



INFORME FINAL

CONVENIO DE PRESTACIÓN DE ACCIONES DE APOYO

“Confección y ejecución de estudio de Línea Base y propuesta de zonificación para terrenos fiscales donde se emplazan las lagunas Fiscales altiplánicas Cejar y Piedra, Comuna de San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta”

MINISTERIO DE BIENES NACIONALES

Y

UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA



Antofagasta, Marzo 2016

INDICE

	Página
I. ANTECEDENTES GENERALES CUENCA SALAR DE ATACAMA	3
II. OBJETIVOS	4
III. LINEA BASE	5
i. ETAPA 1: Aspectos generales de hidrogeología y geomorfología	5
ii. ETAPA 2: Caracterización de flora y vegetación	15
iii. ETAPA 3: Caracterización de fauna	16
iv. ETAPA 4: Estudio limnológico y microbiológico	27
v. ETAPA 5: Caracterización del uso actual del espacio	49
vi. ETAPA 6: Elaboración de una zonificación y recomendaciones	55
IV. ANEXOS	59

I. ANTECEDENTES GENERALES CUENCA SALAR DE ATACAMA

El Salar de Atacama es la mayor cuenca evaporítica del país, la cual tiene una extensión total de 18100 km². Está ubicado a 2300 metros sobre el nivel del mar en el Desierto de Atacama. Las precipitaciones en esta zona se concentran en verano, alcanzando 25 mm/año, siendo la evaporación potencial de 2000 mm/año, es decir, existe un balance hídrico negativo. La temperatura media en el salar de Atacama es de 14°C (Risacher et al., 1999), existiendo una gran amplitud térmica. La humedad relativa tiene un promedio anual de 44,9% y la velocidad media del viento alcanza 10m/s a 40 cm del suelo con dirección oeste generalmente (DGA, 1991).

El Salar de Atacama ha sido estudiado extensivamente respecto a su geología, hidrogeología y mineralogía, principalmente por su importancia económica al encontrarse grandes depósitos de litio en la zona sur. En su cuenca se pueden encontrar distintos cuerpos de agua, entre afloramientos de agua dulce, lagunas salobres, y ríos en la parte norte y oriental. Dentro de estos cuerpos de agua, la Laguna Cejar y La Piedra son actualmente atractivos turísticos ubicados en la parte norte del salar. En general, existe escasa literatura específica respecto a estos dos cuerpos de agua.

II. OBJETIVOS DE LA PROPUESTA

Confeccionar y ejecutar el levantamiento de una línea de base y proponer una zonificación para terrenos fiscales con alto valor en biodiversidad, donde se emplazan las lagunas altiplánicas Cejar y La Piedra en la comuna de San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta.

Objetivos específicos:

- 1) Elaborar una línea de base ambiental con énfasis en biodiversidad, ecología y servicios ecosistémicos del área de estudio.
- 2) Identificar y caracterizar los ecosistemas que conforman las lagunas Cejar y Piedra y sus riberas, garantizando el levantamiento de variables que permitan su caracterización física, bioquímica, ecológica, así como hidrogeológica de las lagunas y sus afluentes próximos.
- 3) Generar un diagnóstico del estado y la condición ambiental de las lagunas con énfasis en la limnología y microbiología de la zona de estudio, que permita identificar las amenazas existentes y las oportunidades en torno a la gestión futura de las mismas.
- 4) Caracterizar la relación del ecosistema de las lagunas y su entorno y usos, a través de la determinación de la capacidad de carga de las lagunas.
- 5) Elaborar una propuesta de zonificación con recomendaciones de acciones a seguir respecto de la intervención y manejo de las lagunas, que sirva de directriz para orientar la administración y gestión sustentable de los recursos comprometidos.

III. LÍNEA DE BASE

i. ETAPA 1: Aspectos generales de geología, hidrogeología y geomorfología

Geología

Las lagunas Cejar y La Piedra se encuentran ubicadas en la porción norte del Salar de Atacama (**UTM 580467,75 Este, 7449115,49 Norte**) la cual se encuentra limitada por morfoestructuras de relieve positivo, al este por la Precordillera, al oeste por dos cordones de orientación noreste-suroeste, siendo el más lejano la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de la Sal, al norte por la unión de éstas (Ramírez y Gardeweg, 1982).

En detalle, la **Cordillera de Domeyko** es una sucesión de rocas paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas, donde se describen dos secuencias importantes: i) Formación Purilactis (Cretácico) y ii) Formación Tambores (Oligoceno, Mioceno Superior); por otro lado, la **Cordillera de la Sal** está formada principalmente por rocas sedimentarias y volcánicas del cenozoico, describiéndose i) Formación San Pedro (Oligoceno, Mioceno) y la Formación Vilama (Pleistoceno).

La cuenca del Salar de Atacama es de origen tectónico, existiendo en su parte más baja depósitos de sedimentos clásticos y evaporíticos que se mezclan con materiales dendríticos y salinos de los bordes. En total, esta cuenca intermontana tiene una extensión de 110 km a lo largo y 60 km de ancho en su parte central (DGA, 1991).

Hidrogeología

La cuenca hidrogeológica del Salar de Atacama ocupa un área de 18100 km², extendiéndose desde los 22°20' hasta los 24°10' latitud sur. El salar posee una superficie de 3000 km² y la superficie de las lagunas alcanza 12,6 km² (Risacher et al., 1999). El salar en sí, está definido como una cuenca de sedimentación donde la depresión central está ocupada por una costra formada de halita (NaCl) de 1100 km² de superficie y 900 m de profundidad, la cual se encuentra rodeada de limos salinos de 2000 km² de superficie (Risacher et al., 1996). El principal aporte superficial de la hoya proviene del sector norte del Salar, con los ríos San Pedro y Vilama, los cuales constituyen cerca del 70% de la descarga superficial total, de los cuales un 40% se destina a uso agrícola (Mardones, 1997). El río San Pedro se genera en la confluencia de los ríos Grande y Salado, lo cual ocurre a 12 km aguas arriba del poblado de San Pedro de Atacama. El río Vilama se origina en Guatín a 22 km al norte de San Pedro de Atacama por la confluencia de los ríos Purifica y Puritama a 3370 metros sobre el nivel del mar. Por otro lado, el salar recibe además importantes aportes subterráneos desde el Este y del sur (vertientes) originadas en las formaciones volcánicas de la Cordillera de los Andes, donde se han formado oasis como Toconao, Socaire y Peine.

Se ha descrito que, debido a la pureza de las sales, el núcleo del Salar de Atacama no proviene de desecamiento de antiguos paleolagos, si no que más bien de aportes subterráneos. Los componentes disueltos en las aguas de aporte tienen dos orígenes: la alteración de rocas volcánicas proporciona K, Li, Mg, B y en menor medida Na y Ca, mientras que la redisolución de sales antiguas

(que están debajo de las formaciones volcánicas) aportan de forma importante con Na, Cl, Ca y SO_4 en las aguas más salinas (Risacher et al., 1996).

La litología de la cuenca se ha dividido en dos tipos: i) rocas volcánicas de permeabilidad media, de los períodos terciarios y cuaternarios, formadas por coladas, tobas y brechas con intercambio de sedimentos clásticos continentales y ii) depósitos no consolidados, formados por sedimentos fluviales, aluviales y lacustres del cuaternario de permeabilidad alta (CADE – IDEPE, 2004).

Geomorfología

El Salar de Atacama posee un alineamiento marcado al Norte debido a su origen tectónico y endorreico. En la cuenca concurren aguas de sistemas hidrográficos prealtiplánicos como el río San Pedro y río Vilama. En la parte occidental se encuentra el Llano de la Paciencia y por su parte oriental (falla del Bordo) se observa cómo se elevó la precordillera. Hacia el sur del salar se desarrolla la Cordillera de Domeyko, la cual se originó en el Oligoceno como una serranía baja. Su conformación actual se debe a dislocaciones tectónicas pliocénicas, después de efusiones de liparitas.

La unidad geomorfológica del Salar de Atacama está condicionada por distintos factores como: i) variaciones de temperatura, ii) alta tasa de evaporación, iii) escasas precipitaciones concentradas en el verano, iv) escurrimiento superficial y v) variaciones de nivel de agua subterránea. Estas características han condicionado zonificaciones en la superficie del salar de unidades limosalinas y salinas, con distintos micro-relieves y estructuras positivas y negativas (DGA, 1991).

Laguna Cejar y La Piedra

En la parte norte del Salar de Atacama se sitúan las Lagunas Cejar y La Piedra, las cuales son consideradas por la DGA como sistemas de vegas y cuyos acuíferos se encuentran protegidos. En total estas dos lagunas poseen un área total de 114,68 ha. Según observaciones satelitales, se distinguen al menos 6 pozos (lagunas) en el sistema Cejar-La Piedra (Fig. 1), los cuales alcanzarían una profundidad medida sobre los 10 m. Sin embargo, es necesario realizar mayores estudios para realizar una batimetría del sistema acuático, ya que con sistemas automáticos no fue posible debido a la alta salinidad del sistema. De acuerdo a la sectorización de la cuenca del Salar de Atacama por la Dirección General de Aguas (DGA, 2010), el sistema Cejar-La Piedra se encuentra en el sector 12, donde también se sitúan otros sistemas acuáticos como Oyape, Baltinache, Yona Grande, Los Pantanos, Tujlirea, Tambillo, Olar, Tapar, Carvajal, Quelana y Cejar (Fig. 2) (DGA, Res. N°87/24-03-2006), alcanzado un área total de 1098,66 km².

Es importante señalar que en la literatura esta laguna es nombrada indistintamente como Cejar o Cejas (donde se incluye la Laguna La Piedra). Existe una estación meteorológica en Río Grande (estación meteorológica N°22, DGA), donde los datos de precipitaciones muestran una clara estacionalidad de las lluvias siendo máximas en los meses de enero, febrero y marzo, cuyos valores promedios mensuales fluctúan entre 23,5 mm en febrero (máximo) y 0,1 mm (mínimo) en octubre (Fig. 3).

El levantamiento de información se realizó mediante extensiva búsqueda bibliográfica y visitas a terreno durante Septiembre y Noviembre de 2015. Los resultados de dichas visitas se detallan en las etapas 2, 3 y 4. La metodología de muestreo para cada ítem de análisis se encuentra en el Anexo.

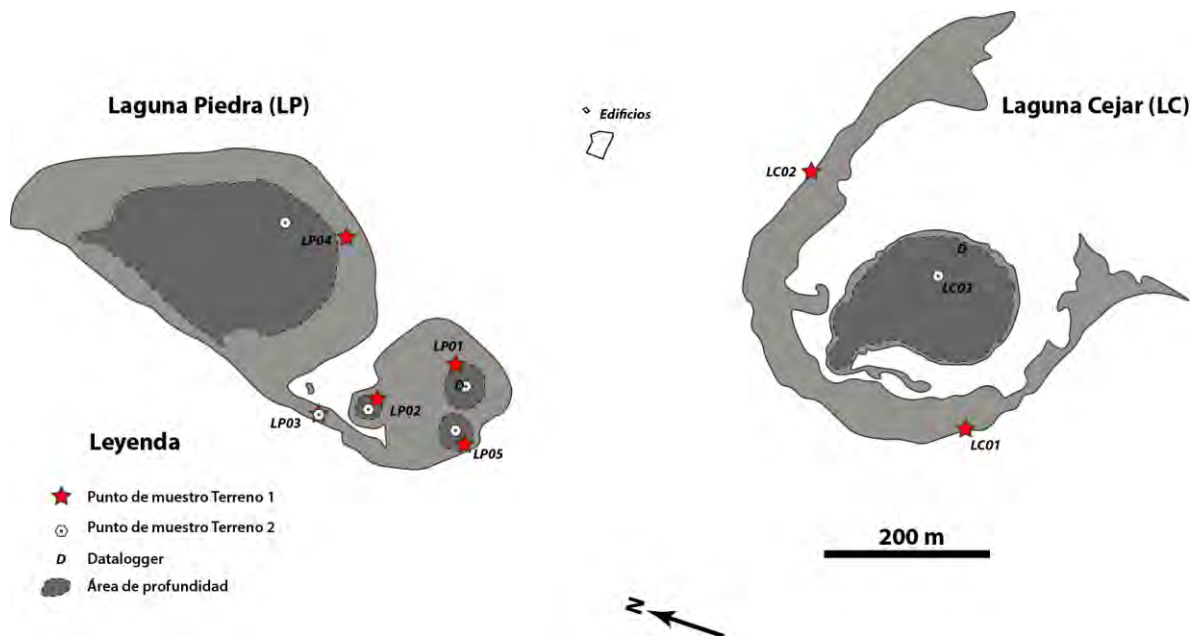


Figura 1. Ubicación geográfica de las Laguna Cejar y La Piedra en el Salar de Atacama, indicándose los sitios de muestreo.

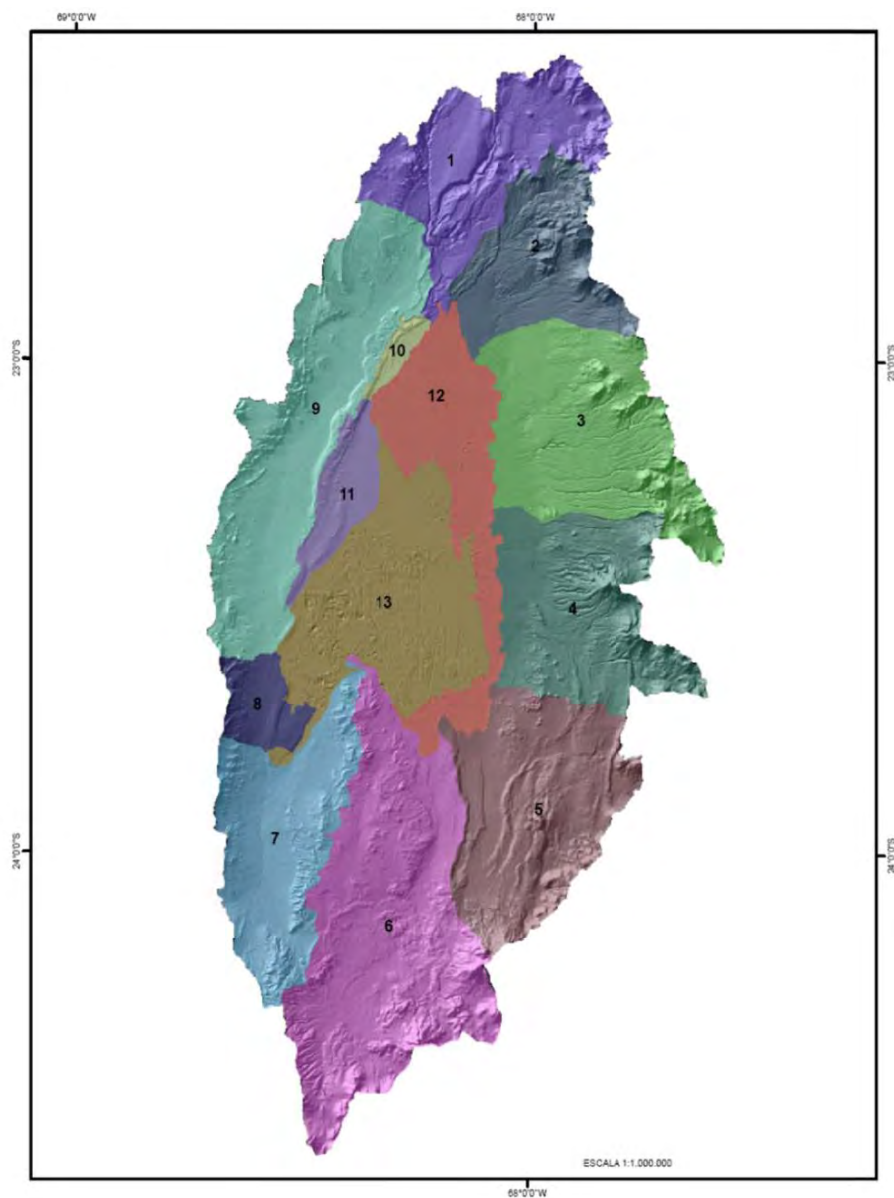


Figura 2. Sectorización del Salar de Atacama de acuerdo a características hidrogeológicas o geomorfológicas (DGA, 2012).

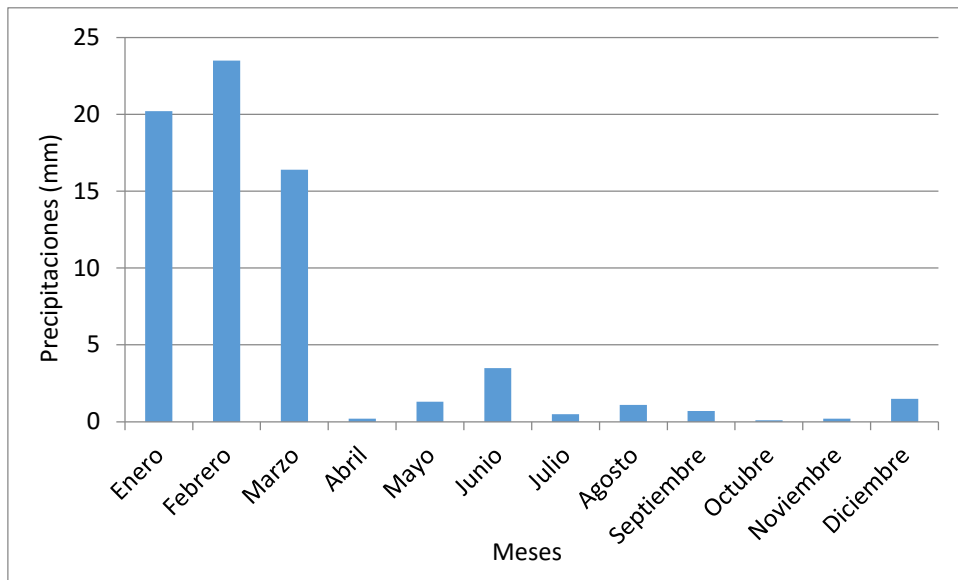


Figura 3. Precipitaciones promedios mensuales en estación meteorológica Río Grande (años 1970-2008)

En el área de ubicación de estas lagunas (Cejar y La Piedra), los suelos son salinos, debido a la fluctuación de los niveles de aguas subterráneas que afloran. Los niveles de agua cambian estacionalmente, donde las lagunas que conforman el sistema pueden unirse dependiendo de la estación. Los precipitados de sales que hay en el área se deben a la alta tasa de evaporación y que las aguas son ricas en NaCl. Las costras salinas más gruesas precipitan en las lagunas en la parte sur de la Laguna La Piedra, la cual precipita como una pátina superficial. En las otras lagunas la sal precipita como costras de sales delgadas como resultado de la precipitación del agua intersticial (Stivaletta et al., 2011) (Fig. 4). En una revisión reciente (“Diagnóstico y gestión ambiental integrada de humedales altoandinos”, CEA 2015), se considera al sistema “Laguna Cejar y otros cuerpos de agua” como sitio prioritario para la conservación dentro del sistema Salar de Atacama, identificado con el número 155 en el mapa respectivo (Fig. 5).

A)



B)



Figura 4. A) Sitio LP05, Laguna La Piedra con vista hacia el Este; B) Laguna Cejar, vista desde mirador turistas.

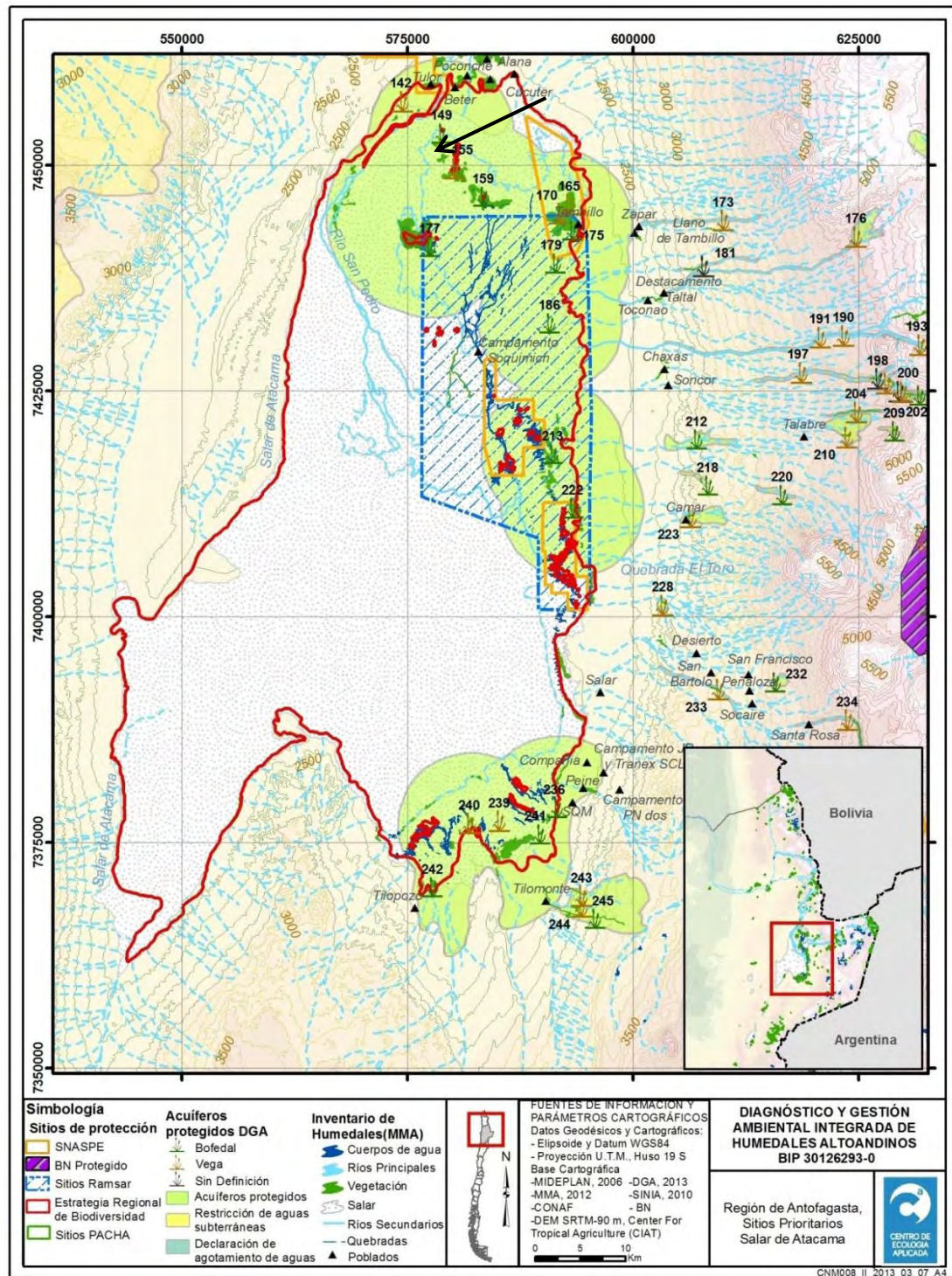


Figura 5. Sitios prioritarios para la conservación en Salar de Atacama, Centro de Ecología Aplicada (2015). Sistema Laguna Cejar-La Piedra es indicado con el número 155 (flecha negra parte superior figura).

Análisis de permeabilidad del suelo y la presencia y profundidad de napas subterráneas

La Dirección General de Aguas ha realizado frecuentemente estudios técnicos respecto a los recursos hídricos del Salar de Atacama (DGA 2010, 2012, 2013), donde la sectorización realizada muestra que habrían dos zonas (sector 1 y sector 2) que estarían influyendo en la disponibilidad de agua del sistema de lagunas ubicados en el sector A donde están emplazadas las lagunas Cejar y La Piedra (Figura 6).

Recientemente se ha publicado el estudio “Evaluación de los recursos hídricos del Salar de Atacama” (DGA, 2012) donde se establece que en la zona donde se ubica la Laguna Cejar-La Piedra los suelos son del tipo yeso limoso blando, los cuales generalmente presentan baja permeabilidad. En el estudio de Mardones (1986, modificado por DGA 2012), se pudo calcular la evaporación de las distintas zonas del Salar de Atacama, reportándose para esta área una profundidad promedio de agua de 1,11 m y una tasa de evaporación de 0,1 mm/día. El caudal promedio de evaporación (corregido) corresponde a 0,228 m³/s.

Las aguas subterráneas del Salar de Atacama se encuentran ubicadas en la llamada Provincia andina vertiente pacífico, donde se reciben aportes permanentes en los sectores Norte y Este del Salar, que vienen de la Cordillera de los Andes. La zona donde se ubican las lagunas en estudio (zona A), tiene una superficie de 816,09 m², donde las vegas y acuíferos se encuentran protegidas por la DGA (Fig. 6).

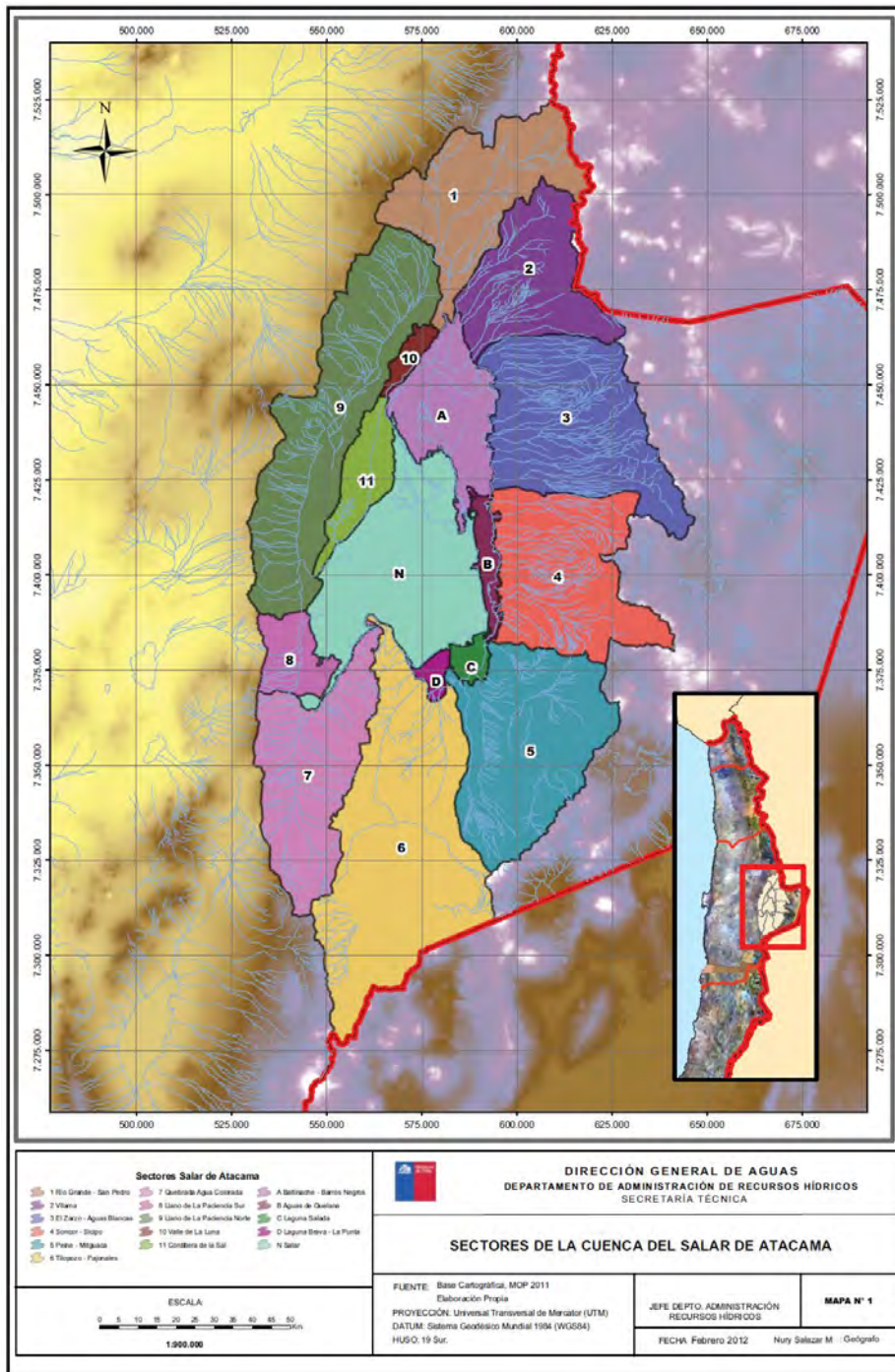


Figura 6. Sectores de la cuenca del Salar de Atacama, la zona de estudio se ubica en el sector A (DGA, 2012)

Normas de calidad de agua, derechos constituidos y otros instrumentos legales

El agua de las Lagunas Cejar y La Piedra posee excepcionales niveles salinos (se detallarán en Etapa 4), por lo que no es considerada para uso humano (agua potable) ni de riego, de acuerdo a la NCH

409/1.Of.84 y NCh 1333.Of78. No existen normas secundarias de calidad ambiental para el Salar de Atacama.

Según la información revisada, no existen derechos de aguas otorgados para las Lagunas Cejar y La Piedra, debido al carácter protegido que poseen por la Dirección General de Aguas. Sin embargo, en el sector Baltinache-Barros Negros, hay 28 derechos de agua otorgados desde el año 1984 (DGA 2012).

ii. ETAPA 2: Caracterización de flora y vegetación

En la cuenca del Salar de Atacama existen extensas zonas con carencia de vegetación, sin embargo, bordeando lagunas hipersalinas se encuentran especies como Cachiyuyo y Brea (*Atriplex atacamensis* y *Tessaria absinthioides*). En la zona norte donde se ubica el Salar de Atacama, se han podido identificar distintas especies vegetales, sin embargo, según el listado de Especies en Estado de Conservación (CONAMA, 2002; DS N° 29/2011, actualizado 2013; MMA, 2013), para la zona del Salar de Atacama se describen:

- 1) AIRAMPOA; *Airampoa ayrampo* (Preocupación Menor)
- 2) ALGARROBO DEL CENTRO; *Prosopis chilensis* (Vulnerable) Algarrobo del norte; *Prosopis alba* (Preocupación Menor)
- 3) CARDÓN; *Trichocereus atacamensis* (Casi Amenazada)
- 4) COJÍN DE SUEGRA; *Maihuenopsis atacamensis* (Casi Amenazada)
- 5) CULANTRILLO; *Cheilanthes pruinata* (Casi Amenazada)
- 6) CUMULOPUNTIA; *Cumulopuntia sphaerica* (Preocupación Menor)
- 7) DORADILLA; *Agryrochosma nivea* (Preocupación Menor)
- 8) LLARETA; *Azorella compacta* (Vulnerable)
- 9) LOBIVIA; *Lobivia Formosa* (Vulnerable)
- 10) TAMARUGO; *Prosopis tamarugo* (En Peligro)
- 11) TOMATE SILVESTRE; *Solanum sitiens* (Vulnerable – Rara)
- 12) TUNA, TUNILLA; *Maihueniopsis boliviana* (Preocupación Menor)
- 13) VIEJITO; *Oreocereus leuchotrichus* (Preocupación Menor)

El área de estudio presenta extensiones sin desarrollo de vegetación debido principalmente a las características hipersalinas de los suelos y los procesos continuos de cristalización y disolución. En el recorrido realizado se aprecia las especies ya señaladas de Cachiyuyo y Brea, así como *Sarcocornia fruticosa*, *Distichlis spicata* y *Lampaya sp*, sin embargo existen al menos tres especies más, pero la falta de flores y frutos hace difícil su determinación en el marco de este estudio (Catálogo fotográfico Anexo). La clasificación de las especies (Squeo et al., 2008) presentes se muestra a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Estado de conservación de especies observadas en Laguna Cejar y Laguna La Piedra

Especie	Familia	Forma de vida	Origen	Estado de conservación
<i>Atriplex atacamensis</i>	Amaranthaceae	Fanerófita	Nativa no endémica	Fuera de peligro?
<i>Tessaria absinthioides</i>	Asteraceae	Fanerófita	Nativa no endémica	Fuera de peligro
<i>Sarcocornia fruticosa</i>	Amaranthaceae	Hierba perenne	Nativa no endémica	Fuera de peligro
<i>Distichlis spicata</i>	Poaceae	Hierba perenne	Nativa no endémica	Fuera de peligro

iii. ETAPA 3: Caracterización de fauna

En este capítulo, se buscó describir el componente biológico de la fauna de vertebrados terrestres, asociado a los puntos de estudio en los sectores de lagunas Cejar y La Piedra I y II (REA, Sayre, 2000). Específicamente, se buscó: i) Caracterizar la fauna terrestre asociada a los sitios de estudio, a través de su composición y riqueza; ii) Identificar especies clasificadas en estado de conservación y endémicas; iii) Identificar y describir áreas de alto valor y/o sensibles para la fauna, como sitios de alimentación, refugio, reproducción, corredores o concentración de fauna o de especies relevantes; iv) Elaborar un listado taxonómico preliminar de especies de fauna característica de los sitios de estudio, a partir de los datos obtenidos en los puntos de muestreo y v) Proponer medidas o recomendaciones para un adecuado manejo biótico de aquellos puntos más relevantes en términos de la riqueza específica de vertebrados. Uno de los aspectos más destacables del hotspot chileno de biodiversidad es la condición de aislamiento de su biota. Las fronteras biológicas que representan la Cordillera de los Andes y el Desierto de Atacama le otorgan características singulares diferenciándolo de otras zonas vulnerables en el mundo. Por otra parte, el elevado número de géneros y familias endémicas en esta zona proporciona un grado de atención aún. A nivel nacional no existen indicadores que permitan realizar un diagnóstico del estado actual de los ecosistemas terrestres. Los más utilizados con este fin corresponden a extensión y estructura ecosistémica, variedad de hábitats, conectividad y fragmentación de ecosistemas, entre otros (BIP, 2011)

Especies detectadas en las lagunas Cejar y La Piedra y sus alrededores

En el estudio de fauna se visitaron los sistemas Cejar y La Piedra, distribuidos en tres lagunas denominadas (para este capítulo) Laguna La Piedra I, Laguna La Piedra II, y Laguna Cejar (Anexo).

Los datos obtenidos, indican la presencia de al menos **13 especies** de vertebrados registradas en la zona de estudio, destacándose la presencia de **2 Reptiles** (2,78%), **11 especies de Aves** (84,72%) y **2 Mamíferos** (12,5%) (Tabla 2). Las siguientes fotografías muestran algunas de estas especies presentes en el hábitat descrito.



Figura 9. La especie *Phoenicopterus chilensis* (Flamenco chileno), estado de conservación vulnerable (SAG 2015), casi amenazado (NT, IUCN 2015) y se incluye en el Apéndice II de Cites (CITES 2015).



Figura 10. La especie *Lophoneta specularioides* (Pato juarjua), no se encuentra en categorías de conservación.



Figura 11. La especie *Charadrius alticola* (Chorlo de la Puna) habita de preferencia en los humedales puneños, con lagunas dulces y salobres. Esta especie no presenta problemas de conservación.



Figura 12. La especie *Steganopus tricolor* (Pollito de mar tricolor), es frecuente de ser observada en los sectores de lagunas salobres y vegas. Esta especie no presenta problemas de conservación.



Figura 13. La especie migratorias Boreales *Calidris bairdii* (Playero de Baird), especie migratoria de largo recorrido que es frecuente de ser observar en los sectores de lagunas salobres y vegas. Esta especie no presenta problemas de conservación.



Figura 14. La especie *Chroicocephalus serranus* (Gaviota andina), especie considerada en estado de conservación vulnerable (SAG 2015) observada en gran parte de la zona de estudio.



Figura 15. La especie de Passeriformes frecuentes de observarse en humedales altoandinos fue *Lessonia oreas* (Colegial del norte).



Figura 16. Galerías pertenecientes a la especie *Ctenomys fulvus* (Tuco-tuco de Atacama), se la considera una especie vulnerable (SAG 2015).



Figura 17. Uno de los roedores característicos de sectores altoandinos es *Abrothrix andinus* (Ratoncito andino), se la considera una especie no definida en estado de conservación (SAG 2015).



Figura 18. Se observa uno de los reptiles descritos en el sector de la Piedra II *Liolaemus fabiani* (SAG 2015).



Figura 19. Se puede apreciar uno de los reptiles descritos en el sector de la Piedra II *Liolaemus constanzae* (SAG 2015).

Estados de conservación de las especies

Según los criterios de la legislación vigente en el Reglamento de Clasificación de Especies Silvestres, RCE (MMA 2015) en la zona de estudio se encontrarían especies con categoría: Vulnerable (VU); Casi amenazado (NT); Preocupación menor (LC). Las principales especies que se encontrarían en **problemas de conservación** según el DS 5/1998 del MINAGRI (SAG 2015) serían (Tabla 2):

- a) En Peligro (EN): Vulnerable (VU): *Phoenicopterus chilensis* (Flamenco chileno), *Phoenicoparrus andinus* (Flamenco andino o parina grande) y *Chroicocephalus serranus* (Gaviota andina).
- b) Rara (R): *Liolaemus constanzae*, *Liolaemus fabiani*
- c) Insuficientemente conocida (IC): *Liolaemus fabiani*

Ambos reptiles son considerados según SAG: S: Especie catalogada con densidades poblacionales reducidas; E: Especie catalogada como benéfica para la mantención del equilibrio de los ecosistemas.

Tabla 2. Estado de conservación de las especies de vertebrados descritas en Laguna Cejar y Laguna La Piedra.

CLASE Orden Familia Especie	Estado de conservación				Origen	Distribución en Chile
	MMA (2015)	SAG (2015)	IUCN (2015)	CITES (2015)		
CLASE REPTILIA						
ORDEN SQUAMATA						
Tropiduridae						
<i>Liolaemus constanzae</i> (Lagartija de Constanza)	LC	R	LC	ND	En	II
<i>Liolaemus fabiani</i> (Lagartija de Fabián)	IC	R	NE	ND	En	II
CLASE AVES						
ORDEN CICONIFORMES						
Phoenicopteridae						
<i>Phoenicopus chilensis</i> (Flamenco chileno)	ND	VU	NT	Ap-II	Na	I(XV) -XII
<i>Phoenicopus andinus</i> (Parina Grande)	ND	VU	VU	Ap-II	Na	I(XV) -III
ORDEN ANSERIFORMES						
Anatidae						
<i>Lophonetta specularioides</i> (Pato juarjual)	ND	ND	LC	ND	Na	I(XV) -XII
ORDEN CHARADRIIFORMES						
Charadriidae						
<i>Charadrius alticola</i> (Chorlo de la puna)	ND	ND	LC	ND	Na	I-RM
Recurvirostridae						
<i>Recurvirostra andina</i> (Caití)	ND	ND	LC	ND	Na	I(XV) -IV
Scolopacidae						
<i>Calidris bairdii</i> (Playero de Baird)	ND	ND	LC	ND	Na	I(XV) -XII
<i>Steganopus tricolor</i> (Pollito de mar tricolor)	ND	ND	LC	ND	Na	I(XV) -XII
Laridae						
<i>Chroicocephalus serranus</i> (Gaviota andina)	ND	VU	LC	ND	Na	I (XV) -XI
Tyrannidae						
<i>Lessonia oreas</i> (Colegial andino)	ND	ND	LC	ND	Na	I(XV) -IV
CLASE MAMMALIA						
ORDEN RODENTIA						
Muridae						
<i>Abrothrix andinus</i> (Ratón andino)	ND	ND	LC	ND	Na	I-IV
Ctenomyidae						
<i>Ctenomys fulvus</i> (Tucu-tuco de Atacama o Chululo)	ND	VU	LC	ND	Na	II-IV

Pertenencia y origen de las especies

Con respecto a la pertenencia de las especies, 2 se consideraron como **endémica** (*Liolaemus constanzae* y *Liolaemus fabiani*) (Cepeda 1993, Marín 2004, MMA 2015). El origen de la mayoría de las especies (10 especies) serían en su mayor parte local (**L**), encontrándose una especie considerada Migrante austral de origen Boreal (**Bo**: *Calidris bairdii* = Playero de Baird) (Marín 2004).

Identificación y espacialización de singularidad de sitios para las especies

La observación y descripción de vertebrados se realizó mediante un recorrido a pie de todo el perímetro de las lagunas, encontrándose las trece taxa descritas. Además, fue posible visualizar una abundante flora y comunidad de insectos. Las lagunas La Piedra I y II comparten un pequeño pasadizo (sitio LP03, según Etapa 4) que permite que algunas especies de aves del orden Charadriiformes desarrollen sus actividades en compañía de los humanos, sin embargo, los demás órdenes, Ciconiformes y Anseriformes carecen de esa cualidad, así como la familia Laridae, los cuales

son extremadamente sensibles, en su época de apareamiento, postura, o cría de polluelos. Es importante por tanto evitar que los turistas o personal ajeno a dichos lugares tengan acceso a lugares que potencialmente sirvan de anidamiento, alimentación o descanso de estas aves.

En las tres lagunas estudiadas fueron encontradas nueve especies de aves, una de ellas migratoria, lo que podría establecer la presencia de otras aves de estas características en diferentes épocas del año, sin datos a la fecha. Tanto el Pato juarjual (*Lophonetta specularioides*), Chorlito de la Puna (*Charadrius alticola*) y Caití (*Recurvirostra andina*) fueron visualizados con crías o al menos juveniles, lo que establece que es un sitio actual de reproducción, sin embargo, no asegura esta misma condición ya que no se tienen antecedentes anteriores reproductivos. Se avistó un nido de gaviota Andina (*Chroicocephalus serranus*) en laguna Cejar, lo que es un antecedente interesante, empero se sugiere que los censos deben ser temporales, eso permitirá establecer el flujo de avifauna en el sector, y de laguna forma su comportamiento.

Se determinaron dos especies de reptiles, *Liolaemus fabiani* y *Liolaemus constanzae*, ambos viven en simpatría en la Laguna La Piedra I, pero *L. fabiani* está reducido a un espacio de no más de mil metros cuadrados, en el extremo norte de la misma, solo registrado en ese lugar, situación sensible cuando el camino de acceso pasa por su lugar de reproducción y alimentación. Si se considera que su dieta la constituyen casi estrictamente dípteros asociados a la laguna, es fácil comprender que las perturbaciones en su recorrido guarida-agua pueden resultar desastrosas en el mediano plazo. También es el caso de *L. constanzae*, sin embargo este último fue encontrado en las riberas de las tres lagunas, en espacios no intervenidos actualmente, lo que efectivamente permite ser más auspicioso con su desarrollo. Ambas especies están protegidas por lo que se sugiere establecer miradores herpetológicos específicos para ambas especies, donde estudiantes, científicos y turistas puedan observarlas sin que perturben su conducta vital.

Los mamíferos lo constituyen dos especies *Ctenomys fulvus* y *Abrotix andinus*. Aparentemente, *Ctenomys fulvus* no tiene dificultades en su desarrollo, toda vez que sus conductas son preferentemente nocturnas y bajo tierra (fosorial), solo desarrolla una parte menor de su vida en la superficie. El ratón *Abrotix andinus* es un caso particular porque se distribuye en todos los cursos de agua, al tener conductas oportunistas se relaciona de forma muy amable con los humanos, sin embargo se sugiere la puesta de letreros en las tres lagunas para: i) evitar que sean alimentados, ii) romper las galerías de refugio y iii) impedir domesticar de alguna forma a estos animales con la inclusión de comida u otros elementos evidentemente dañinos para su desarrollo.

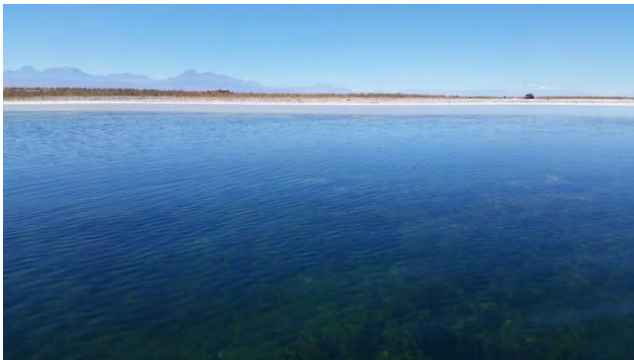
iv. ETAPA 4: Estudio limnológico y microbiológico

Análisis exploratorio de los cuerpos de agua

El área analizada consiste en un sistema compuesto por distintas lagunas que reciben los nombres de Laguna Cejar (LC) y Laguna La Piedra (LP) (Fig. 1). Ambos sistemas están rodeados de vegetación. Los bordes son blandos y es frecuente la presencia de tapetes microbianos, además de sedimentos reducidos. La Laguna Cejar consiste en una laguna central permanente (LC03), de profundidad 9,5 m, donde al momento de los muestreos se observaban zonas no cubiertas con agua (Fig. 4). La Laguna La Piedra, consiste en una laguna principal (LP04) hacia el norte de profundidad 8 m, donde en el fondo se observaron estructuras rocosas similares a arrecifes (Fig. 17). Esta laguna principal está unida por un segmento de 4 metros de ancho (LP03) con un sistema mayor compuesto por otras tres lagunas (LP01, LP02, LP05) las cuales tienen una profundidad variable de 9 m, 7,5 m y 9 m, respectivamente.

Los sistemas en estudio fueron visitados en dos oportunidades: 23-24 de Septiembre y 19-19 de Noviembre, correspondiente a primavera. Se tomaron muestras de 7 sitios distintos, 2 en la Laguna Cejar y 5 en la Laguna La Piedra de acuerdo a la Figura 1 (Tabla 3).

A)



B)

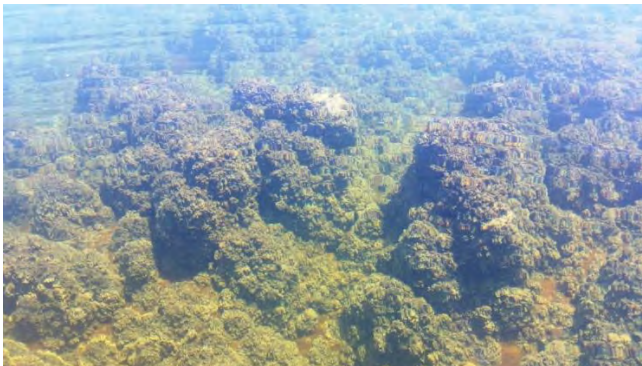


Figura 17. Fotografía Laguna La Piedra, indicando el sitio LP04 (A) la presencia de estructuras similares a arrecifes en el fondo (B).

Tabla 3. Sitios de muestreo y nomenclatura de muestras en muestreo 1 y muestreo 2 en Laguna Cejar y La Piedra.

Muestreo 1				
Sitios de muestreo	Fecha	Hora	Muestras	Tipo de muestras
Laguna Cejar				
LC01	24-09-2015	10:19	LC01A	Superficie
LC02	24-09-2015	11:40	LC02A	Superficie
Laguna La Piedra				
LP01	23-09-2015	12:23	LP01A	Superficie
			LP01B	Fondo (7,5 m)
LP02	23-09-2015	14:16	LP02A	Superficie
			LP02B	Fondo (5,5 m)
LP03	23-09-2015	14:50	LP03A	Superficie
LP04	23-09-2015	14:29	LP04A	Superficie
LP05	23-09-2015	16:17	LP05A	Superficie
			LP05B	Fondo (4 m)
Muestreo 2				
Laguna Cejar				
LC02	19-11-2015	9:19	LC02A	Superficie
LC03	19-11-2015	10:08	LC03A	Superficie
	19-11-2015		LC03B	Fondo (9,5 m)
Laguna La Piedra				
LP01	18-11-2015	12:43	LP01A	Superficie
	18-11-2015		LP01B	Fondo (9 m)
LP02	18-11-2015	10:21	LP02A	Superficie
	18-11-2015		LP02B	Fondo (7,5 m)
LP03	18-11-2015	12:00	LP03A	Superficie
LP04	18-11-2015	12:04	LP04A	Superficie
	18-11-2015		LP04B	Fondo (8 m)
LP05	18-11-2015	13:20	LP05A	Superficie
	18-11-2015		LP05B	Fondo (9 m)

1) Parámetros físicos y químicos

Presencia de termoclinas y diferencias en profundidad de pH y oxígeno disuelto

Las muestras analizadas poseen pH neutro el cual oscila entre 7,51 (LC01) y 8,5 (LP01) en los sitios de muestreo (Tabla 4). Se pudo además determinar la existencia de termoclina y quemoclina, es decir, diferencias en profundidad de temperatura, pH (Fig. 18) para tres sitios de Laguna La Piedra (LP01, LP02 y LP05) en el muestreo 1, encontrándose el aumento de temperatura a los 2 m de profundidad y consecuentemente un cambio abrupto de pH a la misma profundidad. La temperatura se incrementa rápidamente desde los 19°C en superficie a 40°C en profundidad en el sitio LP01 en los primeros 2 metros de profundidad. Lo mismo ocurre para los demás sitios estudiados y en el segundo muestreo (Fig. 19). En el caso del sitio LP05 (sitio de baño de turistas), a los 2 m la temperatura es de más de 45°C, lo cual podría deberse a afloramiento de aguas subterráneas más calientes, **posiblemente de origen termal**. El pH pasa de ser alcalino en superficie (pH 8) a neutro (pH 7,5) a los 2-3 metros de profundidad (muestreo 1, Tabla 4).

En el muestreo 2, se incluyó un perfil de profundidad de la Laguna Cejar (LC03), donde la termoclina se encuentra más superficial (1 m) que en la Laguna La Piedra (Fig. 19), probablemente por las diferencias de salinidad detectadas. A los 7 metros ocurre una reversión de la termoclina, disminuyendo la temperatura desde 40°C a menos de 30°C. En Laguna La Piedra, en general la termoclina se mantiene entre 2-3 metros, a excepción del sitio LP04 donde no existe. Se pudo realizar un perfil vertical del porcentaje de saturación de oxígeno en la columna de agua, reportándose una alta concentración de oxígeno entre los 3-7 metros de profundidad en LP01, LP02 y LP05. Los otros sitios estudiados exhiben concentraciones estables de oxígeno en perfil vertical (Fig. 20).

Tabla 4. Valores físicos y químicos medidos *in situ* durante el muestreo 1 y 2 en Laguna Cejar y Laguna la Piedra, Salar de Atacama.

Muestra	pH	Potencial Redox (mV)	Sólidos Totales Disueltos (ppm)	Conductividad (mS/cm)	Salinidad (PSU)	Turbidez (FNU)	Temperatura (°C)	Presión (mBar)
Muestreo 1 - Septiembre 2015								
LC01-A	8,03	137,6	ND	79,54	55,47	6,4	14,69	768,3
LC01-B	7,51	252,5	ND	200*	70*	5,7	35,84	771,1
LC02-A	8,02	232,2	ND	80,74	56,31	24	13,01	771,5
LP01-A	8,5	253,3	ND	154,3	70*	5,4	18,75	771,5
LP01-B	7,39	206,2	185,5	200*	70*	7,3	32,66	766,2
LP02-A	8,64	178,1	85,2	155,3	70*	2,5	18,04	766,6
LP02-B	7,37	98,7	195	200*	70*	5,7	40,87	766,4
LP03-A	7,94	237,4	ND	155,8	70*	13	16,67	767
LP04-A	7,58	233,8	ND	ND	ND	12	17,83	767,3
LP05-A	7,57	189,9	ND	200*	70*	6	39,15	767,1
LP05-B	7,43	131,6	301,1	200*	70*	54,6	44,67	766,8
Muestreo 2 - Noviembre 2015								
LC02-A	ND	ND	51,08	102,1	ND	2,6	10,33	771
LC03-A	ND	ND	85,71	102	70*	1,9	16,96	ND
LC03-B	ND	ND	ND	171,9	ND	ND	28,27	ND
LP01-A	ND	ND	ND	158	70*	4,4	19,41	769,4
LP01-B	ND	ND	ND	189	ND	ND	32,79	
LP02-A	ND	ND	ND	148,3	ND	8	18,24	770,6
LP02-B	ND	ND	ND	166,4	ND	ND	34,8	ND
LP03	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
LP04-A	ND	ND	65,14	99,1	70*	1,9	18,39	770,4
LP04-B	ND	ND	ND	120,4	ND	ND	17,56	ND
LP05-A	ND	ND	89,37	153,3	70*	2,4	18,04	772,2
LP05-B	ND	ND	ND	178,2	ND	ND	32,7	ND

*límite de detección del equipo multiparámetro

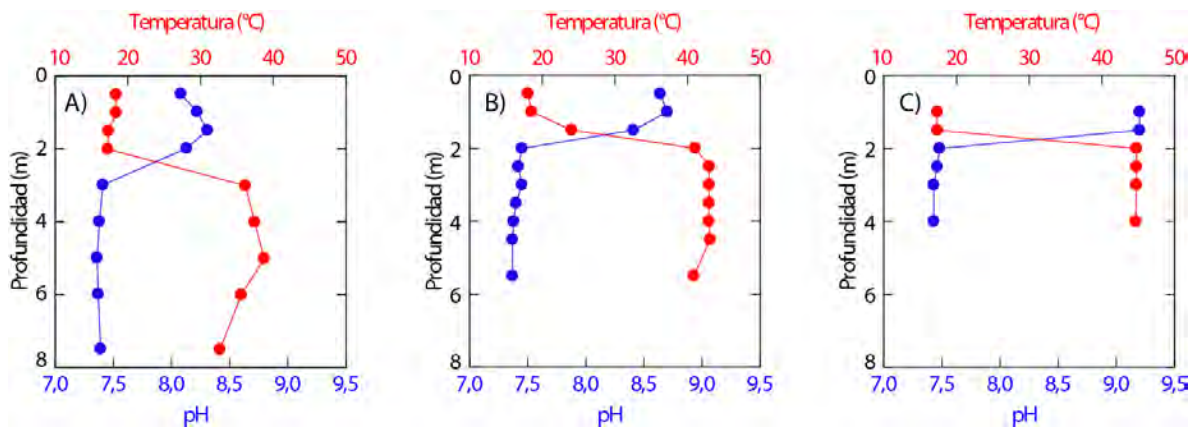


Figura 18. Temperatura y pH en perfil vertical en A) LP01; B) LP02 y C) LP05, muestreo 1

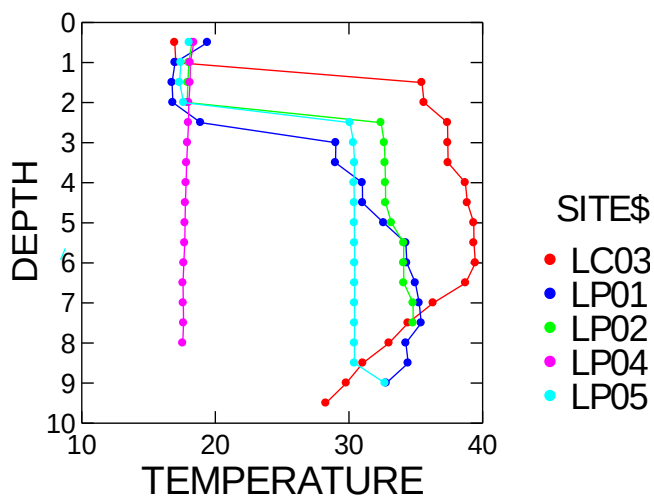


Figura 19. Temperatura en perfil vertical en LC03 (Laguna Cejar) y LP01, LP02, LP04, LP05 (Laguna La Piedra), muestreo 2

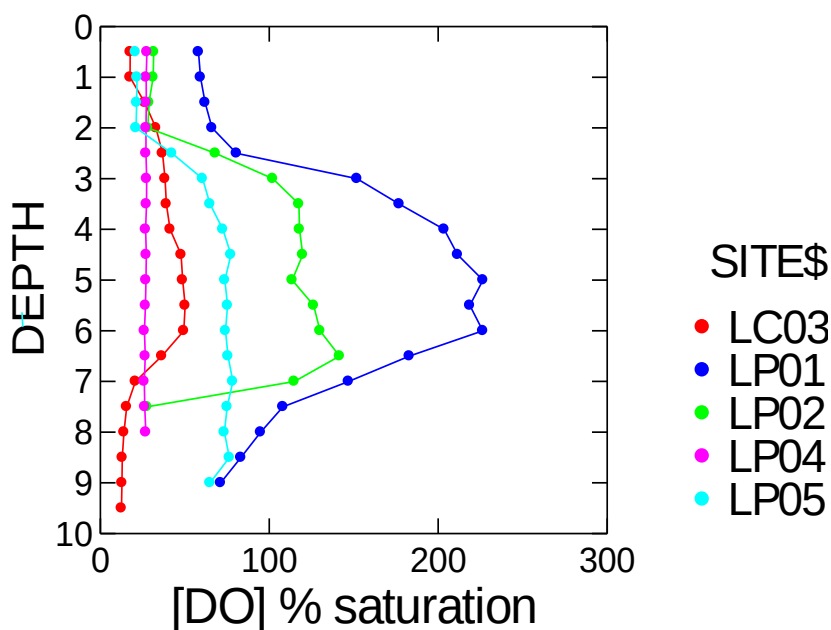


Figura 20. Porcentaje de saturación de oxígeno en perfil vertical en LC03 (Laguna Cejar) y LP01, LP02, LP04, LP05 (Laguna La Piedra), muestreo 2

Salinidad y equilibrios salinos

En ambas lagunas el agua es transparente. La alta salinidad es la característica fundamental de este sistema, describiendo estas lagunas como **hipersalinas**. Las mediciones *in situ* mostraron que en varios sitios la conductividad eléctrica alcanzó sobre los 200 mS/cm y en términos de salinidad, esta superó las 70 PSU (Tabla 4). Existen marcadas diferencias de salinidad entre la superficie y el fondo de las lagunas estudiadas, detectándose la presencia de una haloclina (Fig. 21; Fig. 22). Para el caso de la conductividad eléctrica, se detectó una haloclina a los 2 m, donde la conductividad aumenta desde 150 mS/cm hasta sobre 200 mS/cm (fuera de rango de detección del equipo utilizado) (Fig. 21). En general, la salinidad es mayor en el fondo de las lagunas. Del mismo modo con la termoclina reportada para Laguna Cejar, la haloclina se presentó a menos de los 2 metros de profundidad (Fig. 7). En el caso de las lagunas de La Piedra, se observó una haloclina pronunciada en LP04, LP01 y en LP05, no así en LP02. Las mediciones alcanzaron los 200 mS/cm, debido a la sensibilidad de la celda utilizada.

Las concentraciones de iones y cationes mostraron un marcado enriquecimiento en iones cloruro y sodio (Figura 23), lo cual se manifiesta en el diagrama de Maucha (Fig. 24), donde se establece que la salinidad del sistema se debe mayormente a cloruro de sodio, alcanzando al 90% de los iones y cationes totales (Tabla 5, Fig. 24).

La suma de los iones y cationes presentes en los distintos sitios, mostró que hay una salinidad total de hasta 273 g/L en la muestra LP01-B de Laguna La Piedra y de 227,6 g/L en la muestra LC03-B en Laguna Cejar, lo cual equivale al 92,5 y 89,8% de NaCl respectivamente (Tabla 5). Estos valores sitúan a estas lagunas dentro de **los lagos más salados descritos en el mundo** (Tabla 6). A diferencia de

otros sistemas que se han descrito con esta categoría, como el Lago Don Juan en Antártica, la dominancia de iones y cationes es diferente a la de las lagunas en estudio (Tabla 6).

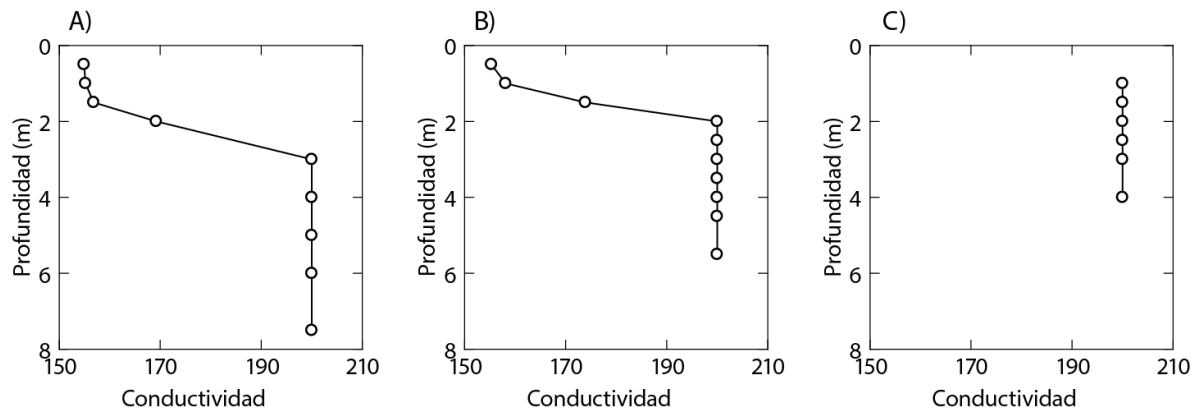


Figura 21. Conductividad (mS/cm) en perfil vertical A) LP01; B) LP02 y C) LP05, muestreo 1

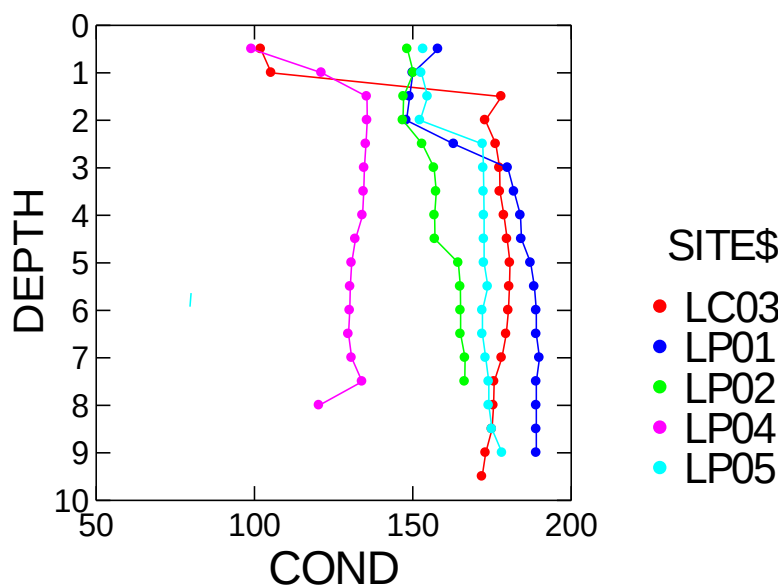


Figura 22. Conductividad en perfil vertical en sitio LC03 (Laguna Cejar) y LP01, LP02, LP04, LP05 (Laguna La Piedra), muestreo 2

Tabla 5. Valores de salinidad total y concentración de NaCl en las distintas muestras de agua analizadas de las Laguna Cejar y La Piedra.

Muestra	Muestreo 1			Muestreo 2		
	Salinidad total (mg/L)	NaCl (mg/L)	Porcentaje de NaCl en salinidad total (%)	Salinidad total (mg/L)	NaCl (mg/L)	Porcentaje de NaCl en salinidad total (%)
LP01-A	129912,8	114123,0	87,8	163297,9	144147,6	88,3
LP01-B	206965,8	188096,8	90,9	273005,7	252395,8	92,5
LP02-A	135259,4	119333,1	88,2	176369,7	156747,7	88,9
LP02-B	213241,6	194346,7	91,1	208435,2	186597,1	89,5
LP03-A	132544,1	117928,1	89,0	135811,2	119188,6	87,8
LP04-A	101731,5	87718,7	86,2	151112,8	133162,9	88,1
LP04-B	ND	ND	ND	140995,9	123907,8	87,9
LP05-A	170963,9	156442,0	91,5	183347,1	161747,4	88,2
LP05-B	227290,1	208146,6	91,6	217337,5	194247,5	89,4
LC01-A	70511,1	61608,9	87,4	ND	ND	ND
LC02-A	63313,4	57218,9	90,4	107579,4	95808,9	89,1
LC03-A	ND	ND	ND	125741,1	114037,9	90,7
LC03-B	ND	ND	ND	227616,8	204496,4	89,8

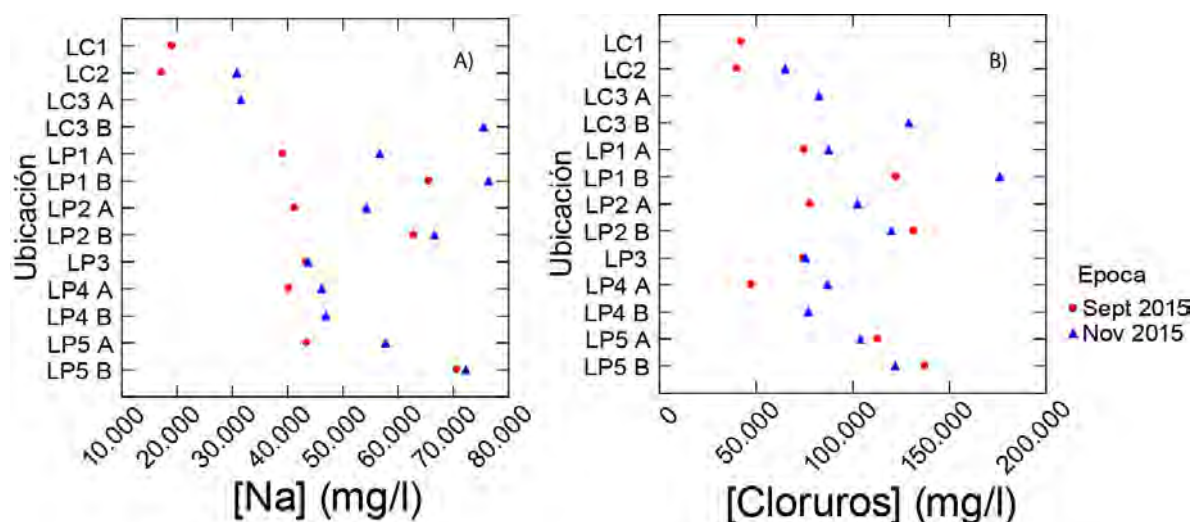


Figura 23. Concentración de iones sodio y cloruros en muestras de agua de Laguna Cejar y La Piedra en dos muestreos (Septiembre y Noviembre 2015).

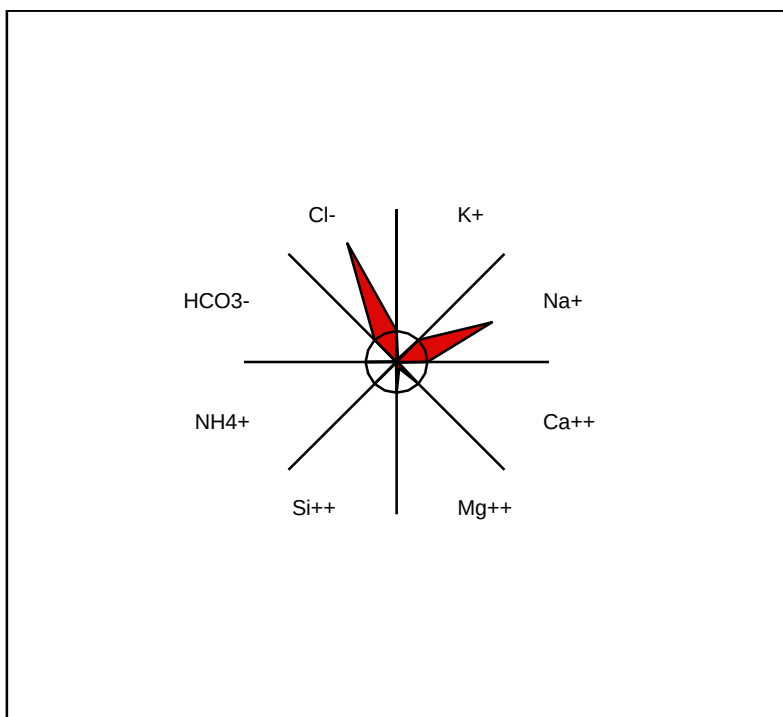


Figura 24. Diagrama de Maucha de los principales iones y cationes en muestras de agua de Laguna Cejar y La Piedra en dos muestreos (Septiembre y Noviembre 2015).

Tabla 6. Valores de salinidad total (%) en distintos lagos salinos del mundo.

Salinidad total (%)	Lago	Sal mayoritaria	Ubicación
44%	Lago Don Juan	CaCl ₂	Antártica
35%	Lago Vanda	CaCl ₂	Antártica
34.8%	Lago Assal	NaCl	Djibouti
33.7%	Mar Muerto	MgCl ₂	Israel, Jordan
8.5–28%	Lake Urmia	NaCl	Irán
5–27%	Great Salt Lake	NaCl	Estados Unidos
27%	Laguna La Piedra	NaCl	Chile
23%	Laguna Cejar	NaCl	Chile
18%	Lago Little Manitou	NaCl	Canadá
5–9.9%	Lago Mono	NaCO ₃	Estados Unidos
4.4%	Mar de Salton	NaCl	Estados Unidos
3.6-4.1%	Mar Rojo	MgCl ₂	Arabia Saudita

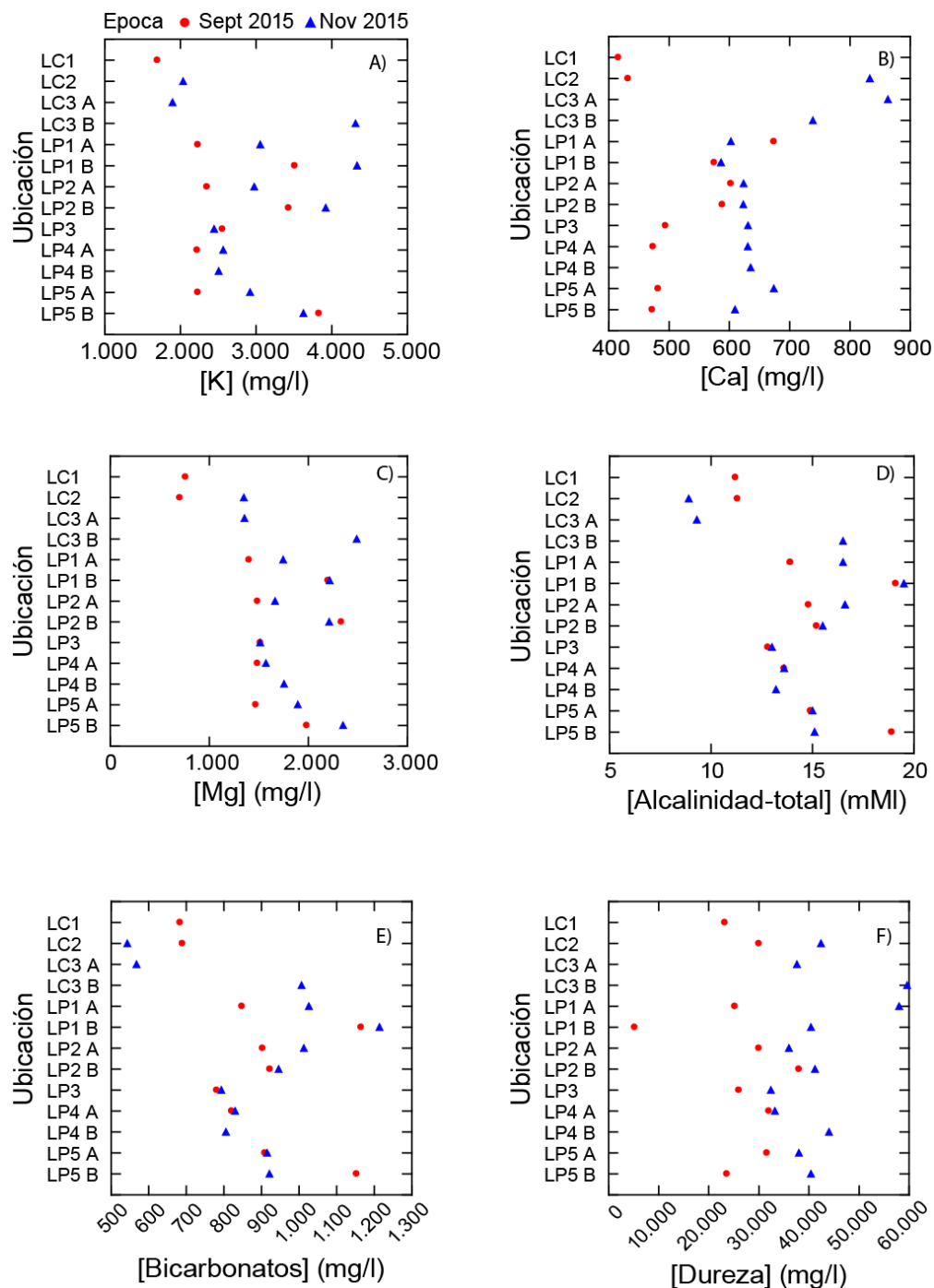


Figura 25. Variación espacial y temporal de las concentraciones de cationes (Potasio, Calcio, Magnesio) y de aniones (Bicarbonatos), además de alcalinidad total y dureza en los distintos sitios de estudio de las lagunas Cejar y La Piedra.

Los valores de otros cationes y aniones estuvieron reducidos respecto a la predominancia de sodio y cloruro, sin embargo, de igual forma contribuyen a la alta salinidad detectada (Fig. 25).

Concentraciones de Litio, Boro y Arsénico

Es probable que las aguas que alimentan las lagunas, sean de origen termal, no solo por la alta temperatura reportada (45°C en sitio LP02) si no que por las altas concentraciones detectadas de Litio, Boro y Arsénico, componentes típicos de estas aguas. Para el caso del Litio, se observan diferencias importantes entre las aguas superficiales (A) y profundas (B), existiendo mayores valores en aguas profundas para todos los sitios. Se detectó una concentración máxima de 174 mg/L en el sitio LP01-B, y las más bajas (40 mg/l) en sitios de orilla de Laguna Cejar (Fig. 26).

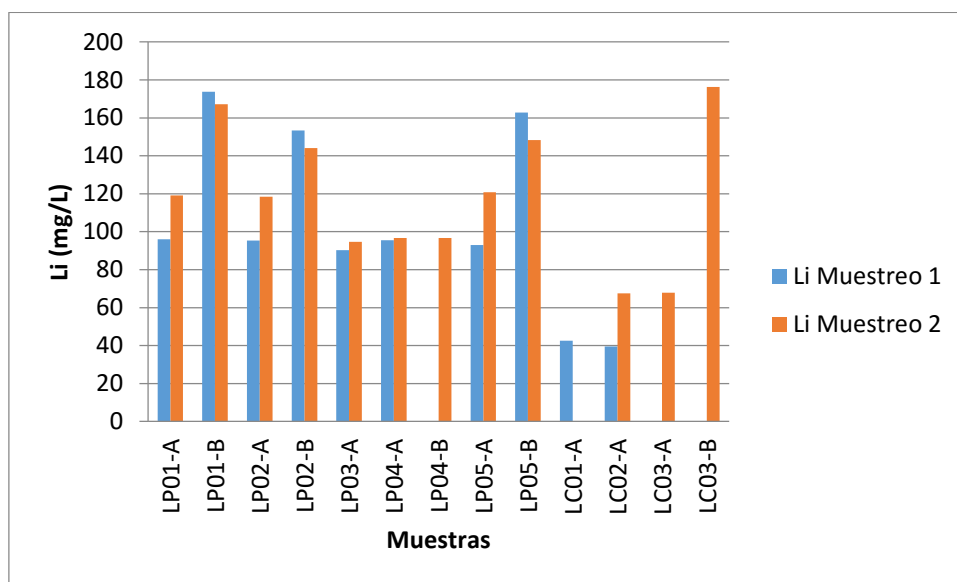


Figura 26. Concentración de Litio (mg/L) en aguas superficiales (A) y profundas (B) de distintos sitios de muestreo de Laguna La Piedra (LP) y laguna Cejar (LC) para el muestreo 1 (columnas azules) y muestreo 2 (columnas rojas).

Para el caso del Boro, se observa la misma tendencia, donde este elemento está más concentrado en el fondo que en superficie, en ambos muestreos. Las mayores concentraciones fueron encontradas en la Laguna La Piedra, donde en el sitio LP01-B alcanzan 756 mg/L (Fig. 27). Finalmente, en el caso del Arsénico se observa similar tendencia de enriquecimiento en aguas profundas (Fig. 28), los valores medidos de Arsénico fluctuaron entre 4-20 mg/L (para el caso de mediciones realizadas con SM3114C) y de entre 5 a 6 mg/L (para el caso de mediciones realizadas con SM3120B), según dos técnicas distintas aplicadas. Es importante señalar que dicha variación se debería justamente a la gran cantidad de sales en solución que provocaría interferencia en los análisis.

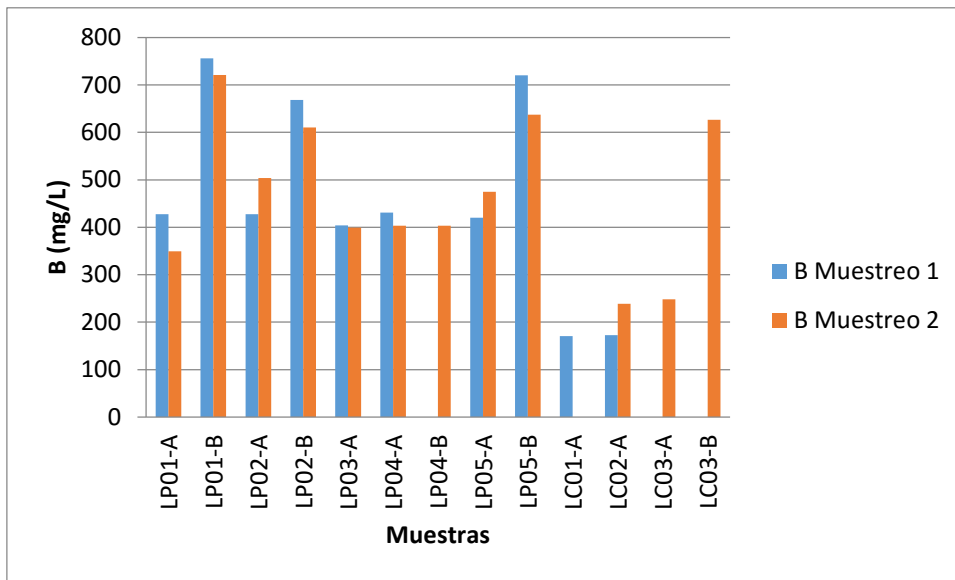


Figura 27. Concentración de Boro (mg/L) en aguas superficiales (A) y profundas (B) de distintos sitios de muestreo de Laguna La Piedra (LP) y laguna Cejar (LC) para el muestreo 1 (columnas azules) y muestreo 2 (columnas rojas).

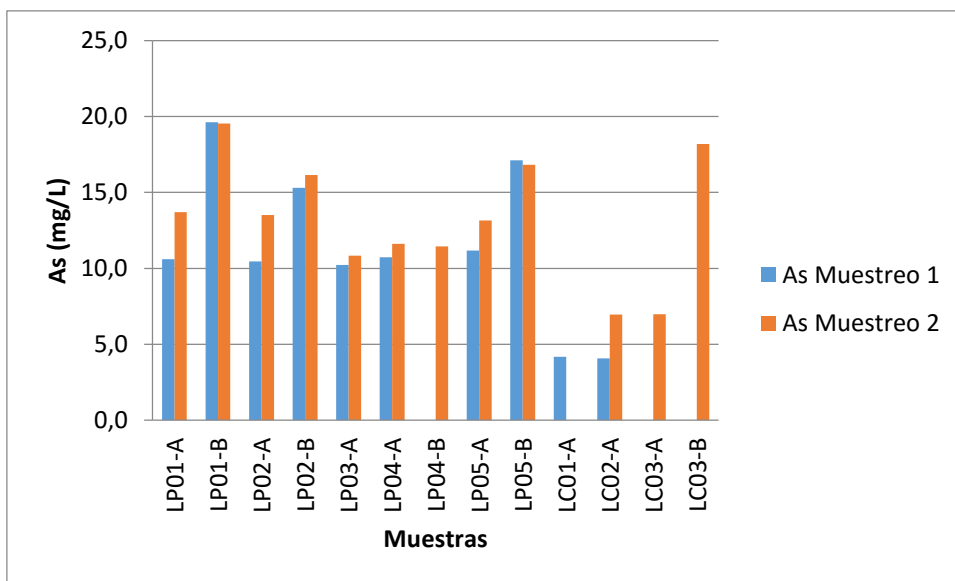


Figura 28. Concentración de Arsénico (mg/L) en aguas superficiales (A) y profundas (B) de distintos sitios de muestreo de Laguna La Piedra (LP) y laguna Cejar (LC) para el muestreo 1 (columnas azules) y muestreo 2 (columnas rojas), según SM3114C.

Concentración de nutrientes

En general las concentraciones de fósforo y nitrógeno total son altas en las aguas de las lagunas Cejar y La Piedra, esto se observa también en otros salares de la zona (Dorador et al., 2013). En el sitio LP05, donde ocurre el baño de turistas, las concentraciones de fósforo y nitrógeno total alcanzan 7000 y 13506 $\mu\text{g/L}$ respectivamente, pudiéndose definir como un sistema químicamente eutrófico (Fig. 29). Es decir, existe disponibilidad de nutrientes (amonio, nitrito, fosfatos) para el desarrollo de las comunidades biológicas, sin embargo, las condiciones físico-químicas extremas evitan que exista una eutroficación. Las concentraciones de sílice detectadas coinciden con la abundancia y diversidad de diatomeas que generalmente se encuentra presente en aguas de salares.

En general no se detectaron mayores diferencias en el contenido de nutrientes entre ambos muestreos, sin embargo, se detectó un enriquecimiento en nitrógeno total en el muestreo de noviembre de 2015 (Fig. 29). Es decir, existen procesos dinámicos y los ciclos biogeoquímicos debiesen ser estudiados con mayor atención bajo estas condiciones límites para el funcionamiento enzimático y de los organismos.

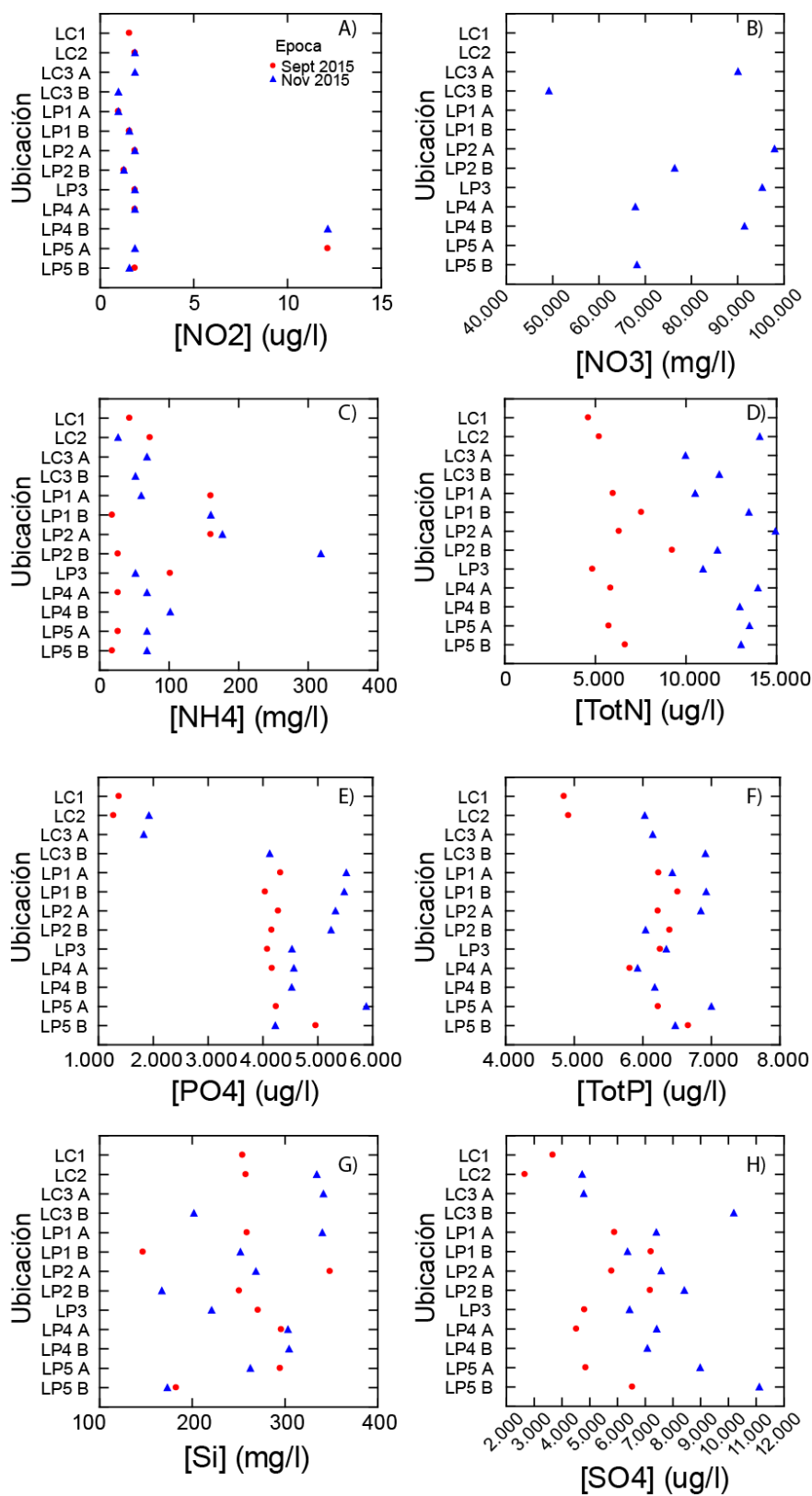


Figura 29. Concentración de Nitrógeno total, fósforo total, sílice, sulfatos y especies de nitrógeno (amonio, nitrito, nitrato) en distintas muestras del cuerpo de agua de Laguna Cejar y La Piedra.

Materia orgánica, coliformes fecales y totales

Se realizaron además análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO) y de carbono orgánico total (Tabla 7). Para el caso de DBO5, se reportan resultados variables entre los sitios, encontrándose valores más altos en muestras de profundidad que en superficie. Este parámetro es usado comúnmente en el estudio de contaminación orgánica en aguas residuales y en cuerpos de aguas continentales, donde se mide la utilización u oxidación de oxígeno de parte de microorganismos, en este caso, los valores obtenidos (sobre 4887,5 mg/L) son valores excesivamente altos comparado incluso con aguas residuales, esto se debería principalmente a la alta salinidad de las aguas lo cual afecta los resultados.

De todas maneras, se reportan altas concentraciones de carbono orgánico total, las cuales fluctúan entre 1420-6220 mg/L, lo cual es indicativo de una alta tasa de materia orgánica. A simple vista, en la laguna se observa una gran acumulación de *Artemia*, la cual junto con la acumulación de otros componentes orgánicos (tapetes microbianos, vegetación de orilla, presencia de aves), contribuirían a estos niveles reportados. Los tapetes microbianos en orilla, se detectan fácilmente al tomar una muestra superficial del fondo de las lagunas o donde haya agua. En general los mayores valores tanto de DBO5, DQO y carbono orgánico total se encuentran en el sitio LP01, tanto en superficie (LP01-A) como en profundidad (LP01-B). No se detectaron niveles medibles de coliformes fecales o totales (Anexo).

Tabla 7. Concentraciones de DBO5, DQO y carbono orgánico total en muestras de Laguna La Piedra (LP) y Laguna Cejar (LC).

Nombre muestra	pH	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	Carbono orgánico total (mg/L)
LP01-A	7,92	3013,8	14480	4190
LP01-B	7,62	5904,4	20647,5	5990
LP02-A	7,91	1358	9052,5	2630
LP02-B	7,66	2430	15852,5	4600
LP03-A	7,98	587,5	7190	2080
LP04-A	7,97	676,3	6805	1970
LP04-B	7,97	851,3	7300	2115
LP05-A	7,1	3245	21442,5	6220
LP05-B	7,73	1263,8	14097,5	4100
LC02-A	8,13	790	4887,5	1420
LC03-A	8,13	462,5	5105	1485
LC03-B	7,67	2338,8	18592,2	5395

Concentración de grasas y aceites

De acuerdo a los análisis realizados, no se encontraron niveles de hidrocarburos detectables. Los valores fueron menores a 2 mg/L para aceites y grasas, lo cual está en el límite de detección de la técnica para todas las muestras analizadas. Además se analizaron aceites y grasas emulsificadas, aceites y grasas flotantes, aceites y grasas solubles, así como hidrocarburos fijos y volátiles, no obteniéndose valores sobre el rango de detección (Anexo).

Comunidades biológicas

1) Microorganismos

Las características físicas y químicas de las lagunas Cejar y La Piedra, hacen que se describan a los microorganismos que habitan en ella como **extremófilos**, ya que para vivir en dichas condiciones, deben tener adaptaciones específicas con respecto a la tolerancia a la alta salinidad, alta radiación solar, aridez, entre otras. Se realizaron análisis moleculares para describir las comunidades presentes en distintas muestras (Tabla 3), detectándose la presencia de 26 phyla de Bacteria (Fig. 30) y 2 phyla de Archaea (Fig. 31). El sistema en general es dominado por miembros del dominio Bacteria, principalmente por los phyla Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinomycetes, Firmicutes, Cyanobacteria y Spirochaetes. Se detectaron importantes diferencias en cuanto a la riqueza presente en las muestras de superficie y fondo, sobre todo en las muestras de Laguna La Piedra, donde la tendencia es que en muestras de superficie, domine Proteobacteria con abundancias relativas que alcanzan el 77% (LP3A) y 69% (LP4A) de todas las bacterias presentes. En contraste con las muestras de fondo, donde en el caso de LP2A, Proteobacteria decrece a 31%. Existen 8 phyla que solo están descritas en términos de secuencia, es decir, no existe a la fecha cultivos que puedan dar cuenta de la función y metabolismos asociados de estos grupos. Es interesante notar que toda esta diversidad microbiana está adaptada a estas condiciones de alta salinidad, por lo que el potencial de estudio sobre temáticas como origen de la vida, astrobiología, ecología microbiana y biotecnología es altísimo.

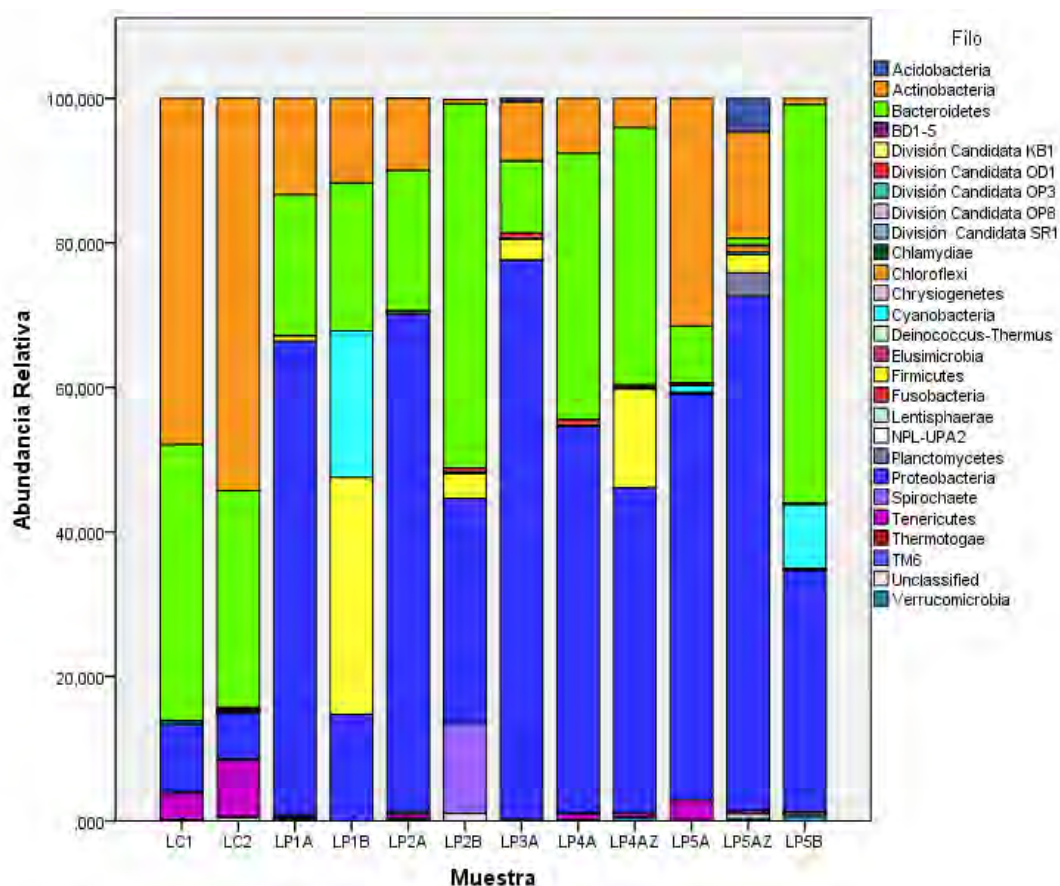


Figura 30. Abundancia relativa de phyla del dominio Bacteria en distintas muestras de agua de la Laguna Cejar y La Piedra obtenidas por secuenciación masiva de ADN.

En cuanto a Archaea, se describe la presencia de Euryarchaeota y en solo una muestra miembros del dominio Thaumarchaeota (Fig. 31). En el caso de Euryarchaeota, los miembros detectados pertenecen a la clase Halobacteriales, donde se pudieron describir 13 géneros diferentes, siendo los géneros *Halorhabdus*, *Halorubrum* y *Halobellus* los más frecuentes (Tabla 8). Sin embargo, la mayoría de los grupos presentes no se pudieron clasificar de acuerdo a la comparación de secuencias de ADN con las bases de datos existentes, por lo que las Lagunas Cejar y La Piedra serían reservorios de **nuevas especies y probablemente familias de Archaea**, no descritas previamente.

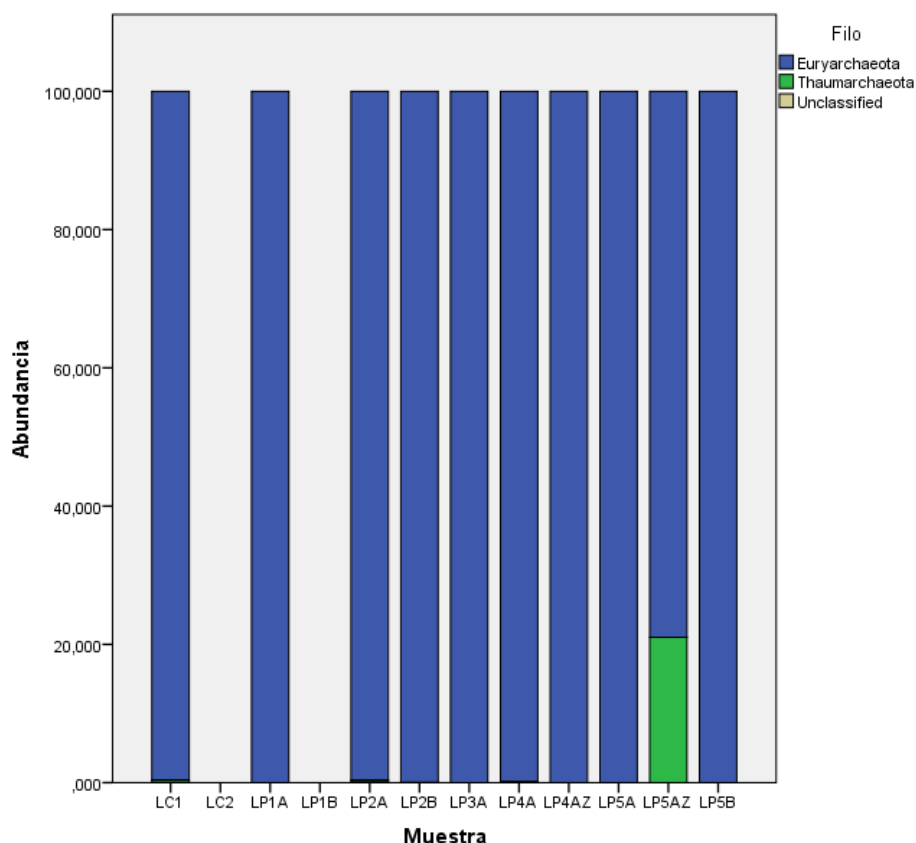


Figura 30. Abundancia relativa de phyla del dominio Archaea en distintas muestras de agua de la Laguna Cejar y La Piedra obtenidas por secuenciación masiva de ADN.

Tabla 8. Listado de géneros clasificados de acuerdo a la similitud de secuencias de ADN con base de datos SILVA, en distintas muestras de Laguna Cejar y Laguna La Piedra.

Género	LC1	LP1A	LP2A	LP2B	LP3A	LP4A	LP4AZ	LP5A	LP5AZ	LP5B
<i>Haloarchaeobius</i>	0,721	0	0	0	0	0	0	0	0	0,006
<i>Halorhabdus</i>	2,132	0,075	0,092	0,541	0	0,093	0	1,042	0	1,6
<i>Halorubrum</i>	1,082	0,352	0,154	0,741	0	0,171	0	0,231	0	0,529
<i>Natronomonas</i>	0,541	0,025	0,216	0	0	0	0	0,231	0	0,347
<i>Halobellus</i>	0	0,075	0,123	0	0	0,295	0	0,695	0	0,781
<i>Halobaculum</i>	0	0	0,092	0	0	0	0	0	0	0,013
<i>Halonotius</i>	0	0	0,061	0	0	0	0	0	0	
<i>Haloplanus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,115	0	0,013
<i>Halococcus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002
<i>Halolamina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,006
<i>Halomicrobium</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002
<i>Halorubellus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004
<i>Halovenus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,008
No clasificado	95,52	99,47	99,26	98,72	100	99,44	100	97,68	100	96,68

2) Fitoplancton

Se pudo detectar la presencia de 6 phyla distintos de Fitoplancton: Bacillariophyta, Cyanobacteria, Charophyta, Chlorophyta, Cryptophyta y Euglenophyta. El phylum que exhibe la mayor cantidad de especies es Bacillariophyta, con 16 géneros distintos (Tabla 9). Los géneros predominantes pertenecen a Bacillariophyta, entre ellos: *Denticula*, *Navicula*, *Amphora*, *Nitzschia* y *Entomoneis* y a la Cyanobacteria *Phormidium*. En términos de abundancia relativa, Bacillariophyta alcanza más del 90% de la comunidad fitoplanctónica en casi todas las muestras (Fig. 32, Fig. 33).

Tabla 9. Listado de taxa de comunidades fitoplanctónicas presentes en distintas muestras de Laguna Cejar y Laguna La Piedra.

Phylum	Clase	Orden	Familia	Taxa
Bacillariophyta	Mediophyceae	Stephanodiscales	Stephanodiscaceae	Cyclotella
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Mastogloiales	Achnanthaceae	Achnanthes
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	Nitzschia
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	Denticula
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Cymbellales	Cymbellaceae	Cymbella
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Cymbellales	Gomphonemataceae	Gomphonema
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Naviculales	Naviculaceae	Navicula
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Naviculales	Stauroneidaceae	Craticula
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Naviculales	Neidiaceae	Scoliopleura
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Surirellales	Surirellaceae	Surirella
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Surirellales	Entomoneidaceae	aff Entomoneis
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Mastogloiales	Achnanthaceae	Haloroundia
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Thalassiophysales	Catenulaceae	Amphora
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Cocconeidales	Cocconeidaceae	Cocconeis
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Rhopalodiales	Rhopalodiaceae	Rhopalodia
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	-	-	Pennada
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Pseudanabaenaceae	Pseudanabaena
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	Phormidium filamento
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Nostocales	-	Nostocales indet
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Chroococcales	Chroococcaceae	aff Synechocystis
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Microcoleaceae	Arthrospira
Charophyta	Conjugatophyceae (Zygnematophyceae)	Desmidiales	Closteriaceae	aff closterium
Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Dunaliellaceae	Dunaliella
Cryptophyta	Cryptophyceae	Cryptomonadales	Cryptomonadaceae	Cryptomonas
Euglenophyta	Euglenophyceae	Euglenales	Phacaceae	Lepocinclis

El mayor número de individuos se detectó en Laguna Cejar, alcanzando un valor de 59,7 y 67, 5 individuos/ml en las muestras LC1 y LC2 en el primer muestreo (Septiembre de 2015). Los valores de números de individuos fluctuaron entre 3,6 (muestras LP1B, LP2B) y 28 (muestra LP3A). En general se observa que la mayor abundancia de fitoplancton ocurre en las muestras superficiales que en el fondo (Tabla 9, Fig. 32). En el caso del segundo muestreo, se observa una tendencia similar, donde el mayor número de individuos/ml se encuentra en el sitio LC2 de la Laguna Cejar (Fig. 33).

El sitio LP2B de Laguna La Piedra, presenta el mayor número de individuos/ml en dicha laguna, alcanzando los 44,4, los cuales pertenece en su mayoría a la Cyanobacteria *Phormidium*.

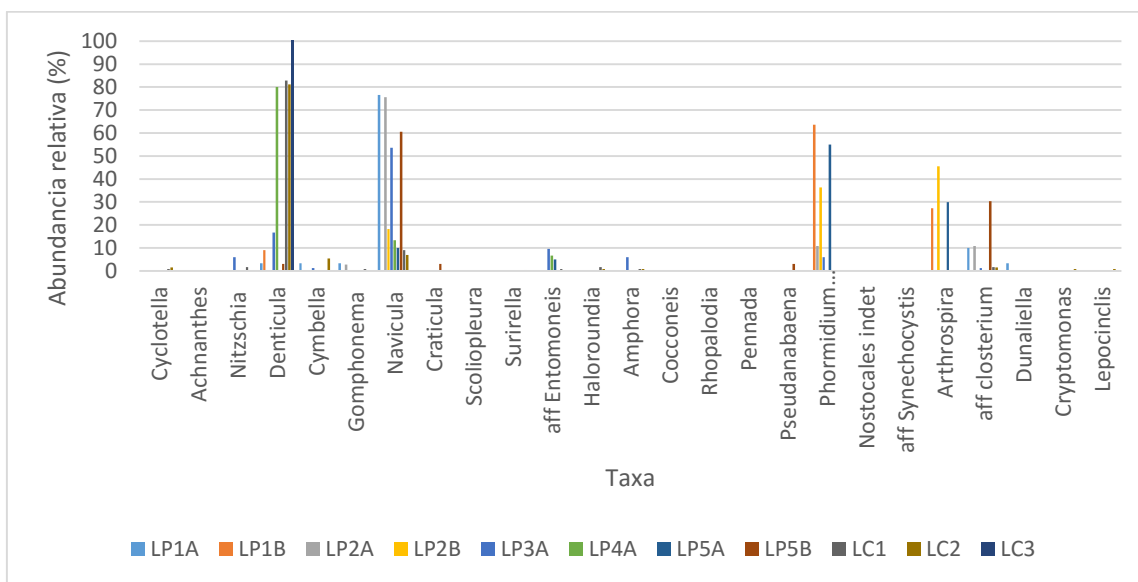


Figura 32. Abundancia relativa de comunidades fitoplanctónicas en distintas muestras de Laguna Cejar (LC) y laguna La Piedra (LP) en Septiembre 2015.

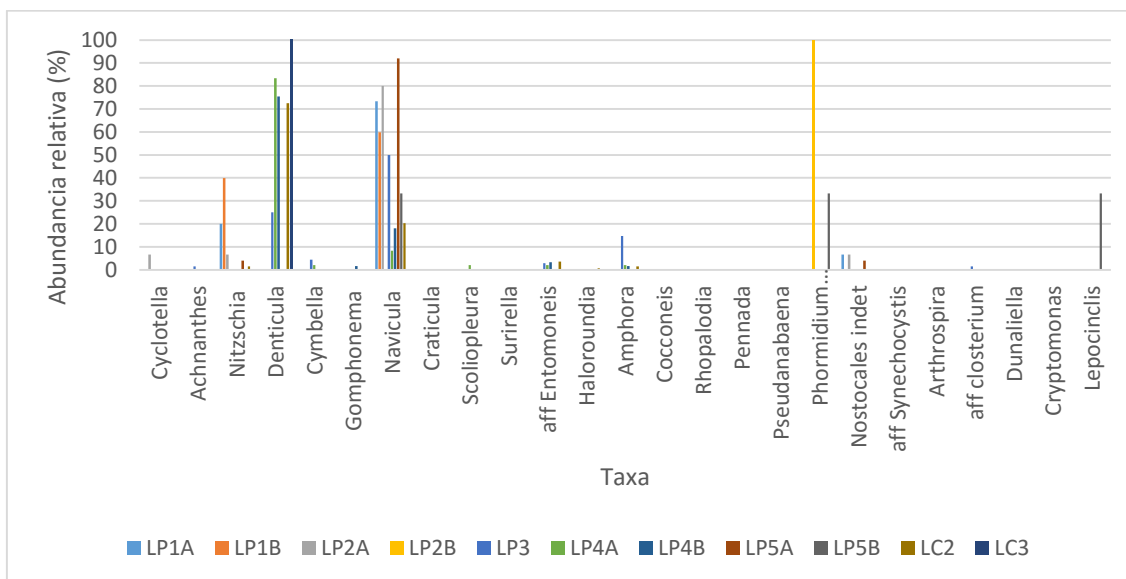


Figura 33. Abundancia relativa de comunidades fitoplanctónicas en distintas muestras de Laguna Cejar (LC) y laguna La Piedra (LP) en Noviembre 2015.

3) Zooplancton

Uno de los aspectos más llamativos de la biodiversidad acuática de la Laguna La Piedra y de la Laguna Cejar, es gran cantidad de microcrustáceos que se observan en la columna de agua. Este aspecto ha sido ya descrito por Zúñiga et al. (1994). En los dos muestreos realizados, se describieron miembros de la subclase Copepoda y Branchiopoda, específicamente, las especies *Attheyella* sp. y *Artemia franciscana*, tanto adulto como juvenil (Tabla 10). Las muestras integradas se refieren a la captura con red de zooplancton de especies zooplanctónicas desde el fondo a la superficie. Con este método se describe que en los sitios de Laguna La Piedra hay mayor abundancia de individuos juveniles que adultos de *Artemia franciscana*, lo cual se puede interpretar como un buen estado de la especie en este ecosistema.

Tabla 10. Listado de taxa de comunidades zooplanctónicas presentes en distintas muestras de Laguna Cejar y Laguna La Piedra.

Muestra	Abundancia (Individuos/L)	Especie		
		<i>Attheyella</i> sp.	<i>Artemia franciscana</i> (Adulto)	<i>Artemia franciscana</i> (Juvenil)
LP1 Integrada	Promedio	0,00	14,57	25,68
	Desviación estándar	0,00	1,83	5,12
LP2 Integrada	Promedio	0,00	10,00	27,82
	Desviación estándar	0,00	3,17	3,51
LP4 Integrada	Promedio	0,00	5,00	6,45
	Desviación estándar	0,00	1,41	3,04
LP5 Integrada	Promedio	0,00	7,60	3,45
	Desviación estándar	0,00	4,24	0,21
LC3 Integrada	Promedio	35,00	9,17	9,58
	Desviación estándar	18,03	1,44	2,60

4) Macroinvertebrados bentónicos

El análisis de macroinvertebrados bentónicos se realizó de manera cualitativa durante el muestreo de Noviembre de 2015, encontrándose dos especies de Insecta (Diptera), de las familias Ephyridae y Dolichopodidae. La familia Ephyridae se encontró en los sitios de Laguna la Piedra LP1, LP2, LP3 y LP4 y en el sitio LC3 de Laguna Cejar. En el caso de la familia Dolichopodidae, se encontró solo en el sitio LP3 de Laguna La Piedra y en los sitios LC2 y LC3 de Laguna Cejar. De forma cualitativa se observó un alto número de individuos de Ephyridae en el sitio LP3 de Laguna La Piedra.

En el recorrido por los alrededores de la laguna se describieron además especies de Aeshna deffini (Libélula, matapiojo), mosca de la familia Otitidae, arañas y moscas típicas de la alimentación de los lagartos L. fabiani y L. constanzae (familia Dolichopodidae) (Anexo).

Tabla 11. Listado de taxa de comunidades de macroinvertebrados bentónicos presentes en distintas muestras de Laguna Cejar y Laguna La Piedra.

		Taxa 1	Taxa 2
Phylum		Arthropoda	Arthropoda
Clase		Insecta	Insecta
Orden		Diptera	Diptera
Familia		Ephyridae	Dolichopodidae
Sitio de muestreo	LP1A	x	
	LP1B		
	LP2	x	
	LP3	x	x
	LP4	x	
	LP5		
	LC2		x
	LC3	x*	x

Diagnóstico de calidad del recurso hídrico disponible en el sistema acuático y los elementos claves para la mantención de sus atributos, amenazas y capacidad de carga

La información que presenta la DGA sobre la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en el Salar de Atacama es de suma importancia para poder entender lo complejo de este sistema (DGA 2013). A pesar de que las aguas de la zona de estudio se encuentra protegida por la DGA, existen innumerables derechos de agua concedidos y en uso en la zona norte de las lagunas. Esto ha gatillado por ejemplo, que se considere como área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas el sector hidrogeológico de Tilopozo-Pajonales ubicado en la parte sur del Salar de Antofagasta (Resolución N°12, Ministerio de Obras Públicas, 2015).

Las lagunas presentes en la zona de estudio son alimentadas principalmente por aguas subterráneas, por lo que la disponibilidad de dicha agua es crucial para el mantenimiento de las

lagunas. Es decir, cualquier perturbación al régimen hídrico existente, como extracción de aguas, provocaría un importante cambio en la calidad química del agua, probablemente acelerando la salinización del sistema y la consecuente pérdida de biodiversidad y funcionamiento sistémico. Las especies que habitan estas lagunas dependen completamente de procesos a microescala (procesos de delicuescencia) donde se dan gradientes mínimos para el desarrollo de la vida y la protección y generación de mecanismos que permiten lidiar con el hostil medio.

Otro elemento clave para la mantención del sistema es la vegetación de borde que permite que las especies mayores se desarrollen, cualquier cambio o manipulación del entorno (instalación de miradores), afectaría de alguna manera relaciones tróficas o espaciales de los organismos, por lo que es fundamental realizar estudios de monitoreo a largo plazo para poder describir patrones y con esa información proponer un sistema de observación y/o de acercamiento a las lagunas.

Los macroinvertebrados bentónicos son alimento directo para especies como las lagartijas ya descritas, estos a su vez, necesitan de un sustrato para su desarrollo, por lo que la perturbación del suelo, mediante los senderos existentes y el lugar donde se bañan los turistas, sin duda que afecta al establecimiento y desarrollo de dichas comunidades.

En definitiva, este frágil sistema requiere de atención urgente, en el sentido de caracterizar en detalle y a largo plazo sus componentes, al menos en las siguientes áreas: i) hidrogeología, debido a la alta posibilidad de la existencia de aguas termales profundas; ii) geoquímica, y el comportamiento geológico de los elementos metálicos y no metálicos descritos y su disponibilidad biológica y especiación; iii) química del agua, para poder entender el comportamiento de las sales en disolución (que están sobresaturadas) y modelar el efecto que tendrían en su composición cambios ambientales futuros y/o actuales. Del mismo modo, el alto valor de la biodiversidad existente, lo hace un laboratorio natural único en el mundo, para poder entender los mecanismos de adaptación a condiciones límite de la vida y además, la existencia de metabolismos microbianos poco frecuentes que darían luces de procesos límite y antiguos.

Con la información recopilada en este estudio no es posible establecer un modelo de capacidad de carga detallado. Sin embargo, esta información pone de manifiesto la fragilidad del ambiente, ya sea desde el punto de vista físico-químico como biológico, donde cualquier perturbación tendría alguna consecuencia que es necesario calcular y modelar a largo plazo. En definitiva, el ingreso de turistas debe ser restringido, y el baño debe suspenderse. A diferencia de otros sistemas donde esta práctica se realiza, existe un volumen de agua mayor (ejemplo, Mar Muerto o el Gran Lago Salado), tanto en extensión como en profundidad. La poza LP05 donde ocurre esta práctica tiene un área de solo 2,7 km², por lo que se puede predecir que a mediano o largo plazo habría consecuencias irremediables en la zona.

v. ETAPA 5: Caracterización del uso actual del espacio

Evaluación, caracterización y espacialización de accesos y vías de circulación internas existentes y tipo

Existe una ruta ripiada de acceso, la cual parte desde la ruta 23 que viene desde San Pedro de Atacama y se encuentra pavimentada. En el km 25 de la ruta 23 existe un desvío hacia mano derecha. El acceso es adecuado para vehículos todo terreno y también para automóviles pequeños.

Existe un control de acceso con una garita que está controlada por la Comunidad Atacameña de Solor (Fig. 34). Al entrar se solicita el pago de una entrada, la cual es diferencial para chilenos y extranjeros. A su vez, es diferenciada si el fin es bañarse en el sitio LP05 de la Laguna La Piedra.

Existe una zona amplia de estacionamiento, donde además se encuentra un pozo séptico. En la zona de servicios hay baños y duchas en buenas condiciones (Fig. 35). Desde ese lugar, se puede acceder a pie a la orilla de la Laguna Cejar, donde existe un mirador construido de madera.

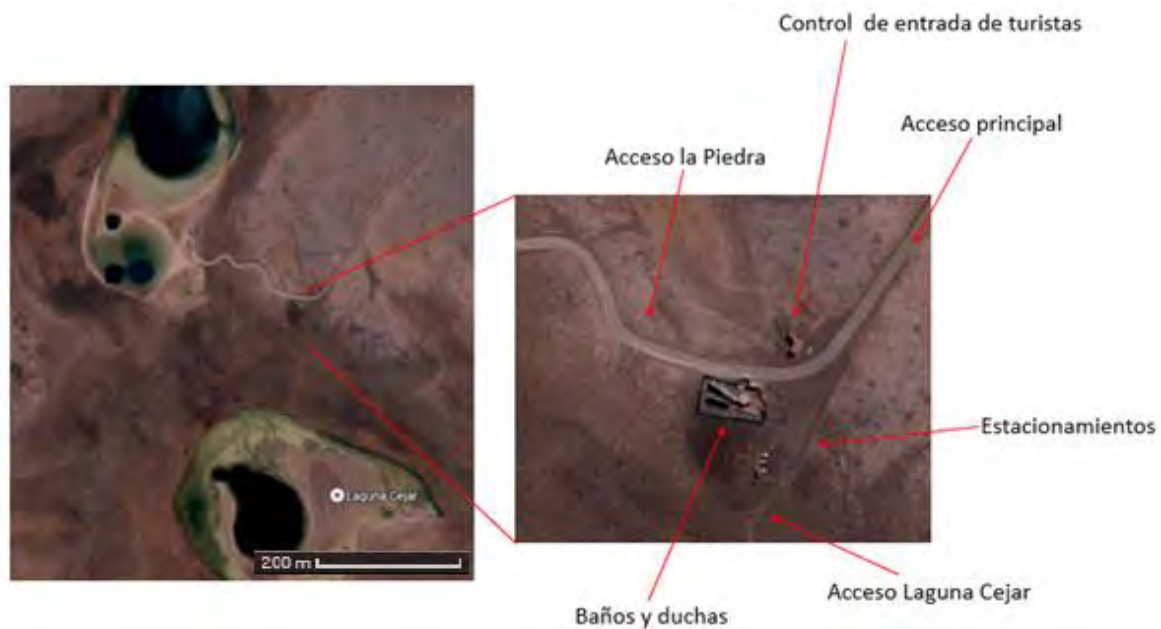


Figura 34. Vías de acceso internas en las lagunas Cejar y la Piedra.

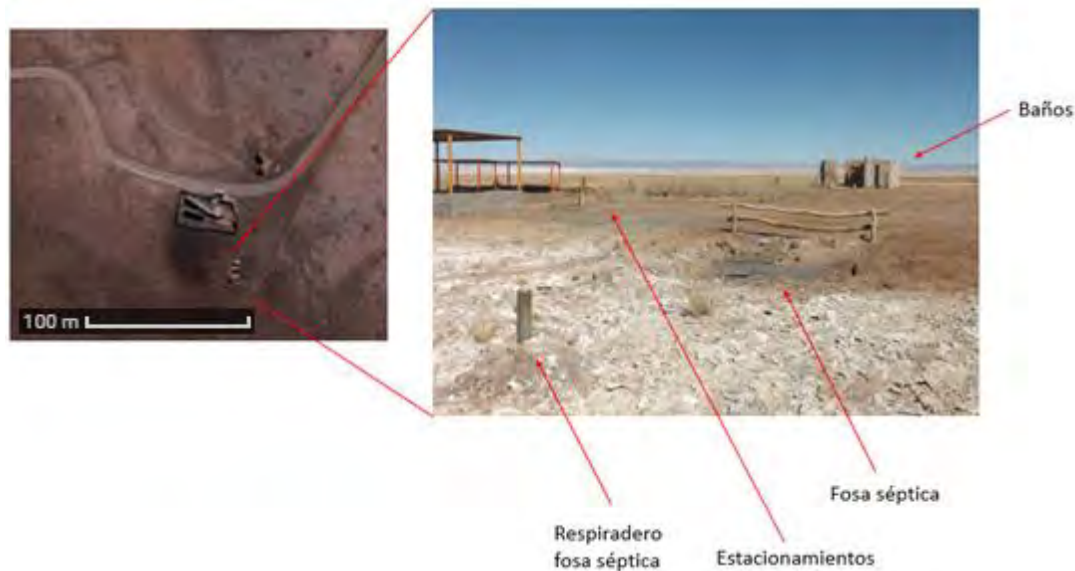


Figura 35. Infraestructura instalada en el sector de Laguna Cejar y Laguna la Piedra.

Actividades actuales e infraestructura existente

Actualmente la única actividad es el turismo y ocasionalmente toma de muestras para fines científicos, lo cual se deduce de la literatura especializada existente sobre muestras de Laguna Cejar. La visita de turistas incluye observación del paisaje, tomar fotografías y además, se permite el baño en uno de los pozos de Laguna La Piedra. El baño se encuentra prohibido en otros sectores (Fig. 36). El mirador construido en Laguna Cejar se encuentra sobre el nivel del suelo, por lo que se puede observar de buena forma la extensión de la laguna. Sin embargo, este fue construido sobre corredores de vertebrados.



Figura 36. Señalética en el sendero hacia Laguna Cejar indicando la prohibición de baño.

El acceso a la Laguna La Piedra se realiza a pie desde la zona de servicios. Se puede hacer un recorrido a pie, el cual está delimitado y se ha destinado el sitio que este informe denomina LP05 para el baño. Debido a la alta salinidad presente, las personas flotan, lo cual lo hace atractivo para el turismo. Sin embargo, es importante advertir a los turistas que se bañan en una de las aguas con mayor nivel de Arsénico y Boro reportadas, lo cual podría ocasionar problemas a la salud.



Figura 37. Mirador instalado en la entrada de la Laguna Cejar.

Potenciales usos

Tanto la química como la biodiversidad de las lagunas las hacen un lugar único para la investigación de especies extremas y de procesos de salinización particulares. Este conocimiento y condición única, debiese verse reflejado en la realización de actividades de **turismo científico y de intereses especiales (incluyendo Astrobiología y Astronomía)**, ya que el turismo masivo sería nocivo para los frágiles equilibrios del sistema. El recorrido a pie por las orillas de las lagunas dañan los tapetes

microbianos, afectando la productividad primaria y establecimiento de las comunidades, las cuales a su vez son sustento de insectos y del resto de la trama trófica. Si se diseñan pasarelas y senderos sobre el piso, éstas permitirían preservar estas zonas y el desarrollo de un turismo no invasivo.

Análisis de sectores críticos y de interés para la conservación

Los sectores críticos se encuentran en la Laguna La Piedra, especialmente en el sitio LP05 donde se permite el baño de turistas. Esa zona se observa con gran intervención, sobre todo por pisadas que no permiten que los tapetes microbianos se desarrollen (Fig. 38). Las pisadas resuspenden el material orgánico que está presente en el fondo de los sedimentos (material anóxico sulfurado), haciendo que se consuma el oxígeno que están produciendo las cianobacterias. El restablecimiento de los tapetes microbianos depende de tiempo para que las comunidades microbianas vuelvan a colonizar dichos ambientes. Es decir, un tráfico continuo en esa área hará la desaparición definitiva de los equilibrios físicos y químicos de la zona ribereña.

A)



B)



Figura 38. A) Vista general del sitio LP05 en Laguna La Piedra; B) Detalle de las pisadas presentes en la zona y la perturbación del suelo y tapetes microbianos.

En el caso de los vertebrados, los senderos están bien delimitados, sin embargo se sugiere levantar una segunda barrera de iguales características que impidan efectivamente el paso de los turistas, esto porque ciertamente tanto aves, reptiles como mamíferos son particularmente sensibles a la presencia humana. Las construcciones existentes si bien conforman un todo con el entorno, no necesariamente están libres de provocar una intervención sobre la flora y fauna existente, si bien determinan una posibilidad para el turismo, no significa que necesariamente constituyan una solución para el medio. Se propone que se mejoren los observatorios de aves, que los senderos se levanten del piso, agregando delimitaciones que permitirán mejorar el entorno y no intervenir sobre los animales. Se propone alzar veredas aéreas de cincuenta centímetros sobre el piso y sumar a ellas barandas, en todo los lugares de acceso de los turistas.

Laguna Cejar aparentemente tiene una intervención menor dado que no es usada con fines de balneario, esto ha permitido efectivamente el anidamiento de gaviota andina y un sinnúmero de aves, reptiles y mamíferos compartan el lugar. Su amplia productividad lo hace un sitio prioritario de alimentación.

Se puede apreciar, aunque se requiere de un estudio más acabado que las coloraciones de los reptiles están en directa relación con los tapetes microbianos de las riberas de las lagunas, ya que su actividad de caza está asociada a los mismos y es posible que dichos elementos ingresen a su organismo por vía oral. Proteger los tapetes microbianos permitirá proteger a los reptiles que tienen una relación profunda con la flora y vegetación del lugar, el cual se asocia a la taxa ave y mamíferos como es evidente en una relación ecosistémica agua-tierra.

Ambas lagunas han sido ya declaradas sitios prioritarios para la conservación. Sin embargo, es necesario que se formalice alguna protección de parte del Estado ya que estas lagunas son sitios relictos de agua de todo el Salar de Atacama, albergando numerosos taxa de aves, reptiles y mamíferos, siendo reservorio de una diversidad microbiana sin precedentes para un ambiente extremo de estas características. Las lagunas Cejar y la Piedra deben ser protegidas y el uso turístico masivo debe ser detenido mientras no se tenga un diseño acabado de uso para este efecto. Del mismo modo, se debe revisar el uso como balneario, ya que las altas concentraciones de arsénico, boro y litio reportadas podrían provocar problemas a la salud. Probablemente, las lagunas y vegas cercanas tengan características similares en cuanto a refugio y desarrollo de una biodiversidad única, por lo que debería plantearse el anexo a la Reserva Nacional Los Flamencos de las vegas protegidas por DGA de la zona A zonificada (DGA, 2010). En los últimos años el interés científico por estudiar los procesos biogeoquímicos de las lagunas Cejar y La Piedra ha aumentado, incluso, reportándose la oxidación de monóxido de carbono por microorganismos de la zona en revistas científicas de alto impacto (King, 2015). Este interés radica en que estos metabolismos estarían presentes en ambientes extraterrestres. La búsqueda de ambientes análogos a Marte u otros sistemas planetarios es sin duda, una de las líneas de investigación actual más fascinantes que existen y es muy importante valorar que dichos sistemas existen en nuestro país, específicamente en el Desierto de Atacama.

La Laguna La Piedra y Laguna Cejar, son una de las lagunas más saladas del mundo, por lo que el interés por su conservación es mayor, ya que la probable presencia de aguas termales (determinada por las altas temperaturas del fondo y las altas concentraciones de elementos de origen termales), hacen que esta saturación de sales no precipite y se mantenga en un delicado equilibrio físico-químico. Por último, al poder acceder en bote a la laguna permitió observar la presencia de estructuras sólidas tipo arrecifes de coral, las cuales estarían formadas de yeso o calcio, que serían remanentes antiguos de la formación de la laguna y el origen del Salar de Atacama.

vi. ETAPA 6: Elaboración de una zonificación y recomendaciones

Aproximación a la definición de los servicios Ecosistémicos que proporcionan estas lagunas

Chile ratificó el Convenio de Diversidad Biológica el año 1995- Los objetivos del Convenio son “la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos, mediante, entre otras cosas, un acceso adecuado a esos recursos y una transferencia apropiada de las tecnologías pertinentes, teniendo en cuenta todos los derechos sobre esos recursos y a esas tecnologías, así como mediante una financiación apropiada” (CBD, 1992). En este contexto, surge la definición de Servicios Ecosistémicos como “beneficios que los seres humanos obtienen de la naturaleza” y establece cuatro tipos de clasificación: i) soporte (ej. ciclo de nutrientes), ii) provisión (ej. madera, agua), iii) regulación (ej. control de inundaciones y de pestes) y iv) cultural (ej. espirituales, recreación). Generalmente se utiliza la clasificación de la Agencia Ambiental Europea o CICES.

A continuación se proponen los servicios Ecosistémicos asociados a las Lagunas Cejar y La Piedra (Tabla 12):

Servicios de soporte (apoyo)

1) Procesos geológicos pasados y actuales de formación del suelo del Salar de Atacama

La composición actual de los suelos, permite el desarrollo de una biodiversidad vegetal y faunística específica, siendo parte importante de la hidrología del sistema.

2) Ciclo del agua

Los procesos evaporíticos de las lagunas son cruciales para modelar algún uso de ésta. Los aportes de agua a estas lagunas son del tipo subterráneo, por lo que es importante garantizar este equilibrio, el cual a su vez garantiza la existencia de agua líquida en un sistema saturado con sales.

3) Ciclo de nutrientes

Los organismos presentes en las lagunas estudiadas, dan cuenta de interacciones tróficas y roles en flujo de energía específicos. Los niveles de fósforo y nitrógeno son altos lo cual coincide con el alto nivel de materia orgánica medido como carbono orgánico total.

4) Productividad primaria

La productividad primaria está dada por cianobacterias las cuales están presentes en la columna de agua de las lagunas, pero en mayor medida, extendidas en toda la superficie de la cuenca, ya que están formando parte de los tapetes microbianos. Este grupo posee adaptaciones específicas a la alta radiación solar del lugar y la alta salinidad. A su vez, son alimento directo de ciertas especies. Existen a su vez bacterias que realizan fotosíntesis sin la producción de oxígeno (fotosíntesis anoxigénica), contribuyendo a la productividad primaria y a distintos ciclos biogeoquímicos (Azufre, Carbono, Nitrógeno, Hierro).

Servicios de provisión

Desde la Laguna Cejar y La Piedra, se pueden obtener microorganismos (microalgas, hongos, bacterias), los cuales al aislarlos pueden proveer de compuestos con actividades biológicas específicas (antimicrobianos, antifúngicos, anticáncer), así como enzimas y otros. Además, la alta diversidad microbiológica da cuenta de un importante grado de variabilidad genética dada a su vez por las condiciones extremas de las lagunas.

Dentro de las especies vegetales descritas, hay varias que son usadas generalmente como forraje o con fines medicinales.

Servicios de regulación

Regulación del clima: existen publicaciones recientes que muestran que en la Laguna Cejar y La Piedra ocurren procesos únicos (y raros a nivel mundial), como la oxidación del monóxido de carbono por bacterias y arqueas (King, 2015), lo cual estaría enriqueciendo el ciclo del carbono. A su vez, ha sido descrita la producción de etano desde los sedimentos de las lagunas (Mauney, 2015) y el uso de sustratos poco frecuentes para la producción de metano (Kelley et al., 2014; 2015). Estudios específicos podrán determinar la producción específica de gases y otros que estarían modulando las condiciones climáticas locales y de la zona.

Polinización: la presencia de estas vegas en la parte norte del Salar de Atacama entrega la posibilidad de polinización de distintas especies vegetales por los insectos que abundan en el sistema. No hay estudios específicos respecto a este tema.

Regulación de la erosión: el equilibrio salino que se encuentra la laguna, junto con la composición de limo del suelo hace favorables las condiciones de erosión frente a cualquier perturbación. Es clara la ausencia de especies y calidad del crecimiento de las especies vegetales en la zona de uso por baño en la Laguna La Piedra.

Regulación de la biodiversidad: la biodiversidad presente se ve regulada (o determinada) principalmente por la condición de ambiente hipersalino. Es decir, los organismos que logran desarrollarse, deben hacerlo en condiciones hostiles. Sin embargo, la alta carga de nutrientes también permite que existan variados grupos de bacterias y la posibilidad de colonización por especies invasivas si es que las condiciones actuales cambian (disminución de la salinidad del agua). Del mismo modo, si los procesos evaporíticos aumentan, concentrando aún más las sales presentes, esto tendría influencia en la mantención de todo el sistema.

Servicios culturales

Las lagunas estudiadas se encuentran en el Área de Desarrollo Indígena “Atacama La Grande”, las cuales son administradas por la comunidad atacameña de Solor. Las comunidades indígenas tienen por lo tanto, conocimiento y han recibido como herencia el uso ancestral de estos espacios para fines espirituales y religiosos.

Estos sistemas han sido el hábitat del hombre antiguo que habitó tempranamente estas zonas. Hacia el norte de las lagunas, en el área de los ríos San Pedro y Vilama, existen un gran desarrollo de la agricultura, herencia de métodos de los antiguos atacameños (Nuñez 1992).

Actualmente estas lagunas reciben turistas que buscan un contacto directo con la naturaleza, en un ambiente poco común y un paisaje contrastante y conmovedor.

Los cielos son claros y permitirían el desarrollo de actividades turísticas relacionadas con la Astronomía. Los metabolismos microbianos únicos que han sido descritos, han dado paso al desarrollo de estudios que buscan comprender el origen y mantención de la vida en ambientes extremos, contribuyendo al conocimiento de la vida extrema, la cual podría existir en otros planetas (Astrobiología).

Tabla 12. Servicios Ecosistémicos propuestos para el ecosistema Laguna Cejar y Laguna La Piedra

Servicio	Funciones	Usuario/Actividad
Refugio de especies	Hábitat para especies residentes y migratorias	Ecoturismo, turismo científico
Belleza escénica	Oportunidades de actividades recreativas	Senderismo, observación astronómica
Recreación	Oportunidades de actividades recreativas	Turismo de intereses especiales, turismo científico
Culturales	Actividades con usos no comerciales	Ecoturismo, investigación científica, Astrobiología
Recursos Genéticos	Obtención de biomateriales y nuevos compuestos	Investigación científica, bioprospección

Generación de una zonificación descriptiva

Considerando la información recopilada y analizada en este informe, los elementos críticos serían los siguientes:

- 1) Equilibrio salino
- 2) Accesos a los bordes de las lagunas
- 3) Contaminación por desechos
- 4) Construcción de miradores sin considerar corredores biológicos

La zonificación debiese realizarse una vez que se tengan antecedentes a largo plazo sobre la permanencia y/o migración de especies que viven en la laguna, ya que eso permitirá con mayor detalle proponer senderos altos y/o otras vías de acceso con fines de contemplación.

En el caso de los tapetes microbianos, es muy importante su mantención, por lo que se debería restringir el acceso directo a los cuerpos de agua.

Propuesta de recomendaciones a seguir respecto de intervención y manejo

Se insiste en que las lagunas Cejar y la Piedra deben ser protegidas de acuerdo a los instrumentos que el Estado tenga para este efecto y con los mecanismos respectivos. Se propone que la zona de vegas y lagunas de la zona A (DGA 2012), incluyendo otros sistemas pobremente estudiados como Laguna Tebenquiche, sean anexados a la Reserva Nacional Los Flamencos ya en funcionamiento. Incluso, idealmente se podría proponer la creación un Parque Nacional en esta área.

Las interacciones tróficas son frágiles, siendo fundamental el desarrollo y mantención de los tapetes microbianos, los cuales transfieren energía a componentes superiores como insectos, luego reptiles, aves y mamíferos. En el ambiente acuático, las comunidades fitoplanctónicas mantienen al sistema, derivando en la baja diversidad de zooplancton y macroinvertebrados bentónicos debido principalmente a la altísima salinidad presente. Dichas condiciones no permiten el desarrollo de taxa superiores como peces.

El uso turístico masivo debe ser detenido y regulado el ingreso. Actualmente dicha regulación y acceso ocurre mediante el cobro de una entrada, sin embargo, es fundamental que el baño en las lagunas sea suspendido mientras no se tenga un diseño acabado de uso para dicho efecto, considerando la extensión de las lagunas. Se propone que se desarrolle el turismo de intereses especiales de forma no invasiva, donde se recalque la particularidad de este hábitat, visitas guiadas técnicas y divulgación del conocimiento científico que se genere. Al no tener información previa respecto a la flora y fauna del lugar, no es posible aseverar que las condiciones actuales han sido las predominantes en el tiempo pasado, sin embargo, hay vestigios de la “potencialidad” de hábitat de diversas especies.

Otra recomendación es el estudio de las concentraciones de arsénico, litio y boro en las aguas de la laguna y su efecto en la salud humana, incluso en exposiciones cortas.