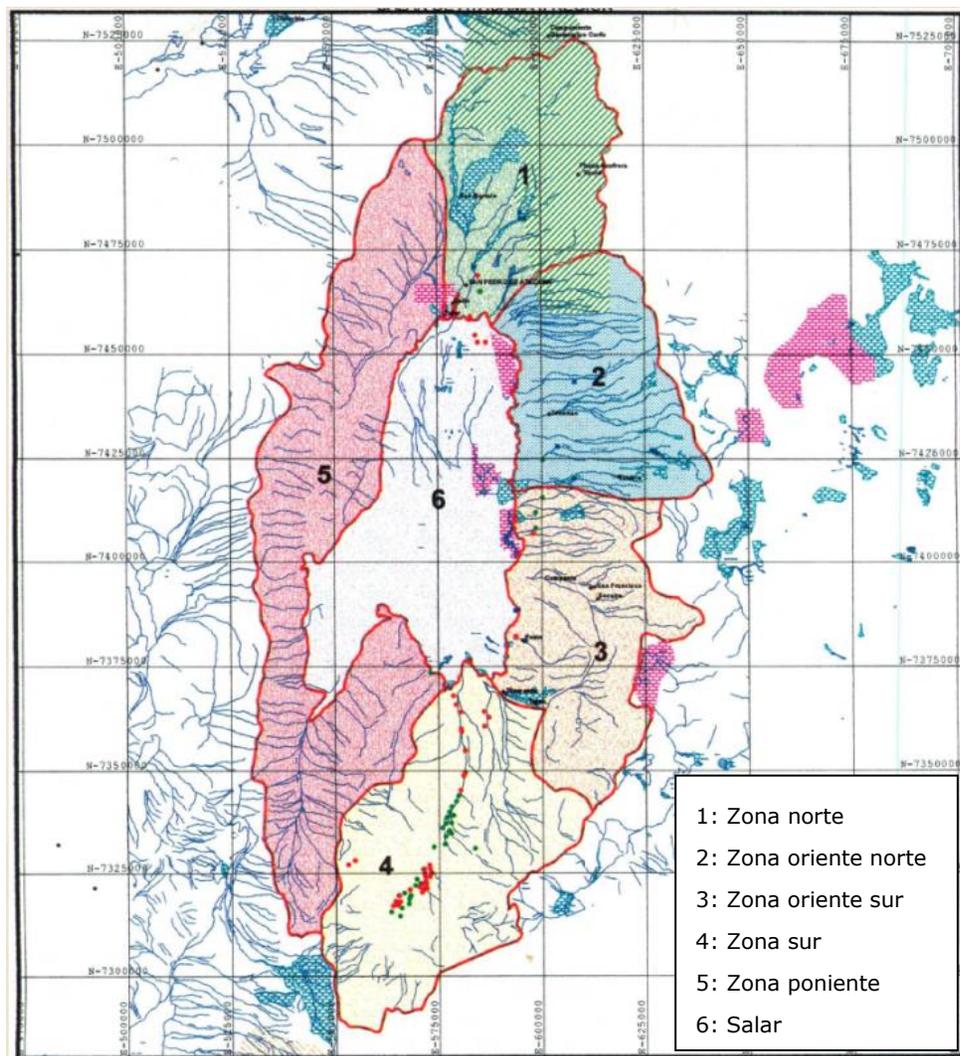


Figura 6. Zonificación de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: DGA-Orphanopoulos, 1998.

- **DGA. (1999). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región. Minuta N° 60. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.**

Correspondió a la comunicación oficial sobre el estado de la disponibilidad de agua para otorgar derechos de aprovechamiento en la cuenca. Se adoptó una zonificación en base a criterios geológicos, hidrológicos y de ubicación de los pozos, la cual correspondió al Salar más 5 zonas alrededor de este (Figura 4).

Se realizó un balance hídrico en condiciones de régimen "natural" de las diferentes zonas de estudio considerando solo los usos de aguas ancestrales. Se indicó que aproximadamente un 89% del recurso precipitado ($34,58 \text{ m}^3/\text{s}$) se pierde por evapotranspiración ($30,64 \text{ m}^3/\text{s}$) y que en el Salar mismo se pierde todo lo precipitado sobre él ($1,38 \text{ m}^3/\text{s}$), como también todo el recurso hídrico que no se evapora o se usa en las subcuencas aportantes ($3,94 \text{ m}^3/\text{s}$).

El caudal de $3,94 \text{ m}^3/\text{s}$ que fluye hacia el Salar constituye la cota superior de la recarga renovable de los sistemas en las cinco zonas aportantes, en consecuencia ésta es la cota superior del recurso renovable para la constitución de derechos de aprovechamiento superficiales y subterráneos en cada una de las subcuencas aportantes. Es decir, este caudal es el susceptible de producir la escorrentía e infiltración, y es el que representa el recurso renovable del sistema y según donde se pretenda captar el recurso, éste podrá estar presente como superficial o subterráneo.

Al intensificar el uso sobre el recurso hídrico en las subcuencas aportantes, se reducirán los aportes al salar, el cual disminuirá sus niveles buscando un nuevo estado de equilibrio.

Se indica que en la zona 4 (Tilopozo-Negrillar-Monturaqui), el caudal efectivo (correspondiente a los derechos concedidos), sobrepasa el recurso renovable de esa zona y para la zona 5 a la fecha no hay derechos constituidos.

- **DGA-GCF. (2010). Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. SIT-210.**

Mediante este estudio se reevaluó la información básica de la Minuta Técnica Nº60. Se propusieron, mediante métodos automatizados y técnicas manuales, 13 zonas, siendo de la A1 a la A11 subcuencas afluentes al Salar mientras que la A12 y A13 agrupan al Salar mismo.

Tabla 1. Zonas de evaporación según Mardones y valoración de las definidas en el informe SIT 210.

Zona	Descripción	Prof. Prom. Agua (m)	Área Mardones (Km ²)	Área DGA-GCF (Km ²)
A1	Costra de limo salino blando	0,53	20	20
A2	Costra de limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio	0,37	130	134
A3	Costra delgada sobre sal granulada	0,34	80	84
A4	Yeso limoso blando	0,72	120	112
A5	Yeso limoso blando	1,11	200	197
A6	Costra de cloruro de sodio	1	100	34
A7	Costra salino-limosa de yeso y halita	5	62	69
A8-1	Limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio	0,47	26	28
A8-2	Limo salino	0,27	16	16
A9-1	Limo salino	0,32	30	29
A9-2	Limo salino	0,6	48	49
A10-1	Limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio	0,25	8	12
A10-2	Limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio	0,25	50	48
A11	Lagunas	0	13	13
A12	Vegas	0	180	261
A13	Núcleo	0,67	1.620	1.664
Total			2.703	2.770

Se calcula la evaporación de acuerdo a la zonificación realizada por Mardones, la cual dio como resultado para este estudio (SIT 210, 2010), 5.844 l/s.

La Figura 7 muestra la delimitación final realizada en este estudio para las subcuencas del Salar de Atacama.

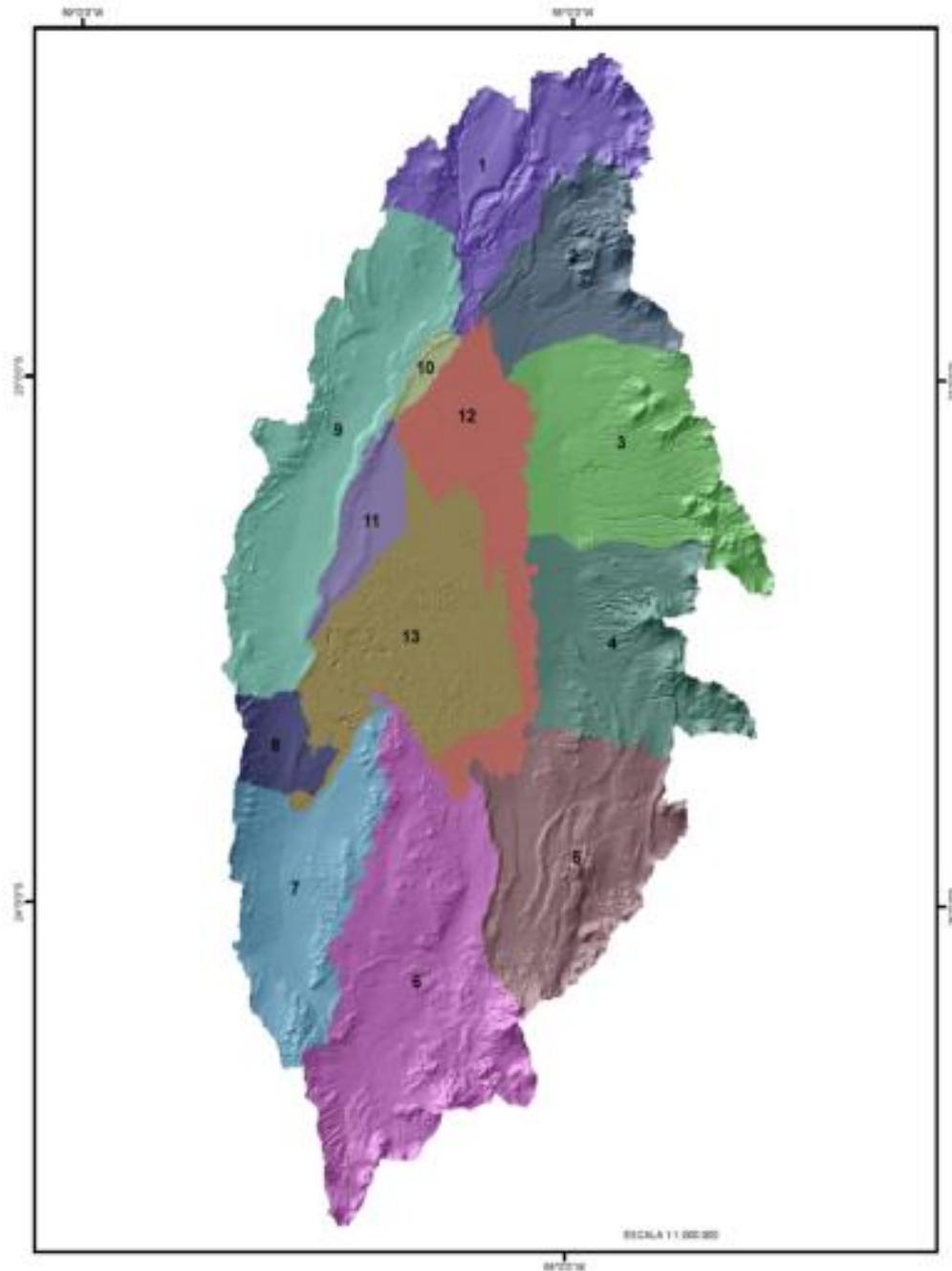


Figura 7. Delimitación definitiva de las subcuencas. Fuente: DGA-GCF SIT 210, 2010.

Además, se llevó a cabo un balance hídrico para el periodo 1970-2008. Para los acuíferos en el borde del Salar se tiene una escorrentía total (recarga) de 5,6 m³/s.

Para determinar la disponibilidad del recurso hídrico, se dividió el Salar en zonas de influencia relacionadas a las subcuencas aportantes alrededor del mismo, éstas fueron determinadas de acuerdo a la distribución del escurrimiento superficial, de la ubicación de zonas protegidas, así como del origen y ubicación de las lagunas. La disponibilidad total establecida para la cuenca fue de 2,52 m³/s (Tabla 2).

Tabla 2. Disponibilidad del recurso hídrico del Salar de Atacama. Fuente DGA-GCF SIT-210, 2010.

Zona k	Subcuencas	Q Aportante Subcuencas [m3/s]	Q Demanda Vegas Zona k [m3/s]	Q Demanda Lagunas Zona k [m3/s]	Q Demanda Cultivos Zona k [m3/s]	Q Demanda Total Zona k [m3/s]	Q Disponible Zona k [m3/s]
A	1, 2, 3	2.739	0.168	0.565	1.770	2.503	0.235
B	4	0.939	0.017	0.400	0.000	0.416	0.522
C	5	0.895	0.009	0.029	0.000	0.037	0.858
D	6	0.891	0.005	0.119	0.000	0.124	0.767
N	7, 8, 9, 10	0.136	0.000	0.000	0.000	0.000	0.136
Total		5.60	0.20	1.11	1.77	3.08	2.52

- **DGA (2012). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. SDT-324.**

Mediante este trabajo se definieron sectores en la cuenca del Salar de Atacama y se evaluó la oferta de recursos hídricos subterráneos. Para dicha sectorización se asignó un nombre a cada sector de la cuenca, relacionado con la localidad o con algún elemento presente, tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Identificación de sectores de la cuenca del Salar de Atacama. SDT-324 DGA, 2012.

Sector	Nombre
1	Río Grande - San Pedro
2	Vilama
3	El Zarzo - Aguas Blancas
4	Soncor - Sicipo
5	Peine - Mitguaca
6	Tilopozo - Pajonles
7	Quebrada Agua Colorada
8	Llano de la Paciencia Sur
9	Llano de la Paciencia Norte
10	Valle de la Luna
11	Cordillera de la Sal
A	baltinache - Barros Negros
B	Aguas de Quelana
C	Laguna Salada
D	Laguna Brava - La Punta
N	Salar

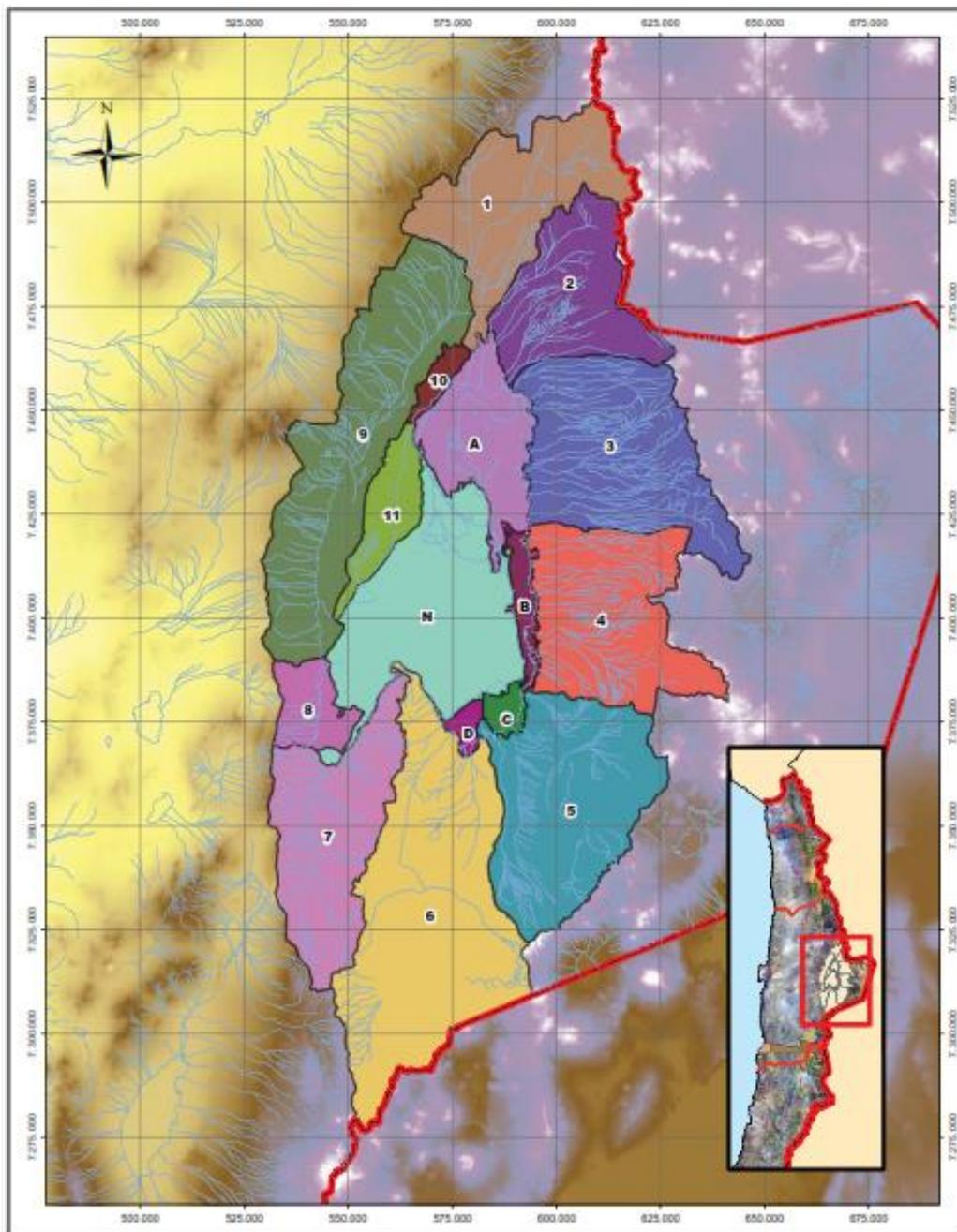


Figura 8. Sectores de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: SDT-324 DGA, 2012.

Así mismo, en este trabajo se hizo una corrección al caudal de demanda para riego en la zona A, reduciendo éste de $1,77 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$, por tanto, aumentando la disponibilidad de agua subterránea de $0,235 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1,180 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 4. Oferta de los recursos hídricos subterráneos. Fuente: SDT-324 DGA, 2012.

Oferta de Recursos Hídricos Subterráneos			
Sector		m³/s	m³/año
1	A	1,1802	37.218.787
2			
3			
10			
4	B	0,522	16.461.792
5	C	0,857	27.026.352
6	D	0,767	24.188.112
7	N	0,1325	4.178.520
8			
9			
11			

- **DGA. (2013). Análisis de la oferta hídrica del Salar de Atacama. División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas. SDT-339**

Se desprende de este análisis, nuevos SHAC basados en las líneas equipotenciales generadas en el estudio de CORFO (1977), el modelo digital de elevación, la actual distribución de extracciones y las potenciales extracciones futuras en vez del trazo basado en sub-cuencas hidrográficas del SDT-210, y las respectivas ofertas de recursos hídricos subterráneos.

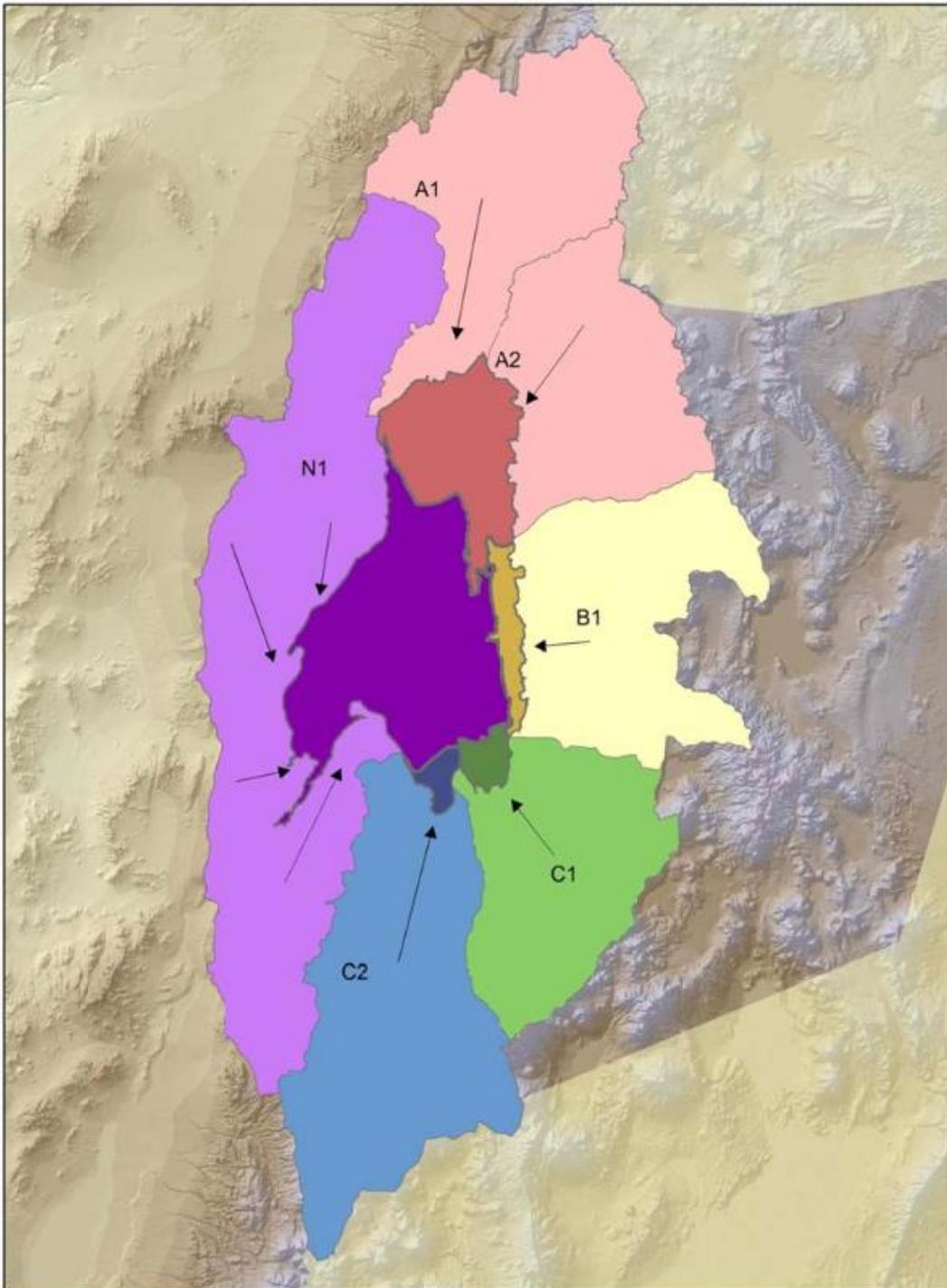


Figura 9. SHACs de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: SDT-339 DGA, 2013.

Se puede observar que el sector C del Salar, se ha dividido en 2 sub-sectores, uno que recibe el aporte de la sub-cuenca C1 y otra que recibe el aporte de la sub-cuenca C2. Esta división se debe principalmente, a que se estima que el sistema hídrico funcionaba históricamente de esta forma (SDT-339).

Debido al gran caudal de derechos otorgados en la sub-cuenca C2, el que supera la recarga estimada, podría resultar que la zona oeste de la zona C del Salar dependa de un flujo proveniente de la sub-cuenca C1. Por lo tanto, se considera necesario que, para fines de gestión de los recursos hídricos, se debe administrar la zona C como una sola unidad (SDT-339).

Con la justificación de que el cálculo de la precipitación efectiva sobre las cuencas aportantes al Salar se realizó a través de un coeficiente y cuyo valor no estaba claramente justificado en el SIT-210, acá, se restó la precipitación a la tasa de evaporación del salar, obteniendo un resultado negativo lo cual no es coherente. Este resultado se debe a dos posibles causas:

- 1) Que la tasa de descarga estimada por Mardones (1986) en el núcleo (0,005 mm/d) esté subestimando el valor real, debido a pocas mediciones espaciales y temporales.
- 2) Que la precipitación sobre el Salar no infiltra, produciendo charcos que se evaporan a una tasa mucho mayor a la medida por Mardones (1986).

Ante esto, se hace necesario realizar nuevos estudios de evaporación en la zona.

En los resultados de este estudio, a la zona marginal, se le resta la precipitación que cae sobre ella (0,462 m³/s), y utilizando la misma metodología del SIT-210 se obtuvo el siguiente balance:

Tabla 5. Balance entre zonas de descarga y recarga de sub-cuencas aportantes. Fuente: SDT-339 DGA, 2013.

Zonas del Salar	Subcuencas	Descarga desde zonas del Salar [m ³ /s]	Precipitación sobre subcuencas [m ³ /s]	Factor	Escurrentía Total desde subcuencas [m ³ /s]	Demanda Ecológica subcuencas aportantes [m ³ /s]	Caudal Pasante al Salar [m ³ /s]
A	A1, A2	2,703	12,133	0,2487	3,017	0,314	2,703
B	B1	1,244	5,518	0,2523	1,392	0,148	1,244
C	C1	0,724	4,917	0,1555	0,765	0,040	0,724
	C2	0,403	5,607	0,0719	0,403	0,000	0,403
N	N1	0,095	3,200	0,0297	0,095	0,000	0,095
Total		5,170	31,375	-	5,672	0,502	5,170

Nota – La Demanda Ecológica aquí se refiere a la demanda dentro de las sub-cuencas aportantes.

Para el cálculo de la evapotranspiración, se utilizó un promedio de las áreas reportadas por Mardones (1986) y las del SIT-210, obteniéndose una evapotranspiración de 1,61 m³/s. Se muestra en la Tabla 6 una oferta hídrica de 2,73 m³/s la cual es inferior a la calculada por el SIT-210 (2,52 m³/s).

Tabla 6. Oferta Hídrica de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: SDT-339 DGA, 2013.

Sub-cuenca	Caudal Aportante [m ³ /s]	Caudal Demanda Ecológica [m ³ /s]	Escoorrentia Superficial [m ³ /s]	Caudal Subterráneo Remanente [m ³ /s]	Zona Aguas Abajo	Demanda Ecológica Aguas Abajo [m ³ /s]	Oferta Hídrica [m ³ /s]
A1	1,691	0,249	0,830	0,612	A	0,880	0,993
A2	1,326	0,065	0,000	1,261			
B1	1,392	0,148	0,000	1,244	B	0,350	0,894
C1	0,765	0,040	0,000	0,724	C	0,380	0,748
C2	0,403	0,000	0,000	0,403			
N1	0,095	0,000	0,000	0,095	N	0,000	0,095
Total	5,672	0,502	0,830	4,340	Total	1,610	2,730

A fin de comprender lo realizado en el SDT-339 es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos utilizados:

- 1) El "Caudal Aportante" corresponde a la "precipitación efectiva" del SIT N° 210, es decir, la precipitación total sobre el área multiplicada por el factor.
- 2) El "Caudal Demanda Ecológica" corresponde a la evapotranspiración en las subcuencas aportantes (aguas arriba del salar).
- 3) La "Escoorrentía Superficial" son los valores medios de aforos.
- 4) "Caudal Subterráneo Remanente" se obtiene de restar "Caudal Aportante" a la sumatoria de "Caudal Demanda Ecológica" más "Escoorrentía Superficial".
- 5) La "Demanda Ecológica Aguas Abajo" corresponde al compromiso ambiental desde lagunas, vegas y cultivos en el área del salar.
- 6) La "Oferta Hídrica" se obtiene de restar el término "Demanda Ecológica Aguas Abajo" al "Caudal Subterráneo Remanente" (por zona).

- **DGA (2014). Minuta N°1. Justificación Sectorización Sector C, Salar de Atacama. División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.**

El objetivo de la minuta fue el de explicar la definición de los SHAC C, C₁ y C₂ vigentes y aclarar la interdependencia entre ellos.

El balance hídrico realizado para cada sector correspondió a:

Tabla 7. Balance hídrico por sectores. Fuente: Minuta 1 DEP-DGA, 2014.

Sector	Recarga aguas arriba (m ³ /s)	Recarga sector (m ³ /s)	Demanda ecológica (m ³ /s)	Recarga al sector C (condición sin derechos) (m ³ /s)
C1	0	0,765	0,04	0,725
C2	0	0,403	0	0,403
C	0,72	0	0,38	-

Para la determinación de la oferta hídrica susceptible de explotar en los sectores C1 y C2 es necesario considerar la demanda ecológica aguas abajo de estos sectores ubicadas en el sector C. El estudio SDT-339 definió un caudal ecológico de 380 l/s en el sector C, el cual es suministrado por los aportes del sector C1 y del sector C2.

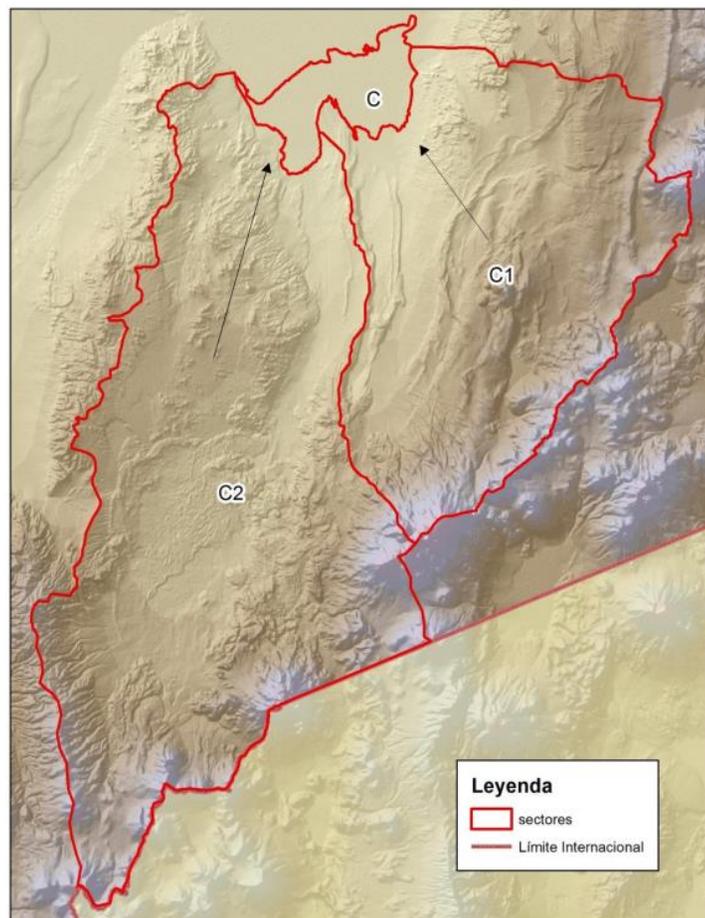


Figura 10. SHAC de la zona sur de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Minuta 1 DEP-DGA, 2014

Se considera que la demanda ecológica debe descontarse de la oferta hídrica del sector C_1 , por las razones que se indican a continuación:

- Según las equipotenciales (modificadas de Anexo 3 de Adenda 4 proyecto "EIA "EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama", 2014), se observa que el sector C_1 aporta caudal a gran parte del sector C y que el sector C_2 aporta a una zona restringida del sector C ubicada al Oeste.
- Aunque fue posible delimitar una divisoria hidrogeológica en base a las equipotenciales de niveles de agua (dibujando una paralela a las líneas de flujo), esta divisoria no sería un límite fijo en el tiempo, debido principalmente al tipo de matriz de suelo que permite el flujo de aguas subterráneas, y a los bajos gradientes de la napa freática que se encuentran en el sector C. Tal divisoria estaría sujeta a cambios en su ubicación en respuesta a cambios de las recargas y/o descargas de aguas subterráneas. Lo anterior es importante de considerar debido a la importante explotación del sector C_2 .

Considerando que las demandas ecológicas son satisfechas mayoritariamente desde el sector C_1 y además que existe un posible escenario en el cual el sector C_2 aporta un caudal menor que el aporte actual, se estima prudente asegurar la satisfacción de la totalidad de la demanda ecológica, con el aporte proveniente desde el sector C_1 hacia el sector C de 380 l/s, lo cual garantizará el caudal ecológico en el caso más desfavorable. Lo anterior resulta en una oferta hídrica para el sector C_1 de 345 l/s (sin considerar derechos constituidos a la fecha). Además, los nuevos derechos otorgados en el sector C_1 deberán estar condicionados a un Plan de Alerta Temprana para asegurar la protección de los acuíferos protegidos, vegas y lagunas en el sector C.

- **DGA (2014). IT DARH 234. Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Subterráneos en los Sectores Acuíferos del Salar de Atacama. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.**

El trabajo se realizó con el fin de analizar la situación de los derechos de aprovechamiento de las aguas subterráneas en el sector acuífero del Salar de Atacama.

Se establece que la oferta y la demanda comprometida de derechos definitivos al 30 de julio del 2014, corresponde a:

Tabla 8. Oferta de los recursos hídricos vs demanda comprometida. Fuente: IT DARH 234, 2014.

Sector Acuífero		Oferta Recursos Hídricos Definitivos (m ³ /año)	Demanda Comprometida al 30 de julio de 2014 (m ³ /año)
A1	A	31.315.248	26.536.361
A2			
B1	B	28.193.184	8.830.080
C1	C	10.879.920	277.517
C2	D	12.709.008	76.547.333
N1	N	2.995.920	1.261.440

Se concluye que, los sectores acuíferos A1, A2, A, B1, B, C1, C, N1 y N, permanecen abiertos a la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas hasta copar los volúmenes totales anuales señalados en la Tabla 8. Mientras que la demanda del sector C2 supera con creces la oferta total de recursos hídricos (en 6 veces la escorrentía subterránea), por lo cual se estima que existe riesgo de grave disminución de dicho acuífero, por lo que no es posible otorgar en él derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en carácter de provisionales.

- **DGA (2014). División de Estudios y Planificación. Análisis de los Mecanismos de Evaporación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas SIT-357.**

Se buscó con este estudio mejorar las estimaciones de evaporación realizadas a la fecha, y proporcionar un monitoreo continuo en el tiempo de la evaporación desde el agua subterránea somera, con el fin de mejorar el conocimiento de los recursos hídricos de la cuenca.

Se instalaron 10 estaciones de monitoreo. Cada estación cuenta con un lisímetro, un pluviómetro, un piezómetro y un sensor de temperatura. Adicionalmente se construyeron 13 piezómetros suplementarios.

Como se citó al inicio del capítulo, a continuación se presenta una tabla resumen de todos los antecedentes consultados.

Tabla 9. Resumen de las principales conclusiones de los antecedentes recopilados

Ref	Nombre	Objetivo del estudio/informe	Zonificación	Recarga	Disponibilidad
1	CORFO (1977)	Estimar la recarga, zonificar y ubicar la interfaz salina.	5 sectores hidrogeológicos (A, B, C, D y E).	1.580 para el acuífero libre 293 l/s para el semi-confinado.	
2	Mardones (1986)	Balance hídrico, zonifica el margen oriente.	Se divide en 5 zonas el margen oriente de la cuenca y en 13 de acuerdo a la tasa de evaporación.	5.506 l/s de entradas y 5.390 l/s de salida.	
3	DGA (1987)	Realizar un balance.		Precipitación de 33,1 m ³ /s, una evapotranspiración real de 28,21 y evaporación de 5 m ³ /s.	
4	DGA-Orphanopoulos (1998)	Balance y zonificación.	Divide en 6 zonas con base a criterio geológico, hidrológico y de demanda.	Recarga de 3.610 l/s.	
5	Minuta N°60 DGA (1999)	Comunicación oficial sobre el estado de la disponibilidad para otorgar derechos de aprovechamiento en la cuenca.	Se adopta la zonificación de Orphanopoulos.	En condiciones de régimen "natural" considerando solo los usos de aguas ancestrales, aproximadamente un 89% del recurso precipitado se pierde por evapotranspiración y que en el Salar mismo se pierde todo lo precipitado sobre él.	El caudal de 3,94 m ³ /s constituye la cota superior de la recarga renovable de los sistemas en las cinco zonas aportantes.
6	SIT-210 DGA-GCF (2010)	Reevaluar la Minuta N°60.	Se propone 13 zonas, además se dividió el Salar en zonas de influencia relacionadas a las subcuencas aportantes alrededor del mismo.	La evaporación se estima en 5844L/s, la escorrentía total (recarga) de 5,6 m ³ /s, como promedio, la precipitación efectiva (7,01 m ³ /s).	Se dividió el salar en zonas de influencia relacionadas a las subcuencas aportantes alrededor del mismo. La disponibilidad establecida es de 2,52 m ³ /s.

7	SDT-324 (2012)	DGA	Evaluar los RRHH subterráneos.	La sectorización de este informe fue ajustada en los bordes próximos a límites internacionales y se asignó un nombre.	Se hace una corrección al caudal de demanda para riego en la zona A, reduciendo este de 1,77m ³ /s a 0,83m ³ /s por tanto aumentando la disponibilidad de agua subterránea de 0,235 m ³ /s a 1,180m ³ /s.
8	SDT-339 (2013)	DGA	Se realizó debido a la solicitud de reconsideración de Minera Escandida al informe técnico SDT-324, (por lo que además se debió realizar la revisión del SIT-210 el cual fue base para el SDT-324).	Nuevos SHAC basado en las líneas equipotenciales, el modelo digital de elevación, la actual distribución de extracciones y las potenciales extracciones futuras. Se dividió la zona C debido a que se estima que el sistema hídrico funcionaba de esta forma históricamente.	Se estima menor al restar la precipitación sobre el Salar (2,73m ³ /s). Debido al gran caudal de derechos otorgados en la sub-cuenca C2, el que supera la recarga estimada, podría resultar que la zona oeste de la zona C del Salar dependa de un flujo proveniente de la sub-cuenca C1. <u>Para fines de gestión de los recursos hídricos se estima necesario administrar la zona C como una sola unidad.</u>
9	Minuta DGA(2014)	Nº1	Explicar la definición de los SHAC vigentes y aclarar la interdependencia entre ellos.	Fue posible delimitar una divisoria hidrogeológica. Ésta divisoria no sería un límite fijo en el tiempo.	Se realiza un balance hídrico <u>sin considerar los derechos otorgados en cada sector</u> , la demanda ecológica del sector C corresponde a 380L/s, suministrado por C1 y C2. Resulta en una oferta hídrica para el sector C ₁ de 345 l/s (<u>sin considerar derechos constituidos a la fecha</u>).
10	IT DARH (2014)	234	Analizar la situación de los derechos de aprovechamiento.		Los sectores acuíferos A1, A2, A, B1, B, C1, C, N1 y N, permanecen abiertos a la constitución de derechos. La demanda del sector C2 supera con creces la oferta, se estima que existe riesgo de grave disminución de dicho acuífero.

Así, una vez recopilados los estudios sobre recursos hídricos en el Salar de Atacama, es posible sintetizar aquellos que corresponde al cálculo de la evaporación específicamente.

2.1.1 Estudios de evaporación en Salar de Atacama

- Características geológicas e hidrogeológicas del Salar del Atacama (Mardones, 1986)

Con base a una recopilación de datos del proyecto CHI 535(CORFO, 1977), Díaz del Río et al. (1972), etc.; Mardones (1986), estimó la evaporación del Salar de Atacama (núcleo más zona marginal), a través la información recopilada in situ mediante el uso de 8 lisímetros.

El estudio realizó una zonificación del Salar en 16 unidades (Figura 4), a partir de la información litológica, densidad del agua, profundidad del nivel freático y tasa de evaporación media. Las tasas de evaporación multiplicadas por el área respectiva de cada zona correspondieron a la descarga desde las napas someras.

El estudio de Mardones no presenta a detalle la metodología utilizada, ni diseño de los lisímetros instalados, sin embargo, concluye que la evaporación depende de cuatro factores:

- La densidad del agua
 - La profundidad del nivel freático
 - Tipo de sedimento
 - Tipo de contra superficial
- "Evaporation and land surface energy Budget at the Salar de Atacama", realizado por Kampf *et al* (2005).

Mediante este estudio se realizaron mediciones de evaporación en 8 puntos del Salar durante los meses de agosto del 2001 y enero del 2002, cubriendo con esto mediciones para el invierno y verano respectivamente, mediante el método de covarianza de Eddy, el cual consiste en realizar un balance de energía en la superficie del terreno estudiado.

Este estudio estableció que la evaporación desde el núcleo no fue detectada en profundidades de al menos 1m por tanto es despreciable.

- "Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama", desarrollado por la DGA-GCF (2010).

Se manifestó que las "mediciones y resultados de las tasas de evaporación determinadas por Mardones son representativas y pueden usarse con seguridad, pues representan condiciones hidrológicas medias".

De acuerdo a los resultados obtenidos existe concordancia entre los resultados del estudio de Mardones y lo obtenido para esta publicación, con excepción de la zona marginal (vegetación) para la cual se obtuvieron como máximo 2,8 mm/d mientras que Mardones 0,3 mm/d.

- Recientemente se realizó el estudio "Análisis de los mecanismos de evaporación y evaluación de los recursos hídricos del Salar de Atacama", SIT 357 (2014).

Bajo el cual se implementó la instalación de 10 estaciones de monitoreo correspondientes cada una a 1 lisímetro, un pluviómetro y un piezómetro. Así mismo se desarrolló una campaña de geofísica la cual tuvo como fin identificar posibles fuentes de recarga profundas desde el Este hacia el salar.

- Así mismo, existen estudios, instrumentos y mediciones de carácter privado a los cuales no se tiene acceso.

3 MODELO CONCEPTUAL

3.1 Modelo conceptual

La Figura 11 muestra un corte de la cuenca del Salar de Atacama que describe su funcionamiento hidrogeológico. En la parte más alta de la cuenca se producen precipitaciones líquidas y sólidas, que posteriormente se infiltran y pasan a ser parte del almacenamiento subterráneo del suelo o escurren a través de cursos superficiales que son normalmente temporales.

El agua almacenada en los acuíferos desciende desde las partes altas de la cuenca hacia los depósitos salinos. En su trayectoria se encuentra con una zona de baja permeabilidad, lo que junto a la existencia de una interfaz salina, hace que el agua dulce aflore, provocando una zona de alta evaporación producto de la poca profundidad subterránea, para luego descargar hacia el núcleo del salar.

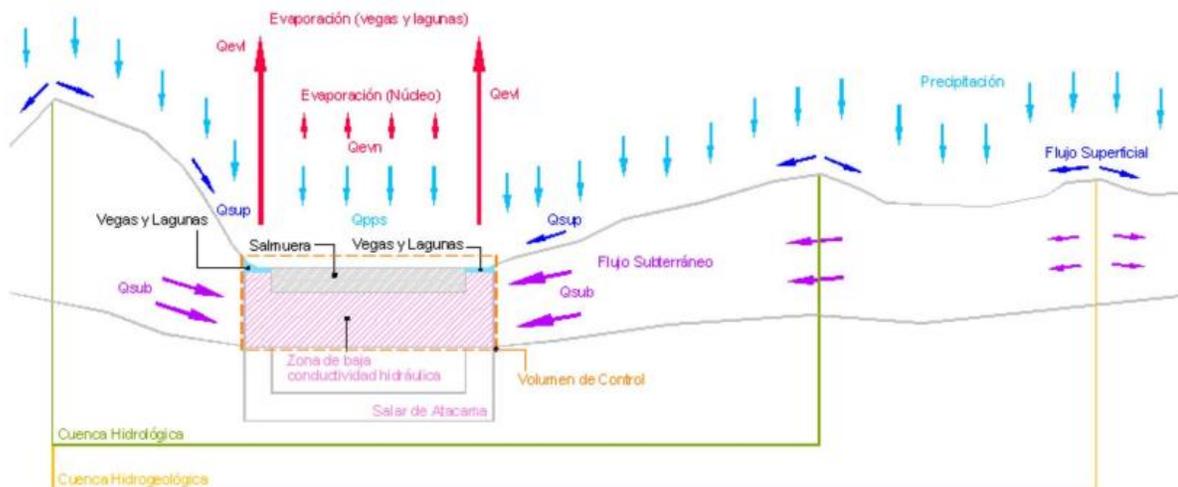


Figura 11. Modelo conceptual hidrogeológico. Fuente: SDT-324, 2012.

En régimen natural, el acuífero del núcleo del Salar recibe la recarga proveniente de la pre-cordillera eliminando los excedentes a través de la evaporación. Debido a este funcionamiento, los flujos de agua subterránea en el acuífero se consideran despreciables y corresponden esencialmente a desplazamientos de salmuera debido a gradientes de concentración.

Actualmente el acuífero del núcleo del Salar está funcionando fuera de su régimen natural, ya que se encuentra sometido al bombeo continuo de salmuera.

Es de conocimiento público varios balances hídricos en la zona, los que, cronológicamente (ver Tabla 9), corresponden a:

- Corfo 1977: CHI-535.
- Mardones 1986: Caracterización geológica e hidrogeológica del Salar de Atacama en *El Litio un nuevo recurso para Chile*.
- DGA 1988: Balance Hídrico de Chile.
- Orphanopoulos, DGA 1998: Evaluación disponibilidad hídrica del Salar de Atacama.
- Mardones 1998: Evaporación y química de las salmueras del salar.
- Muñoz et al. 2004: Hidrología del salar.
- Dictuc 2004: EIA. Cambios y mejoras, Salar de Atacama
- DGA-GCF 2010: SIT 210 Disponibilidad de recursos hídricos.
- DGA 2013: SDT 339 Análisis oferta hídrica.
- DGA 2014: SIT 357 Análisis de mecanismo de evaporación y evaluación de los recursos hídricos.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que además de las referencias citadas, existe mucha más información sin publicar o de acceso restringido como lo es la producida para las empresas mineras instaladas en esta zona.

3.2 Metodología del Balance Hídrico

El ciclo hidrológico en clima árido y semi-árido es altamente controlado por la evaporación, la cual además en una cuenca endorreica, como lo es la cuenca del Salar de Atacama, corresponde a la única salida del sistema. Por tanto la correcta cuantificación de esta variable, además de la precipitación, considerada como la única entrada probada al sistema, esencial para mejorar las estimaciones del balance hídrico.

De acuerdo a la bibliografía consultada es posible descartar del balance hídrico la conexión con otras cuencas, por lo tanto, la ecuación que caracteriza el balance del sistema corresponde a:

$$P = R = E + Q_{ext} \pm \Delta S$$

Donde,

P : Precipitación [L^3/T].
 R : Recarga [L^3/T].
 E : Evapotranspiración total [L^3/T].
 Q_{ext} : Extracciones [L^3/T].
 ΔS : Variación en el almacenamiento [L^3/T].

Sin embargo y bajo el supuesto que el monitoreo de niveles refleja la condición de extracción del salar, es posible establecer que el balance está dado por:

$$R = Ext$$

Donde,

R : Recarga [L^3/T].
 Ext : Extracción total [L^3/T] ($Ext = E_L + ET + E_{SUB}$)

E_L = Evaporación desde lagunas

ET = Evapotranspiración

E_{SUB} = Evaporación desde el agua subterránea

De acuerdo al modelo conceptual del Salar (Figura 11), es necesario contar con el monitoreo de los siguientes elementos a fin de realizar un balance hídrico:

- Datos de evaporación
- Coeficientes de cultivo (según vegetación zona)
- Datos de niveles piezométricos
- Zonificación y áreas de lagunas, vegetación, vegas y/o bofedales
- Datos de evaporación desde tanques evaporímetros
- Precipitación
- Medición de caudales

3.3 Evaporación

El Salar de Atacama, al ser una cuenca endorreica, la salida del agua en régimen natural, se produce desde la evaporación de los cuerpos de agua superficial, las napas someras y la vegetación.

Por tanto, considerando esta salida como la única del balance hídrico en régimen natural (sin considerar la explotación), explica el por qué investigaciones como la de Mardones (1986) se han enfocado en cuantificar la evaporación.

3.3.1 Métodos para determinar la evaporación en napas someras

La evaporación desde el suelo se relaciona con la cantidad de agua contenida en sus capas más superficiales. Un suelo totalmente saturado, dependiendo de sus características físicas, puede llegar a evaporar tanta agua como una superficie líquida. Si el nivel freático se encuentra más profundo la evaporación disminuirá, lo cual a su vez, depende del tipo de suelo (Johnson, 2009).

La evaporación desde napas someras bajo suelos desnudos puede clasificarse en tres grupos, de acuerdo a las condiciones de humedad presentes (Hernández, 2012):

- Para suelos húmedos en superficie, próximos a la saturación, la tasa de evaporación es independiente de sus propiedades, y está limitada únicamente por la disponibilidad de energía y las condiciones atmosféricas.
- Para un suelo con una primera capa seca y un nivel freático somero, la evaporación se producirá a una tasa menor que la demanda evaporativa de la atmósfera. El agua ascenderá desde el nivel freático hasta una determinada altura por capilaridad, a partir de la cual se transforma en vapor y sale a la atmósfera. La zona de interfaz entre el agua y el vapor se conoce como frente de evaporación.
- Para un suelo seco, con un nivel freático profundo, puede producirse evaporación a partir de mecanismos de transferencia de vapor, que actúan sobre el escaso contenido de humedad que puede haber en la matriz.

La evaporación además, se encuentra en función de la temperatura en el perfil del suelo no saturado, así como las condiciones de salinidad en el agua y suelo, por lo tanto, determinar las características del suelo y monitorear los niveles freáticos son fundamentales para una correcta definición de la evaporación, lo cual debe realizarse continuamente a lo largo del año.

Se han desarrollado diversas metodologías de campo que permiten medir y estimar la evaporación desde napas freáticas, tanto en forma puntual como sobre vastas superficies (Johnson, 2009).

En la Tabla 10 se muestra un resumen de cada una de las metodologías, indicando las ventajas y desventajas de cada una:

Tabla 10. Métodos de estimación de evaporación desde napas someras. (Fuente: Johnson, 2009)

Método	Observaciones	Ventajas	Desventajas
Lisímetros	Considerado como una herramienta adecuada y confiable. Implica la alteración de los suelos y la generación de condiciones de borde que pueden distorsionar los resultados obtenidos.	<ul style="list-style-type: none"> • Permite el control artificial de la profundidad del acuífero. • Entrega estimaciones continuas en largos períodos de tiempo. • Medición directa: resultados confiables y con un buen grado de precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado costo de construcción e instalación. • Instrumentación fija: no permite evaluar distintos tipos de suelo. • Altera o invade el suelo, pudiendo obtenerse resultados poco representativos. • Existencia de condiciones de borde.
Tasa de Bowen	Fundamentada en el balance de energía sobre un elemento de volumen con base en la superficie del suelo. Puede ser aplicado en forma eficiente, sin embargo exige la realización de supuestos y simplificaciones teóricas, además de forzar el cierre de la ecuación de balance de energía.	<ul style="list-style-type: none"> • Relativamente económico si se utilizan psicrómetros. • Gran versatilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere utilización de sensores de alta precisión. • Difícil mantención. • Requiere supuestos y simplificaciones. • Se fuerza el cierre de la ecuación de balance.
Correlaciones de Eddy	Establece que asumiendo condiciones de flujo ideales, el flujo de calor latente (o evaporación) puede ser medido en forma directa correlacionando las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento con las variaciones en la densidad de vapor de agua y temperatura. Implica costos elevados de inversión y mantención	<ul style="list-style-type: none"> • Método directo. • Permite analizar errores de cierre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de implementación y mantención. • Sensibilidad respecto a la frecuencia de medición. • Es posible registrar flujos de vapor provenientes de otras zonas (viento)

<p>Análisis de imágenes satelitales o sistemas de percepción remota</p>	<p>Estos métodos se basan en la interpretación de señales reflejadas en la superficie atmosférica y terrestre para estimar valores de evaporación a escala regional</p> <p>Una de las principales desventajas de estas metodologías es la necesidad de contar con información de campo, para calibrar e interpretar correctamente la información obtenida en forma remota.</p> <p>Representan un elevado costo, y en muchos casos no permiten medir en forma precisa flujos de evaporación de baja magnitud, ni realizar estimaciones diarias.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evita campañas de terreno intensivas. • Óptimo para estimaciones regionales. • No requiere estimar otros componentes del balance hídrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Debe complementarse con otras estimaciones. • Estimaciones de carácter puntual en contexto temporal.
<p>Cámara transportable o Domo</p>	<p>Representa una alternativa económica, confiable y de fácil implementación, que permite realizar mediciones puntuales e instantáneas de la evaporación utilizando una cámara semiesférica de acrílico.</p> <p>Permite medir en forma directa los flujos de gas entre la superficie del terreno y la atmosfera.</p> <p>No se ha debatido aun sobre su aplicabilidad en zonas áridas ubicadas a grandes alturas y en presencia de salares.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo de construcción y operación. • Fácil de transportar: permite la realización de mediciones en distintos tipos de suelo y niveles del agua subterránea. • Suelo permanece en condiciones naturales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Debe ser continuamente operado en forma manual. • Cámara puede alterar la radiación real incidente. • Velocidad del viento en el interior puede no ser representativa. • Medición puntual espacial y temporalmente.

Como parte de este Informe Técnico, y como se mencionó en los Objetivos Específicos, se describirán dos métodos que se han utilizado en el Salar de Atacama para medir la evaporación. Estos métodos corresponden a la utilización de diferentes instrumentos de medición, por un lado, Lisímetro y por otro Domo o cámara transportable.

A continuación se realiza una descripción de los dos métodos más utilizados en Chile para la determinación de la evaporación en salares, lisímetros y domo.

3.3.1.1 Lisímetros

Un lisímetro corresponde a columnas rellenas con suelos inalterados o reconstruidos, los que son depositados en tanques impermeables enterrados. Estos tanques poseen una apertura hacia la superficie del terreno, permitiendo un flujo líquido desde el exterior (infiltración) y desde su interior (evaporación) (Johnson, 2009).

Varían desde diseños sencillos hasta complejos que buscan mejorar la incertidumbre del instrumento.

- **Lisímetro de balanza:** el diseño básico de un lisímetro de balanza consiste en un recipiente que contiene una muestra de suelo que es pesado en el tiempo a medida que la humedad del suelo se evapora en condiciones naturales. Otros diseños más complejos incluyen montar la muestra en una balanza con el fin de obtener un registro continuo, además se cuantifica el agua que drena y medición de la humedad en la zona no saturada. Cuando esta metodología es aplicada en una pequeña porción de suelo es comúnmente llamado microlisímetro.
- **Lisímetros de carga variable:** corresponde a un recipiente con una muestra de suelo que está conectado a un estanque de agua. En el estanque se monitorea el volumen de agua que entra al recipiente que contiene el suelo a medida que se evapora.

La instrumentación consta de dos tubos de PVC del mismo diámetro y longitud, conectados en su parte inferior por una tubería que permite la circulación de agua desde el tanque de almacenamiento (sellado) hacia la columna de suelo abierta a la superficie. Asumiendo que inicialmente el sistema se encuentra en equilibrio, el flujo entre ambos tanques se producirá por el gradiente de energía originado gracias a la evaporación desde la muestra de suelo.

En el fondo del cilindro de almacenamiento se instala un sensor de presión que permite determinar la altura de la columna de agua (h) en el estanque. Analizando la diferencia de presión entre dos períodos de tiempo, puede obtenerse el volumen de agua que ha circulado entre ambos estanques para alcanzar el nuevo estado de equilibrio. Para determinar la

evaporación producida en un intervalo de tiempo, se calcula el volumen total de agua que ha dejado el sistema, lo que equivale a sumar el volumen consumido en el tubo de almacenamiento y en la columna de suelo.

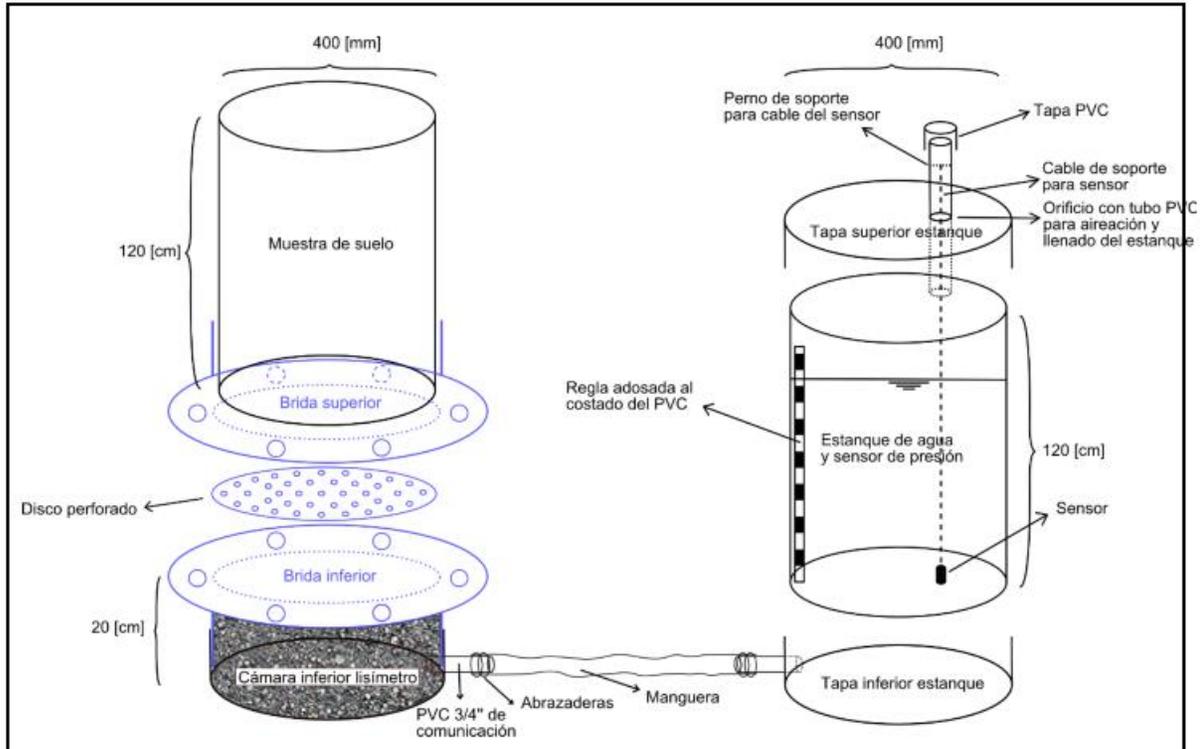


Figura 12. Diseño de lisímetro de carga variable instalado en el Salar de Atacama.
 Fuente: SIT 357, 2014.

- Lisímetros de carga constante:** Corresponde a un recipiente con una muestra de suelo que se conecta a un tubo de Mariotte que mantiene el nivel constante.

El agua contenida en el tubo de Mariotte ingresa al recipiente con la muestra de suelo a medida de que se evapora el agua, pudiendo entonces determinarse la evaporación asociada a dicha profundidad.

Para abastecer de agua a la columna de suelo y de esta forma mantener constante el nivel freático simulado, el tanque de alimentación debe ser equipado con un tubo de Mariotte, fijando su extremo inferior a la profundidad de equilibrio deseada. Al no producirse una variación de nivel de agua al interior de la columna de suelo, no es necesario conocer su porosidad.

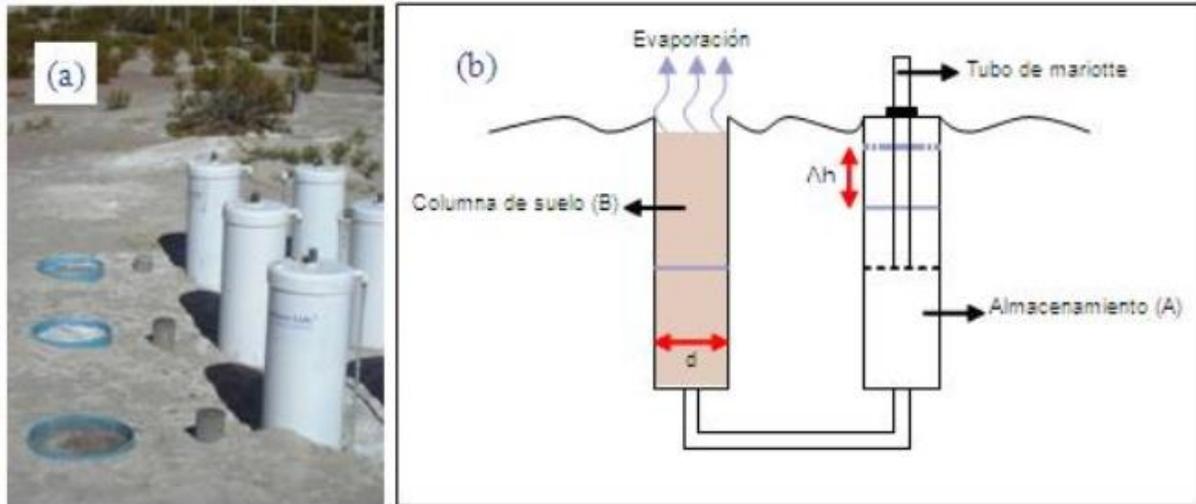


Figura 13. Diseño de lisímetros de carga constante, a) Sistema implementado por Collahuasi-GP consultores en el Salar del Huasco, b) Esquema de funcionamiento. Fuente: Jonhson, 2009.

Existen diversas técnicas en lisímetros con el fin de caracterizar la zona no saturada. Las más comunes son métodos geoelectrónicos como TDR (Time Domain Reflectometry), tensiómetros, medición de temperatura, entre otros.

Al realizar mediciones de evaporación mediante la metodología de los lisímetros debe tenerse especial cuidado en evitar las fugas de agua a través de válvulas y uniones, además de impedir los caminos de flujo preferencial entre la columna de suelo y el borde del tanque que la almacena. De ocurrir, ambas situaciones se traducirán en una sobreestimación de los flujos de evaporación (Johnson, 2009).

3.3.1.2 Domo

Se basa en la cuantificación del incremento del vapor de agua proveniente del acuífero, mediante una cámara semiesférica de acrílico que cumple la función de volumen de control con dimensiones conocidas. La forma de la cúpula y su material permiten el paso de la radiación solar y evita la producción de perturbaciones en las ondas incidentes (Stannard, 1988).

La metodología del domo ha sido estudiada por distintos autores con el fin de determinar la evaporación desde suelos desnudos en presencia de napas someras o la evapotranspiración a partir de suelos con vegetación, pero aún no se ha debatido sobre su aplicabilidad en zonas áridas ubicadas a grandes alturas y en presencia de sales (SIT-357).

Esta es una alternativa que se presenta económica, confiable y de fácil implementación, que permite realizar mediciones puntuales e instantáneas de la

evaporación utilizando una cámara semiesférica de acrílico. Mide la evaporación real que se produce en un punto específico, y la frecuencia de medición está en función de las condiciones meteorológicas presentes, pudiendo entonces realizarse las mediciones con mayor o menor frecuencia.



Figura 14. Equipamiento de los domos. Fuente: Jonhson, 2009.

3.3.1.3 Comparación de metodologías

De acuerdo a lo realizado por Johnson (2009), es posible realizar una comparación de los datos de evaporación obtenidos mediante lisímetros y microlisímetros, siempre que correspondan a suelos de características similares a los muestreados con el domo. Los valores obtenidos con lisímetros reflejarán la tasa promedio alcanzada durante un período de registro de varios meses. Además, las profundidades del nivel freático en el interior de los lisímetros son fijadas de forma artificial, por lo que no necesariamente representan la situación natural de los suelos circundantes.

Debido a esto, no es posible comparar en forma directa las mediciones puntuales e instantáneas realizadas a través del domo con los resultados de un lisímetro en particular, debiendo analizarse como conjunto y a través de las tendencias obtenidas con ambos métodos.

Es fundamental determinar y cuantificar las posibles fuentes de error en las mediciones, determinar la representatividad del periodo de tiempo elegido para medir, así como, la definición de los sitios de medición, entre otros.

3.4 Datos disponibles

En el Anexo 5 se muestra una serie de tablas que resumen los parámetros que se monitorean, su período, ubicación y nombre de cada estación.

3.4.1 Red de monitoreo

La red meteorológica de la DGA, mide datos de precipitación, temperatura, humedad, evaporación de tanque y velocidad de viento y caudal.

Las tablas 11 a la 16 del Anexo, muestran el nombre de la estación, las coordenadas de ubicación, altitud, periodo de registro y años.

Como parte de los productos del estudio SIT 357, se implementó una red de monitoreo de evaporación compuesta por un lisímetro, una estación pluviométrica, un sensor de temperatura y un piezómetro, así mismo, se implementó una red piezométrica de monitoreo compuesta por 13 piezómetros extra a los colocados en la red de lisímetros, estos equipos actualmente se encuentran midiendo los datos sin embargo no se transmite en línea. La ubicación de ambas redes se muestra en la siguiente figura.

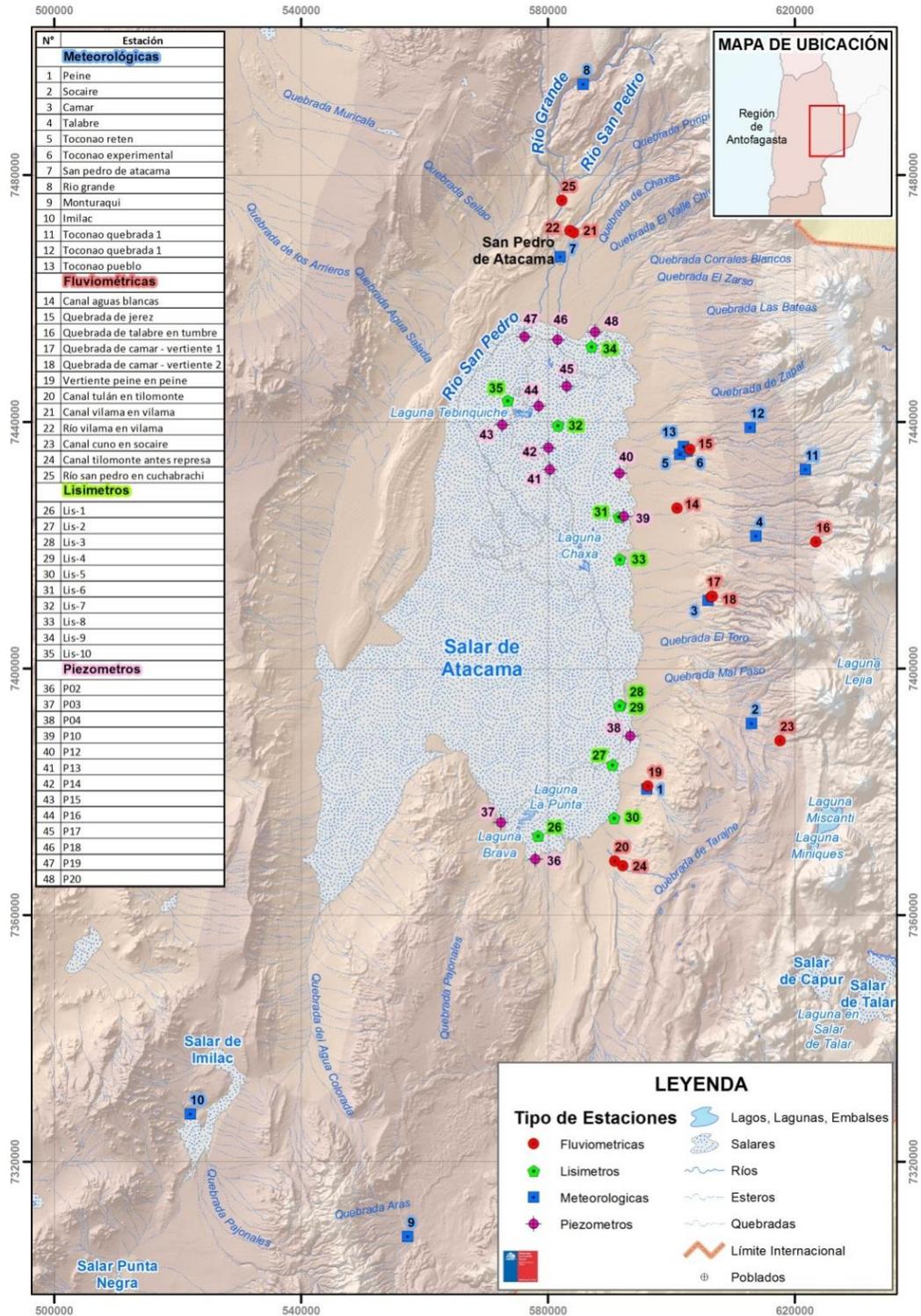


Figura 15. Estaciones DGA instaladas en el Salar de Atacama. Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Monitoreo de niveles

Además de las estaciones meteorológicas y fluviométrica, de acuerdo a la información recopilada por el SIT 357, en la zona existen 172 pozos de un Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) los cuales se observan en la figura a continuación.

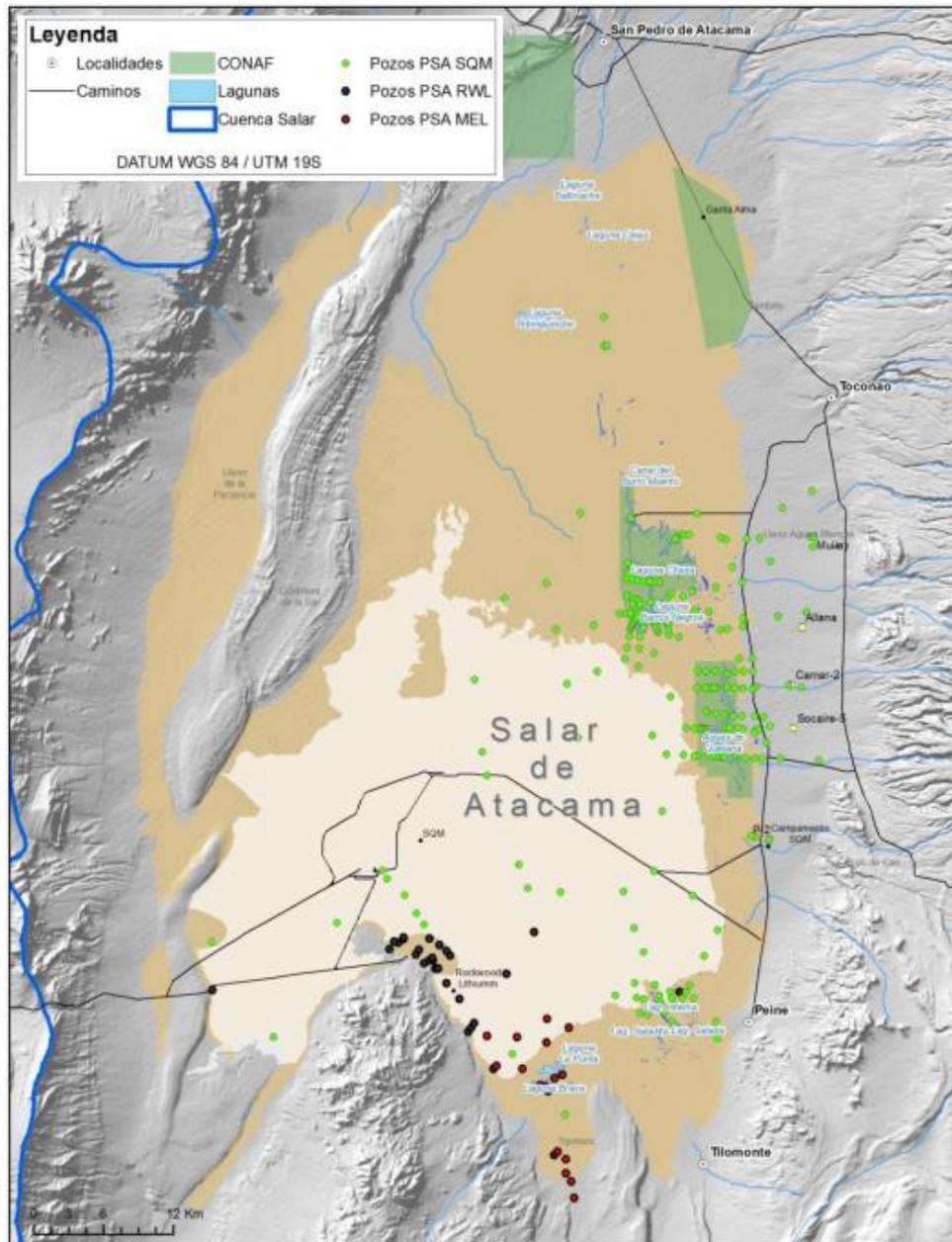


Figura 16. Catastro de pozos. Fuente: SIT 357, 2014.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se propone una serie de mejoras y recomendaciones a fin de realizar un balance hídrico actualizado, para lo cual la DGA deberá:

- Definir si el balance se realizará a nivel mensual o anual, por tanto definición de periodo de monitoreo.
- De acuerdo a los lisímetros instalados mediante SIT 357 (2014), se requiere recopilar los datos a fin de generar información de evaporación como mínimo a nivel mensual. Dar mantenimiento según recomendaciones, relleno de los lisímetros con agua bombeada de los piezómetros ubicados en cada estación, entre otras.
- Evaluar la ubicación de los lisímetros instalados, a fin de completar la distribución de éstos en las zonas de evaporación definidas por Mardones (1986).
- Realizar toma de muestras de aguas, a fin de determinar la salinidad y evaluar una nueva sectorización.
- Definir si el balance se realizará considerando la zonificación de Mardones (1986), se hará una nueva, por cuenca aportante, etc.
- Incorporar campañas de aforos a nivel mensual en sitios donde no se cuenta actualmente con datos.
- Colocar al menos 3 estaciones meteorológicas a fin de mejorar y completar la información y la distribución actual. La estación deberá medir temperatura, precipitación, evaporación, velocidad de viento, humedad, entre otros).
- Evaluar las estaciones que actualmente están en funcionamiento, a fin de incorporar instrumentación necesaria para completar la generación de datos requeridos para el balance.
- Obtener imágenes satelitales y/o datos de niveles en las lagunas, lo que permitirá conocer la variación de la lámina de agua y posteriormente la evaporación a nivel mensual.
- Se debe tener en cuenta que para el cálculo de balance hídrico y la comparación de resultados como lo realizado por la DGA (SDT 339) se debe contar con las mismas fuentes de datos, métodos y períodos de observación.
- De acuerdo a los informes y estudios, recopilados y analizados es posible concluir que existe una necesidad de mejora en el conocimiento del salar por lo que se requiere generar e implementar una estrategia de transferencia de información entre las instituciones y las empresas privadas.

- A través de la estrategia a implementar es necesario generar bases de datos, comparación e implementación de metodologías en conjunto, completar vacíos de información, entre otros, con el fin de desarrollar un único, público y actualizado balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama.

5 BIBLIOGRAFÍA

CORFO. (1977). Investigación de recursos hidráulicos en el Norte Grande - Proyecto CHI 535. CORFO-DGA-CCC-ONU.

DGA. (1987). Balance Hídrico de Chile. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.

Stannard, D. (1988) Use of a hemispherical chamber for measurement of evapotranspiration. US Geol. Survey Open-File Report 88-452.

DGA. Orphanopoulos (1998). Evaluación disponibilidad hídrica del Salar de Atacama.

DGA. (1999). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región. Minuta n° 60. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

DGA-GCF. (2010). Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. SIT 210.

DGA. (2012). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama. SDT 324.

DGA. (2013). Análisis de la oferta hídrica del Salar de Atacama. Santiago, Chile: Departamento de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas. SDT 339.

DGA (2014). Minuta N°1. Justificación Sectorización Sector C, Salar de Atacama. División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

DGA. (2014). Análisis de los mecanismos de evaporación y evaluación de los recursos hídricos del Salar de Atacama. SIT 357.

DGA (2014). IT DARH 234. Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Subterráneos en los Sectores Acuíferos del Salar de Atacama. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

DGA (2016). IT DARH 58. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

Hernández, M. F. (2012). Evaluación experimental y numérica de la evaporación desde aguas subterráneas someras. Aplicación a suelos salinos de la cuenca del Salar de Huasco - Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.

Johnson, E. (2009). Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Johnson, E., Yáñez, J., Ortiz, C., & Muñoz, J. (2010). Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano. *Hidrogeological Sciences Journal*. Chile,13.

Kampf *et al* (2005). Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. *Journal of Hydrology* 310 236-252

Mardones, L. (1986). Características Geológicas e Hidrogeológicas del Salar de Atacama. En *El Litio, un nuevo recurso para Chile*. Santiago, Chile: G. Lagos.

6 ANEXO

6.1 Estaciones de monitoreo en el la cuenca del Salar de Atacama

6.1.1 Precipitación

Tabla 11. Estaciones pluviométricas con datos disponibles. Fuente: BNA-DGA, Diciembre-2016.

Estación de monitoreo	Este (WGS 84)	Norte (WGS 84)	Altitud (msnm)	Periodo	Años registro
Peine	596.045	7.380.388	2460	1974-2016	40
Socaire	613.011	7.391.031	3251	1974-2016	40
Camar	605.954	7.411.015	2700	1979-2016	35
Talabre	613.727	7.421.415	3300	1995-2016	19
Toconao Reten	601.376	7.434.668	2460	1975-1991	16
Toconao Experimental	602.573	7.435.183	2500	1975-2009	34
San Pedro de Atacama	582.019	7.466.710	3250	1959-1989/ 2011-2016	33
Rio Grande	585.709	7.494.705	3250	1977-2016	37
Monturaqui	557.288	7.307.823	3430	1974-1980	6
Toconao Quebrada 1	621.742	7.432.239			
Toconao Quebrada 4	612.782	7.439.076			
Toconao Pueblo	601.953	7.435.956			
Imilac	522.066	7.327.668		1972-1977	5

6.1.2 Temperatura

Tabla 12. Estaciones de monitoreo de temperatura con datos disponibles. Fuente: BNA-DGA, Diciembre-2016.

Estación de monitoreo	Altitud (msnm)	Años de registro	Periodo
Peine	2.480	33	1974-2016
Caspana	3.260	35	1973-2007
Linzor	4.096	35	1973-2012
El Tatio	4.320	21	1983-2016

6.1.3 Humedad

Tabla 13. Estaciones de monitoreo de humedad con datos disponibles. Fuente: BNA-DGA, Diciembre-2016.

Estación de monitoreo	Altitud (msnm)	Años registro	Periodo
San Pedro	2.450	5	1985-1989
Peine	2.460	10	1988-1998
Toconao Experimental	2.500	18	1988-2006
Caspana	3.260	15	1987-2002
Linzor	4.100	11	1988-1999

6.1.4 Evaporación

Tabla 14. Estaciones de monitoreo de evaporación con datos disponibles. Fuente: BNA-DGA, Diciembre-2016.

Estación de monitoreo	Altitud (msnm)	Años registro	Periodo
San Pedro	2.450	26	1963-1989
Peine	2.460	38	1975-2016
Toconao Experimental	2.500	34	1975-2009
Socaire	3.251	24	1974-1998
Caspana	3.260	34	1973-2007
Monturaqui	3.430	5	1974-1979
El Tatio	4.370	9	1985-1994
Linzor	4.100	33	1974-2007

6.1.5 Velocidad del viento

Tabla 15. Estaciones de monitoreo de velocidad del viento con datos disponibles. Fuente: BNA-DGA, Diciembre-2016.

Estación	Altitud (msnm)	Años	Periodo
San Pedro	2.450	20	1969-1971 1973-1989
Peine	2.460	41	1974-2016
Toconao Experimental	2.500	17	1993-2009
Socaire	3.251	5	1974-1975 1977-1979
Caspana	3.260	36	1973-2008
Monturaqui	3.430	6	1974-1979
Linzor	4.100	34	1974-2007
El Tatio	4.370	5	1990-1994

6.1.6 Red Fluviométrica

Tabla 16. Estaciones de monitoreo fluviométrico con datos disponibles. Fuente: BNA-DGA, Diciembre-2016.

Estación monitoreo	UTM (WGS 1984)		Altitud (msnm)	Años registro	Periodo
	Este	Norte			
Canal Aguas Blancas	600.917	7.425.944	2.415	16	1977-2001
Canal Tulán en Tilomonte	590.873	7.368.734	2.380	14	1990-2000
Canal Vilama en Vilama	584.206	7.470.634	2.550	31	1976-2016
Río Vilama en Vilama	583.570	7.470.975	2.550	30	1971-1972
Canal Cuno en Socaire	617.637	7.388.227	3.600	18	1989-2013
Canal Tilomonte Antes Represa	592.170	7.367.957	2.440	10	1997-2013
*Quebrada de Jerez	603.030	7.435.488			
*Quebrada De Talabre En Tumbre	623.435	7.420.476			
*Quebrada De Camar - Vertiente 1	606.469	7.411.535			
*Quebrada De Camar - Vertiente 2	606.697	7.411.656			
*Vertiente Peine En Peine	596.190	7.380.879			
Río San Pedro en Cuchabrachi	582.268	7.475.873	2.585	48	1967-2016

*estaciones con datos de aforo solamente.

6.1.7 Lisímetros

Tabla 17. Estación de monitoreo instalada por la DGA. Fuente: SDT 357

Estación monitoreo	UTM (WGS 1984)	
	Este	Norte
Lis-1	578.419	7.372.845
Lis-2	590.459	7.384.353
Lis-3	591.764	7.394.074
Lis-4	591.612	7.393.992
Lis-5	590.716	7.375.739
Lis-6	591.475	7.424.606
Lis-7	581.605	7.439.456
Lis-8	591.656	7.417.731
Lis-9	587.058	7.452.197
Lis-10	573.502	7.443.461

6.1.8 Piezómetros

Tabla 18. Ubicación de piezómetros instalados por la DGA. Fuente: SDT 357

Estación monitoreo	UTM (WGS 1984)	
	Este	Norte
P02	577.977	7.369.049
P03	572.401	7.374.970
P04	593.374	7.389.036
P10 (seco)	592.321	7.424.627
P12	591.589	7.431.659
P13	580.336	7.432.214
P14	580.091	7.435.769
P15	572.635	7.439.502
P16 (seco)	578.528	7.442.574
P17	583.057	7.445.792
P18 (seco)	581.564	7.453.307
P19 (seco)	576.235	7.453.810
P20	587.620	7.454.575