Anexo 3.3

Permiso Ambiental Sectorial 88

Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

ÍNDICE

1. SUELO Y USO DE SUELO 2

1.1. Suelo 2
1.1.1 Suelo de Desierto 2
1.1.2 Suelo del Área del Proyecto 3
1.2. Uso de Suelo 4
1.2.1 Plan Regional de Desarrollo Urbano de la II Región (PRDU) 4
1.2.2 Zona de Interés Turístico (ZOIT) 4

2. SUBSUELO, ESTRATIGRAFÍA Y PERMEABILIDAD 5

2.1. Subsuelo 5
2.2. Estratigrafía y Permeabilidad 5

3. CALIDAD DEL AIRE, CLIMA Y/O METEOROLOGÍA 5

3.1. Calidad del Aire 5
3.2. Clima 6
3.3. Meteorología 6
3.3.1 Temperatura 7
3.3.2 Precipitaciones 7
3.3.3 Humedad Relativa 7
3.3.4 Viento 7
3.3.5 Evaporación Potencial 8

4. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA 8

4.1. Geología 8
4.2. Geomorfología 9
4.2.1 Descripción de la Geomorfología del Área del Proyecto 9
4.2.2 Indicadores Morfológicos 11
4.2.3 Morfología Asociada 12

5. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA 12

5.1. Hidrología 12
5.1.1 Contexto Regional 12
5.1.2 Contexto Local 13
Introducción 13
Lagunas 13
5.2. Hidrogeología 14
5.2.1 Hidrogeología Regional 14
5.2.2 Hidrogeología Local 16

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

ANTECEDENTES PARA SOLICITAR

PERMISO AMBIENTAL SECTORIAL 88 DEL RSEIA

Apilamiento de residuos

El Proyecto **"Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama"** requiere el otorgamiento del permiso ambiental sectorial que se encuentra señalado en el Artículo 88 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), debido a que contará con apilamiento de residuos mineros.

El Proyecto "Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama" (en adelante, el Proyecto) consiste en la construcción de nuevas superficies de evaporación solar, a continuación de las actuales instalaciones de Sociedad Chilena de Litio Ltda. (SCL), en el Salar de Atacama, provincia de El Loa, Región de Antofagasta.

El artículo 88 del Reglamento del SEIA corresponde al permiso para establecer un apilamiento de residuos mineros a que se refiere el inciso 2º del artículo 233 y botaderos de estériles a que se refiere el artículo 318, ambos del D.S. Nº72/1985 del Ministerio de Minería, Reglamento de Seguridad Minera. El artículo 233 indica que le corresponde al SERNAGEOMIN aprobar los planes de apilamiento o depósito de desmontes, ripios de lixiviación o residuos mineros. Por otro lado, el artículo 318 indica que le corresponde al SERNAGEOMIN aprobar los planes de botaderos, los cuales considerarán medidas de seguridad asociadas a la estabilidad del depósito, resistencia del terreno, características de los materiales, ángulo de talud, drenaje natural o artificial, movimientos sísmicos; y medidas para evitar la combustión y el arrastre por el viento.

A continuación se presentan los antecedentes necesarios para acreditar el cumplimiento de este permiso ambiental sectorial, según los requisitos y los contenidos técnicos y formales establecidos en el Reglamento del SEIA. En el Capítulo 5, Línea de Base del Proyecto, se presentan estos mismos antecedentes en detalle.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1. SUELO Y USO DE SUELO

1.1. Suelo

1.1.1 Suelo de Desierto

Los suelos de la Región de Antofagasta forman parte de los denominados “Suelos del Desierto”. Este tipo de suelo se localiza entre la Región de Arica y Parinacota y la Región de Atacama, específicamente entre el límite internacional con el Perú y las cercanías de Copiapó. Estos suelos son delgados a moderadamente profundos (50-100 cm), y comprenden a los órdenes Aridisoles, Histosoles y Entisoles, no obstante los predominantes son los Entisoles.

Un sector realmente desértico cubre las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. Dadas estas condiciones imperantes, podría esperarse que la mayoría de los suelos de la zona fueran aridisoles. Sin embargo, las significativas diferencias locales, explicadas fundamentalmente por el relieve, propician la existencia de tres subregiones que acusan la distribución espacial de temperaturas y precipitaciones.

Sobre las pampas de la meseta central alta, se registran los valores extremos de aridez con una ausencia absoluta de humedad y vegetación, lo que se ve reflejado en la presencia de entisoles.

A medida que se avanza hacia el Sur del área desértica, los suelos comienzan a manifestar una mayor evolución de los horizontes, producto principalmente de un aumento de las precipitaciones. Es así que aparecen los aridisoles, ocupando un área cuyo centro está aproximadamente en el valle del río Huasco. Los aridisoles se extienden hacia el Norte en la medida que las condiciones ambientales lo permitan, apareciendo en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa. Esto, porque en dicho sector se producen neblinas cuya humedad favorece un mayor desarrollo de los procesos pedogenéticos y la presencia de una cubierta vegetal de relativa importancia. Por otro lado, se registra la presencia de aridisoles en la precordillera andina, cuando se dan condiciones de mayor humedad.

El perfil típico de los suelos de la región desértica presenta un horizonte A de 5 a 20 cm de espesor, de colores pardo claro a rosado, con contenido prácticamente nulo de materia orgánica. Por su parte, el horizonte B manifiesta un mayor espesor, su tonalidad es más rojiza, su textura es más fina y presenta un mayor contenido de materia orgánica. El horizonte subyacente posee altos contenidos de calcio, y en algunas ocasiones, aparece como un horizonte cementado con cal y sílice.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

La Cordillera de los Andes, en este sector del país, se presenta como una altiplanicie, en la que la altura se manifiesta como una disminución de la temperatura, mientras que por los efectos del denominado “invierno boliviano”, hay un aumento de las precipitaciones. Esto último permite el establecimiento de vegetación esteparia de altura, lo que conduce a la ocurrencia de suelos propios de ambientes semiáridos. Hasta los 4.000 m de altura, el predominio sigue siendo de los entisoles, en tanto que sobre esa cota comienzan a aparecer en forma abundante los molisoles, asociados a praderas altiplánicas, con inclusiones más o menos importantes de suelos azonales, fundamentalmente halomórficos.

1.1.2 Suelo del Área del Proyecto

En la cuenca del Salar de Atacama, los tipos de suelo posibles de identificar son muy escasos, pues está constituida casi en su totalidad por el cuerpo salino. Sólo se ha identificado una entidad taxonómica que corresponde al tipo Entisol, situado en los alrededores del salar.

Los suelos de este orden se caracterizan por ser muy delgados, de menos de 10 cm de espesor (profundidad que en ciertos casos puede ser mayor), su tonalidad predominante es gris rosado en seco y gris rojizo en húmedo, no presentan evolución de horizontes ni contenido de materia orgánica y el material subyacente es de alto contenido calcáreo y salino. Pueden ser suelos jóvenes que no han tenido tiempo de desarrollarse, o bien pueden ser suelos viejos, en sentido geológico, que no han desarrollado horizontes por corresponder a materiales resistentes a la meteorización. Se presentan virtualmente en todos los climas sobre superficies fisiográficas recientes, ya se trate de empinadas pendientes sujetas a intensa erosión, o sobre planos de sedimentación en donde se han depositado los materiales recién transportados. También pueden encontrarse sobre superficies fisiográficas antiguas en donde, producto de la intervención del hombre, se ha destruido el perfil del suelo.

Según lo presentado anteriormente, se puede concluir que el recurso suelo es inexistente en el área del Proyecto. El sustrato, tal como se señaló, corresponde a la costra salina que caracteriza al núcleo de Salar, por lo tanto, no hay un desarrollo edafológico como el que se puede identificar en la zona marginal del Salar, ubicada hacia el Este y distante a 23 km aproximadamente de las actuales instalaciones de SCL. Sólo en los alrededores del Salar se ha identificado una unidad taxonómica que corresponde al tipo Entisol.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1.2. Uso de Suelo

1.2.1 Plan Regional de Desarrollo Urbano de la II Región (PRDU)

La empresa Sociedad Chilena de Litio se inserta, según lo establecido por el PRUD, en la Unidad de Gestión Territorial "Arco Andino, San Pedro de Atacama" (UGT 3B).

El PRDU establece que esta unidad de gestión territorial corresponde a aquellas áreas de un territorio o unidad geográfica, que presenta características físicas y atributos geográficos y ambientales similares, así como de sus recursos naturales.

1.2.2 Zona de Interés Turístico (ZOIT)

El área del Proyecto forma parte de la Zona de Interés Turístico Nacional (ZOIT) Área San Pedro de Atacama – Cuenca Geotérmica del Tatio, declarada el 1 de agosto del año 2002 mediante Resolución Exenta Nº775 del SERNATUR. Esta zona limita al norte con la cumbre de del cerro Hojalas o Piedras Grandes, situado a unos 10 km al Norte de la localidad Geiser El Tatio, mientras que por el Sur limita con la cumbre del cerro Pingo-Pingo. Su límite oriental incluye a las localidades de San Pedro de Atacama, Toconao, Puritama, Socaire y las lagunas Miñiques y Miscanti, mientras que su límite occidental coincide con el límite de la Comuna de San Pedro de Atacama.

De acuerdo al Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR), se entiende por Zona de Interés Turístico Nacional (ZOIT) a aquella área de características esencialmente rurales y amplia en extensión, donde junto a recursos turísticos relevantes coexisten otros usos o actividades con una compatibilidad básica con éstos. Los atractivos turísticos que ofrece, corresponden a una gama variada y contribuyen a conformar circuitos y/o áreas turísticas generalmente no explotadas, de carácter potencial, siendo conveniente velar por la preservación y puesta en valor de los recursos turísticos que posee, debiendo contar para ello con un plan de Ordenamiento Territorial de carácter extensivo que resguarde y encauce adecuadamente su desarrollo turístico.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

2. SUBSUELO, ESTRATIGRAFÍA Y PERMEABILIDAD

2.1. Subsuelo

Como fue señalado anteriormente en general el suelo puede ser caracterizado como una costra salina. Esta costra salina denominada Núcleo del Salar, es la que confiere las propiedades a este tipo de suelo, en términos de determinar procesos de movimiento vertical y horizontal del agua líquida o de vapor.

2.2. Estratigrafía y Permeabilidad

El núcleo del salar presenta una estratigrafía variable. A nivel global se pueden diferenciar algunas zonas de características transmisivas y de almacenamiento semejantes. En los bordes del núcleo se han detectado estratos de muy baja permeabilidad, cuya existencia es consistente con la génesis geológica del núcleo. Se estima que la permeabilidad de esa zona debería tener valores entre $1 \cdot 10^{-6}$ y $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

En el núcleo mismo, específicamente en los primeros 30 a 40 m de profundidad, el medio presenta una permeabilidad no tan baja. Esa área constituye la reserva mineralógica de salmuera del salar. Sin embargo, la distribución irregular de zonas de baja permeabilidad del núcleo, genera una heterogeneidad en las propiedades hidrogeológicas del mismo. Cabe señalar que bajo los 40 m de profundidad, se han detectado predominantemente capas arcillosas y cementadas.

3. CALIDAD DEL AIRE, CLIMA Y/O METEOROLOGÍA

3.1. Calidad del Aire

No se identifican áreas sensibles a la calidad del aire que sean relevantes de caracterizar respecto del cumplimiento de la normativa aplicable. El poblado más cercano corresponde a la localidad de Peine, ubicado a 27 km al este del área del Proyecto.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

En la visita a terreno al área del Proyecto no se detectaron fuentes emisoras antropogénicas que sean relevantes de caracterizar respecto del cumplimiento de la normativa aplicable. Las únicas emisiones atmosféricas generadas en el área del Proyecto, de escasa relevancia desde el punto de vista ambiental, corresponden a las provenientes de las actuales instalaciones de SCL (emisiones de material particulado y gases de combustión de maquinaria y camiones de la faena). El camino de acceso a SCL se encuentra tratado con bischofita, por lo no constituye una fuente de emisión de material particulado (polvo).

Por lo tanto, no se ha considerado necesario establecer una línea de base para la componente ambiental Calidad del Aire.

3.2. Clima

El área del Proyecto presenta un clima Desértico Marginal de Altura (BWH). Este clima se presenta por el centro de la Región, entre los 2.000 y 3.000 m de altura. En este clima, el régimen de precipitaciones se presenta mezclado observándose precipitaciones estivales y también de origen ciclónico, aunque escasas en ambos casos. Las de origen ciclonal, se presentan con intervalos de varios años, cuando suceden inviernos pluviométricamente rigurosos en la zona central del país. En estos casos, suelen ser mayores a las del verano.

Debido a la altura, las temperaturas son más frías y la misma altura atenúa las oscilaciones térmicas anuales, pero aumenta las diarias. Calama presenta 6,5ºC de diferencia entre las temperaturas medias del mes más cálido y el más frío y de sólo 3,8ºC en las temperaturas máximas, en cambio presenta hasta 22ºC de diferencia entre las máximas y las mínimas, pero en días particulares pueden registrarse hasta 30ºC de diferencia. Por otra parte, la humedad relativa es muy baja.

3.3. Meteorología

Los datos que se presentan a continuación fueron obtenidos de la estación meteorológica Salar, situada dentro de la Planta Salar de Atacama, propiedad de SCL. Además, se presentan los datos de pluviometría de la estación Peine de la Dirección General de Aguas (DGA).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

3.3.1 Temperatura

Los antecedentes registrados para el período entre enero de 1992 y diciembre de 2006 en la estación Salar, ubicada en las instalaciones de la Planta, indican una temperatura media anual de 16,6ºC. La temperatura máxima media del mes más cálido, enero, es de 30,6ºC, mientras que la mínima media del mes más frío, julio, es de 0,2ºC.

3.3.2 Precipitaciones

La precipitación promedio anual en Peine alcanza los 20,3 mm. Las lluvias se concentran en verano, época en la que ocurre el fenómeno llamado invierno altiplánico, siendo febrero y marzo los meses más lluviosos ambos con 5,9 mm. El mes más seco corresponde a noviembre con sólo 0,03 mm de precipitación. Por otro lado, durante el período comprendido entre los años 1992 y 2006, el año más lluvioso fue el 2001 con 85,9 mm, mientras que el más seco fue 1993 con sólo 0,4 mm de agua caída.

3.3.3 Humedad Relativa

La humedad relativa media anual en la estación Salar es de 30,0% en la medición de mañana y de un 14,1% en la medición de mediodía. Esta diferencia se explica producto del aumento de la radiación solar en la medida que avanza el día.

3.3.4 Viento

De acuerdo a los vientos registrados en la Estación Meteorológica Salar, durante el período comprendido entre el 01 de Enero y el 31 de Diciembre del año 2007, la dirección predominante de los vientos registrados en el área del Proyecto corresponde a la dirección Norte y Sureste. La velocidad promedio es de 4,01 m/s, sin embargo, ésta puede variar entre los 0,5 y los 10 m/s, y las calmas alcanzan el 0,36%.

Las características de los vientos registrados, en horario diurno son: velocidad promedio del viento 3,25 m/s; rango de variación velocidad del viento 0,5-10 m/s; porcentaje de calmas 0,48%; y dirección predominante del viento: N, SE.

Las características de los vientos registrados, en horario nocturno son: velocidad promedio del viento 4,64 m/s; rango de variación velocidad del viento 0,5-10 m/s; porcentaje de calmas 0,07%; y dirección predominante del viento: SE, N.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

3.3.5 Evaporación Potencial

Los valores de evaporación potencial media en la estación Salar, para el período 1983-2006, muestran la estacionalidad de esta variable meteorológica. Así, los valores más altos se registran en los meses de verano, 285,9 mm (enero), y los más bajos en los de invierno, 87,6 mm (junio). La evaporación potencial anual media es de 2.340,9 mm.

4. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

4.1. Geología

La cuenca del Salar, en el jurásico formó parte del borde Oriental del Geosinclinal Andino con depositación de evaporitas en su fase regresiva. Las capas jurásicas fueron plegadas y erosionadas formando una cuenca continental, sobre la cual se depositaron sedimentos clásticos del Cretácico, con algunas intercalaciones de evaporitas. Durante el Terciario y el Cuaternario Inferior continuaron los procesos de alzamiento y subsidencia, controlados principalmente por una tectónica de bloques.

Rocas sedimentarias clásticas y evaporitas del Terciario Inferior, constituyen la Cordillera de la Sal, que corresponde a una estructura de domos y pliegues. Subyacen en discordancia angular y de erosión, flujos de ignimbritas con intercalaciones clásticas del Terciario Medio a Superior. Estos flujos provinieron del Este y en partes cruzaron un relieve positivo que coincidía parcialmente con la actual Cordillera de Domeyko. Depósitos lagunares de carbonatos de la parte Sur-Oeste del Salar están afectados, al igual que las ignimbritas, por fallas y flexuras de rumbo Norte. Depósitos lagunares y piedemonte del Cuaternario Inferior, que sobreyacen en discordancia de erosión a las ignimbritas, están cortadas por fallas normales con el último alzamiento de la Cordillera de la Sal.

Se ha establecido que depósitos aluviales recientes rodean al Salar y engranan con las evaporitas. La cuenca está limitada hacia el Este, en el borde occidental de la Puna de Atacama por una línea de centros volcánicos andesíticos y basálticos, de edad Cuaternaria a Reciente. La superficie actual del Salar está formada por depósitos clásticos y evaporitas, distribuidas estas últimas en una zonación relacionada con la solubilidad relativa de las sales y que donde el borde del Salar hacia su centro corresponden a limos salinos, eflorescencias y el “núcleo” salino central. Los ejes del plegamiento tienen dos direcciones principales: Noroeste a Noreste,

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

afectando a unidades Paleozoicas y Triásicas, y Norte-Noreste afectando a rocas del Jurásico al Terciario.

En cuanto al Núcleo, su espesor promedio alcanza los 650 metros, con una profundidad máxima estimada de 1.400 metros y está impregnada por una salmuera intersticial muy rica en litio, potasio, magnesio y boro.

En profundidad se pueden distinguir dos capas principales: una capa superior de potencia comprendida entre 15 y 30 metros, de mayor porosidad (alrededor de un 12%) y conductividad hidráulica, compuesta por sal con textura granulada; y una capa inferior de menor porosidad (alrededor de un 4%) y de mucho menor conductividad hidráulica, conformada por un 90% de halita cristalizada porosa.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, el Salar de Atacama corresponde a una cuenca tectónica. El área del Proyecto se caracteriza por la presencia de rocas cuya formación varía entre el Mesozoico y el Cenozoico, con el desarrollo de secuencias sedimentarias y volcánicas, además de rocas intrusivas. El Salar colecta aguas superficiales y subterráneas cargadas de sólidos disueltos, y que por efecto de la evaporación se transforma en salmueras las cuales se constituyen en un acuífero libre. Es frecuente la presencia de gravas, arenas y limos, sobre todo en el borde Oriental y Occidental del Salar. El borde Sur se caracteriza por la presencia de diversas formaciones geológicas.

4.2. Geomorfología

4.2.1 Descripción de la Geomorfología del Área del Proyecto

El área del Proyecto se inserta en la Región Septentrional de las Pampas Desérticas y Cordilleras Prealtiplánicas, específicamente dentro de la unidad microregional de la Gran Fosa de los Salares Prealtiplánicos, la cual se caracteriza por la presencia de diversas fosas extendidas, que en su conjunto abarcan una longitud estimada de 900 km. Dentro de esta unidad, es posible distinguir tres secciones: la Depresión Longitudinal Prealtiplánica, la Gran Fosa de los Salares Prealtiplánicos y la Depresión de los Salares Cautivos Prealtiplánicos, estando el Proyecto emplazado en la segunda sección mencionada.

La Gran Fosa abarca todo el ámbito depresivo prealtiplánico. Posee una longitud de 480 km, limitando en el Norte con Potreros de Ayavari (al Norte del salar de Atacama), y en el Sur con la Laguna Santa Rosa, situada en la zona sur del salar de Maricunga. El ancho máximo se localiza en el salar de Atacama con 85 km, mientras que el mínimo se produce entre los salares de

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Aguilar y de Infieles, donde alcanza sólo los 2 km. Cabe señalar que esta gran fosa es uno de los rasgos morfológicos más interesantes del extremo Norte de Chile, debido a la escasa referencia bibliográfica y su exacto alineamiento Norte-Sur marcado por el acento tectónico de su origen y carácter endorreico.

En la Gran Fosa es posible encontrar los siguientes salares (enumerados de Norte a Sur):

- Salar de Atacama (el más importante)
- Salar de Imilac
- Salar de Punta Negra
- Salar de Pajonales
- Salar de Azufrera
- Salar de Aguas Amargas
- Salar de Aguilar
- Salar de Infieles
- Salar de Pedernales
- Salar de Maricunga

En general, sobre el origen de los salares existen dos temas a debatir. El primero es la génesis de las depresiones donde ellos se alojan, y el segundo, es el origen del carácter químico de los depósitos. Respecto del primer tema, la hipótesis tectónica permite explicar la independencia orográfica, tanto de éstas como de otras fosas altiplánicas. Respecto del segundo tema, se postula que dado el carácter volcánico de la región situada al Este de la Gran Fosa, las acciones hidrotermales podrían ser suficientes para contaminar con sales las aguas de los ríos presentes en las cuencas. Sin embargo, queda por establecer la causa por la cual cada uno de los salares contiene depósitos minerales diferentes: bórax, litio, sodio, potasio, calcio, etc.

El salar de Atacama, de edad pliocénica, se constituye como la cuenca salina más representativa de la Gran Fosa. Hacia él concurren las aguas de sistemas hidrográficos prealtiplánicos, destacándose por el Norte la confluencia del río San Pedro, con sus afluentes el Salado y el Grande, y del río Villama, mientras que por el sur se distingue la quebrada de Aguas Blancas.
Destaca en el borde occidental del salar la presencia del llano de la Paciencia, el que con sus 80 km de largo y más de 8 km de ancho, transige en los cerros de Purilactis a una orografía más accidentada. Aparecen también los relieves de la Cordillera de Domeyko, la que está separada del salar por un plano de falla de carácter regional. La Cordillera de la Sal en el borde noroccidental, se caracteriza por una eminencia muy rigurosa, que conforma un cordón montañoso de cerca de 4 km de largo.

Hacia el Sur, la cuenca se cierra con los cordones de Lila y Chinquilchoro. Asimismo, se desarrolla un cordón montañoso constituido en su núcleo central por granitoides del Paleozoico junto con secuencias volcánicas y volcánico-sedimentarias, conformando un relieve relativamente abrupto con cimas agudas y numerosas quebradas producto de procesos exógenos con resultados diferenciales, según los componentes litológicos.

El límite Norte es un portezuelo formado por los cerros de Tatio, donde se une la cadena de cerros volcánicos, mientras que hacia el Oriente del salar se desarrolla un plano inclinado que está constituido principalmente por tobas ignimbríticas y riolíticas terciarias.

A modo de resumen, se puede señalar que las principales unidades geomorfológicas de la cuenca del Salar de Atacama son las siguientes:

- Núcleo de halita del Salar
- Zona Marginal del Salar (componentes detríticos, carbonatos y sulfatos)
- Zona aluvial
- Cordillera de la Sal (halita y yeso)
- Cordillera de Domeyko (predominio de rocas sedimentarias)
- Precordillera de los Andes (mayormente ignimbritas)
- Cordillera de los Andes

4.2.2 Indicadores Morfológicos

Altitud

El Proyecto se emplazará en una zona bastante homogénea en cuanto a la altitud. De hecho, en el área del Proyecto la altura sólo varía entre los 2.300 y los 2.350 metros. Sin embargo, cabe mencionar que hacia el Suroeste, fuera del área de influencia del Proyecto, la altitud comienza a aumentar, llegando hasta los 3.200 metros.

Pendientes

La zona en que se ubicará el Proyecto corresponde a una meseta en la que la pendiente varía entre los 0º y 5º. Cabe mencionar que el área del Proyecto es un área plana que, en su mayoría, no presenta cambios de pendiente (pendiente = 0º). Sólo en una pequeña porción del borde occidental del polígono, la pendiente sobrepasa los 5º.

Exposición

El área del Proyecto se localiza en una zona llana, en la que no existe una orientación que domine.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

4.2.3 Morfología Asociada

Es posible inferir ciertas características geomorfológicas del área de influencia en función de la pendiente que ésta presente. De esta forma, se puede establecer que el Proyecto se emplazará en una planicie correspondiente a un depósito fluvial, en la que la textura del suelo bajo la costra salina es una mezcla de arcillas, limos y arenas. Según lo mencionado, este lugar corresponde a una llanura de inundación.

El Salar de Atacama se emplaza en una fosa prealtiplánica. Esta gran fosa es uno de los rasgos morfológicos más interesantes del extremo norte de Chile, donde es posible identificar un exacto alineamiento norte–sur, marcado por el acento tectónico de su origen y carácter endorreico.

El sector del Proyecto corresponde a una “llanura de inundación”, en la que la pendiente es casi nula pues no sobrepasa los 5º y la altura se mantiene prácticamente constante en los 2.300 m.s.n.m. El área del Proyecto se sitúa, en su totalidad, en el denominado Núcleo del Salar, el que corresponde a un cuerpo salino formado de costras duras de cloruro de sodio, pudiendo encontrarse también depósitos minerales de bórax, litio, sodio, potasio, calcio, etc.

5. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

5.1. Hidrología

El proyecto no posee un área de influencia directa, relacionada con la componente hidrológica, puesto que los procesos extractivos se circunscriben a la salmuera almacenada subterráneamente en el núcleo. Por otro lado, los planes de monitoreo propuestos, además de la existencia de una zona de baja permeabilidad en torno al núcleo, garantizan que en el área circundante al mismo, no se producirá influencia directa o indirecta apreciable. Es decir, las actividades productivas del titular no afectarán las condiciones hidrológicas naturales que sustentan las zonas húmedas y lagunas.

5.1.1 Contexto Regional

La red de drenaje de la cuenca hidrográfica del salar de Atacama, está constituida por quebradas y cauces, la mayor parte de ellos de flujo esporádico, ubicados alrededor del salar, en la cuenca de aporte superficial. Tales vías de drenaje, además de la escorrentía subterránea, alimentan las zonas húmedas de los bordes del núcleo.

La cuenca endorreica del salar de Atacama), cubre elevaciones entre los 2300 m.s.n.m. y los 6200 m.s.n.m. y posee una superficie de aproximadamente 17300 km^2.

La zona de menor elevación en la cuenca corresponde al núcleo de salar (2300 m.s.n.m.); éste tiene una superficie de aproximadamente 1600 km^2. En torno al núcleo, existen zonas húmedas de vegas, lagunas y bofedales que cubren una área de aproximadamente 1100 km^2, a este sector se le conoce como zona marginal).

Los principales cauces en el área de interés son los ríos San Pedro y Vilama, que fluyen de norte a sur, descargando en el área norte del salar). Además, existen aportes superficiales y subsuperficiales intermitentes en los bordes oriente y sur del salar. Los cauces ocasionales son alimentados por afloramientos y/o escorrentía pluvial; éstos permiten la existencia de oasis, tales como los de Toconao, Socaire, Peine y Tilomonte.

Como se ha indicado previamente, la salida del sistema se produce a través de evaporación desde lagunas, cuerpos de agua y zonas de vegas.

5.1.2 Contexto Local

Introducción

En la presente descripción se analizan los sistemas hídricos ligados con la componente hidrológica y ubicada en las áreas marginales del núcleo. En particular, se han estudiado las lagunas La Punta y Brava, localizadas en el extremo sur oriente del salar.

Lagunas

Tanto en el borde Este como en el Sureste del Salar se localizan cuerpos de agua salobre que se denominan genéricamente “Lagunas del Salar”. Su tamaño, está determinado principalmente por las precipitaciones y por la evaporación. Las lagunas son el hábitat de un gran número de aves en distintos estados de conservación. De acuerdo a información recopilada en la literatura, las lagunas varían de tamaño de acuerdo a la época del año y de año en año.

Cabe señalar que algunas de las lagunas localizadas en el borde Oriental del Salar forman parte de la Reserva Nacional Los Flamencos, específicamente las pertenecientes al sistema lacustre Soncor y al sistema lacustre Aguas de Quelana.

Dentro de los principales elementos de las zonas de lagunas y su relación con el núcleo y los acuíferos, se observa que existe una cuña salina que separa al agua dulce de los acuíferos de la salmuera del núcleo. Además, las lagunas se alimentan tanto de la escorrentía superficial,

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

que llega a éstas a través de cauces superficiales ocasionales y quebradas, como del afloramiento de agua subterránea. Cabe señalar que el flujo subterráneo aflora debido a que en esa zona existen estratos de baja permeabilidad que impiden que el agua dulce entre de manera directa al núcleo.

La calidad físico-química del agua de las lagunas depende de la cantidad de agua que llega a éstas desde la cuenca, tanto superficial como subterránea, pero además, depende de la posición de la cuña salina. De hecho, a medida que la cuña se encuentre más cercana al núcleo, más dulce será el agua en las lagunas y viceversa.

La comparación de imágenes satelitales en el periodo 1987-2008, análisis que se presenta en el capítulo 5 del presente estudio, permite concluir lo siguiente. La superficie de las lagunas presenta una importante variación (i.e., CV=75,5% La Punta y La Brava, CV=52,5% Salada, Saladita e Interna). En el caso del sistema de lagunas La Punta y La Brava, la superficie de agua va desde 76,6 ha en febrero de 1990 a 455,64 ha en mayo de 1997. Por otro lado, para el período analizado, la superficie de agua del sistema de lagunas Salada, Saladita e Interna alcanzó su mínimo en abril de 2008 con 62,46 ha y su máximo en marzo de 2002 con 227,07 ha.

5.2. Hidrogeología

El área de influencia directa del proyecto, relacionada con la componente hidrogeológica, es el medio permeable ubicado bajo la costra salina del núcleo del salar de Atacama, desde donde SCL extrae salmuera para sus procesos.

La existencia de una zona de baja permeabilidad en torno al núcleo impide que el efecto del bombeo se propague fuera de éste. Dicha barrera hidrogeológica, junto con el plan de monitoreo propuesto, garantizan que no se producirá influencia indirecta o directa apreciable en los márgenes exteriores al núcleo, es decir, en el área donde se ubican las lagunas y las zonas húmedas.

5.2.1 Hidrogeología Regional

El contexto regional corresponde a una visión global de la cuenca hidrográfica del salar de Atacama y algunas cuencas vecinas. El sistema hídrico asociado al Salar de Atacama incluye elementos de distintas naturalezas y dimensiones que interactúan, creando una unidad hidrológica e hidrogeológica de gran extensión y complejidad. Entre los elementos mencionados se cuentan:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

- Salar: costra formada por depósitos salinos, saturada con agua de elevada concentración de sales (salmuera).
- Cuenca hidrológica: corresponde al área de aporte al salar, según la red de drenaje superficial.
- Cuenca hidrogeológica: es el área de aporte al salar, según la escorrentía subterránea.

Existen varias cuencas endorreicas que circundan la cuenca hidrológica del Salar de Atacama, cuyas descargas son análogas a la de éste, es decir, por evaporación desde salares más pequeños o lagunas, que se ubican en las áreas de menor elevación de cada cuenca.

Estas cuencas podrían estar conectadas subterráneamente con el Salar de Atacama, puesto que existen medios compuestos por rocas volcánicas alteradas y sedimentos cuaternarios que podrían constituir vías de conexión. Análogamente, la cuenca del Salar de Atacama, podría estar conectada subterráneamente con cuencas de elevación inferior, ubicadas hacia el poniente. No existen, en el área, unidades geológicas asociables al basamento impermeable que permitan establecer divisorias hidrogeológicas, salvo el Cordón de Chinquilchoro, cuyo extremo norte corresponde a la Península de Chepica.

De lo anterior se desprende que la cuenca hidrogeológica asociada al salar de Atacama, no coincide necesariamente con la cuenca hidrológica, definida por las divisorias de aguas.

En cada una de las 3 componentes geográficas, el agua (con distintas concentraciones de sales) entra, fluye o sale del sistema, de diversas formas.

El agua ingresa como precipitación nival y pluvial, fluye superficial y subterráneamente, saliendo por evaporación y evapotranspiración. Lo anterior se refiere exclusivamente a procesos naturales; si se agrega la componente humana, se deben contabilizar entre las descargas, las extracciones artificiales.

La escorrentía total (superficial + subterránea) que se genera, depende de la precipitación, evaporación y evapotranspiración, infiltración y conductividades hidráulicas, verticales y horizontales de los medios subterráneos, entre otros.

Según un balance directo, la recarga total de la cuenca de aporte efectivo al salar (cuenca hidrogeológica) debería coincidir con el caudal evaporado desde los bordes del núcleo, el cual, según las estimaciones de Mardones, es de aproximadamente 5.4 m^3/s (caudal promedio anual). Por lo tanto, la recarga efectiva promedio, que recibe la cuenca del salar debe ser de aproximadamente 5.4 m^3/s.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Las demandas hídricas en el área provienen principalmente de la minería; para ese uso, actualmente se extraen del orden de 2 m^3/s de agua subterránea, bombeados desde los volúmenes almacenados en acuíferos de agua dulce que rodean el salar.

Los usos domésticos y agrícolas, son menores y se abastecen por flujos superficiales estacionales y captaciones subsuperficiales (norias).

En el núcleo mismo, la salmuera almacenada se explota como un recurso minero.

5.2.2 Hidrogeología Local

A nivel local, es necesario analizar el núcleo del salar de Atacama y su entorno directo que corresponde a su borde húmedo. En él descargan las quebradas, cauces y acuíferos circundantes, originando lagunas, vegas y bofedales.

Medios permeables

El núcleo del salar presenta una estratigrafía variable. A nivel global se pueden diferenciar algunas zonas de características transmisivas y de almacenamiento semejantes. En los bordes del núcleo se han detectado estratos de muy baja permeabilidad, cuya existencia es consistente con la génesis geológica del núcleo. Se estima que la permeabilidad de esa zona debería tener valores entre $1 \cdot 10^{-6}$ y $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

En el núcleo mismo (ver 19), el medio subterráneo en los primeros 30 a 40 m de profundidad, tiene por lo general una permeabilidad mayor a $1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Ésa área constituye la reserva mineralógica de salmuera del salar. Sin embargo, existen zonas de baja permeabilidad intercaladas con áreas más transmisivas, originando un medio conductivamente heterogéneo.

Bajo los 40 m de profundidad, se han detectado predominantemente capas arcillosas y cementadas.

Niveles de Salmuera

SCL ha monitoreado los niveles de salmuera en el núcleo desde agosto de 1989 hasta la fecha. Se cuenta con 29 puntos de control de salmuera en el núcleo y con 2 puntos de monitoreo de agua dulce; estos últimos ubicados en las áreas de Tilopozo y Tucúcaro. Es posible apreciar los ascensos en el nivel de salmuera debido a las lluvias de 2001 y 2002. También es posible observar que la recarga por lluvia no es capaz de reestablecer la tendencia descendente que precede al evento.

Solicitaciones Externas

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

La componente exógena del sistema está asociada principalmente al bombeo de salmuera por parte de SCL y SQM.

SCL extrae salmuera desde 1984 hasta la fecha, con caudales promedios anuales de 142 L/s, contemplándose un incremento de 600 L/s que se aplicará escalonadamente durante los próximos 30 años. Por otro lado, SQM comenzó a explotar el salar el año 1995, y se le ha autorizado un caudal total de explotación máximo futuro de 1.700 L/s.

El aumento proyectado en la extracción de salmuera por parte de SCL, es de aproximadamente 600 L/s promedio del Proyecto, los que se sumarían al promedio actual de 142 l/s.

Recarga y descarga del núcleo

En el contexto regional se abordó la recarga y descarga de la cuenca completa del salar, en este punto se analizan elementos análogos, pero considerando al núcleo del salar como volumen de control.

Como se analizó en los puntos anteriores, las descargas del núcleo son la evaporación y el bombeo de salmuera. La primera es, según las estimaciones de Mardones, del orden de 100 l/s. La extracción ha sido creciente en el tiempo y se proyectan incrementos en el futuro.

Antes que comenzara la explotación del recurso minero en el núcleo (salmuera), éste se mantuvo en una condición de saturación estable, con niveles de salmuera en torno a 0.8 m de profundidad, medidos desde el nivel de la costra. Para que eso haya ocurrido, necesariamente, el sistema debió haber estado en equilibrio, lo que implica que el caudal entrante era muy semejante al saliente.

La recarga al núcleo proviene de la infiltración de la lluvia que cae sobre el salar y los flujos subterráneos que entran al núcleo desde los bordes. La recarga por lluvia promedio más el flujo subterráneo pasante, deberían ser del mismo orden de la evaporación promedio, es decir, aproximadamente 100 l/s. Lo anterior obedece a lo expresado en el párrafo anterior con relación al equilibrio del núcleo.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Anexo 5.1

Análisis de la Variación en la Superficie de las Lagunas Salada, Saladita, Interna, La punta y la Brava.

Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

ÍNDICE

1. Introducción 1
2. Metodología 1
2.1 Imágenes 1
2.2 Identificación de Cuerpos de Agua 2
3. Resultados 5
3.1 Superficie de la Lagunas 5
4. Conclusiones 20

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN EN LA SUPERFICIE DE AGUA DE LAS LAGUNAS SALADA, SALADITA, INTERNA, LA PUNTA Y LA BRAVA, EN EL SALAR DE ATACAMA, MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES MULTI-TEMPORALES

1. Introducción

A continuación se presenta un análisis de la variación en la superficie de agua de las lagunas Salada, Saladita, Interna, La Punta y La Brava, en el Salar de Atacama, mediante imágenes satelitales multi-temporales. Este análisis tiene por objetivo determinar la variación en la superficie de agua de estas lagunas en el período 1985-2008.

2. Metodología

2.1 Imágenes

Para analizar la variación de la superficie de agua de las lagunas, se utilizaron imágenes satelitales Landsat (i.e., Landsat 5 TM, Landsat 7 +ETM) ya que son el único tipo de imágenes disponibles para hacer un análisis multi-temporal adecuado. El criterio de selección de las imágenes fue la época del año, de esta forma se considera la variación anual de la superficie de las lagunas tratando de evitar la variación estacional. De acuerdo a este criterio, y considerando que sólo existen imágenes disponibles en ciertas fechas de cada año, se utilizaron imágenes tomadas entre enero y mayo durante el período que se quería caracterizar, esto es desde el 1985 hasta el presente.

Las imágenes utilizadas en este análisis son:

Tabla 1: Imágenes utilizadas en el análisis

Imágen	Escala	Resolución espacial	Sector	Fecha
Landsat 5 (TM)	-	30 m	Lagunas La Punta y La Brava / Salada, Saladita e Interna	30-03-1985
Landsat 5 (TM)	-	30 m	Lagunas La Punta y La Brava / Salada, Saladita e Interna	24-02-1990
Landsat 5 (TM)	-	30 m	Lagunas La Punta y La Brava / Salada, Saladita e Interna	02-05-1997
Landsat 7 (+ETM)	-	30 m	Lagunas La Punta y La Brava / Salada, Saladita e Interna	31-03-2000

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Imágen	Escala	Resolución espacial	Sector	Fecha
Landsat 7 (+ETM)	-	30 m	Lagunas La Punta y La Brava / Salada, Saladita e Interna	21-03-2002
Landsat 7 (+ETM)	-	30 m	Lagunas La Punta y La Brava / Salada, Saladita e Interna	14-04-2008

2.2 Identificación de Cuerpos de Agua

Las lagunas analizadas no forman cuerpos de agua individuales, sino que conforman un sistema de lagunas y charcos cuya forma y tamaño varían. Por lo tanto, debido a la dificultad para identificar cada una de las lagunas se optó por analizar dos áreas que contuvieran los principales cuerpos de agua de cada sistema (i.e., Sistema de Lagunas La Punta y La Brava; y Sistema de Lagunas Salada, Saladita e Interna). Para definir estos sectores se consideró la máxima extensión de las lagunas en los años analizados, esta correspondió al año 1997 (Tabla 2, Plano Sectores Analizados).

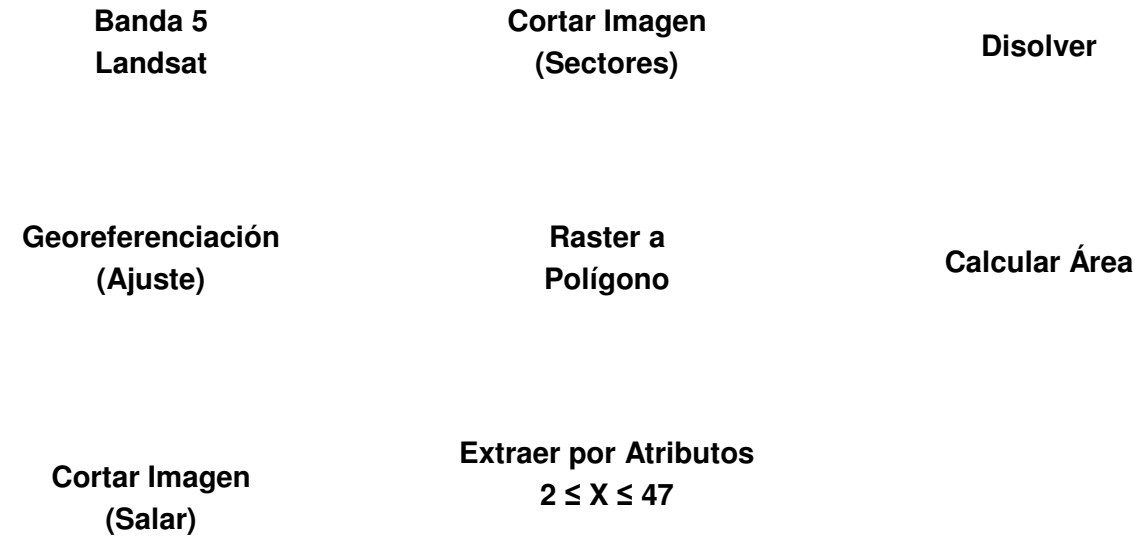
Tabla 2: Coordenadas de los sectores analizados

Sector	Coordenadas UTM WGS84		Superficie (ha)
	Este	Norte	
Lagunas La Punta y La Brava	570.000	7.381.000	9.900
	581.000	7.381.000	
	581.000	7.372.000	
	570.000	7.372.000	
Lagunas Salada, Saladita e Interna	581.000	7.385.000	10.000
	591.000	7.385.000	
	591.000	7.375.000	
	581.000	7.375.000	

La identificación de los cuerpos de agua en las imágenes Landsat se realizó usando la metodología descrita por Frazier y Page (2000[1]). Esto es, se seleccionaron los pixeles dentro del rango 2 a 47 de la Banda 5 Infrarrojo Medio. Para el análisis de imágenes se usó el programa ArcGIS 9.2.

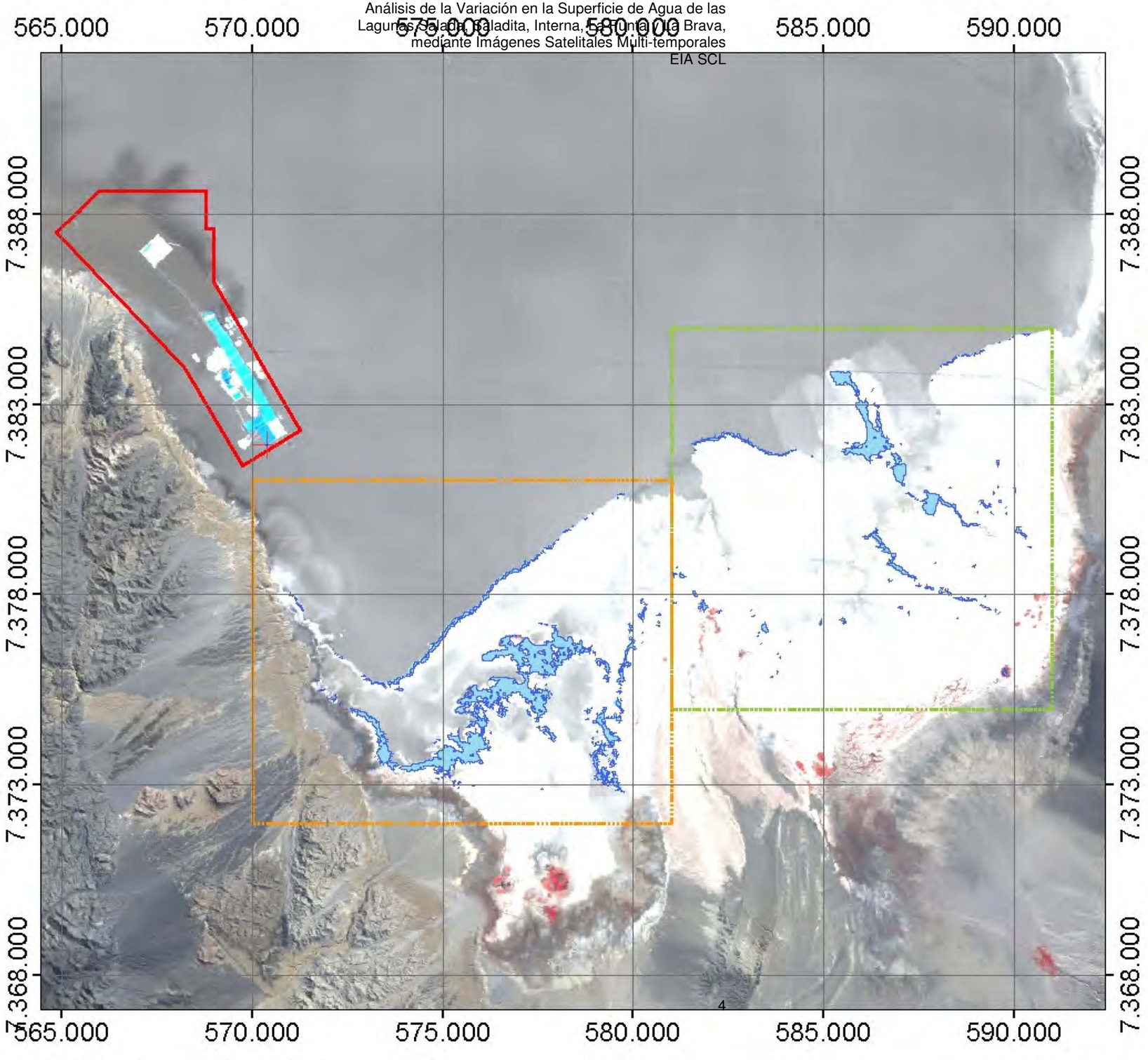
[1] Frazier, P. S. and Page, K. J. 2000. Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 66(12): 1461-1467.

Figura 1: Modelo utilizado para el análisis de imágenes



Fuente: Elaboración propia

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



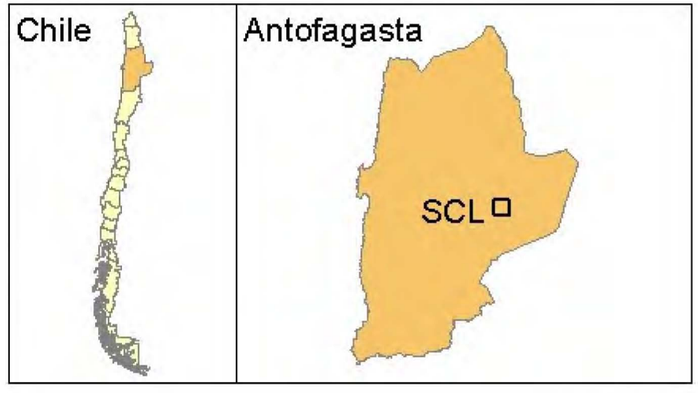
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sectores Analizados

Leyenda:

- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL
- Agua (1997)



Escala: 1:110.000

00,51 2 3 4 5 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

3. Resultados

3.1 Superficie de la Lagunas

La superficie de las lagunas obtenida a partir del análisis realizado para cada una de las imágenes se presenta en la Tabla 3. Los planos a continuación, muestran la superficie de las lagunas en las fechas analizadas.

Tabla 3: Superficie de las Lagunas

Fecha	La Punta y La Brava	Salada, Saladita e Interna	Imagen
30-03-1985	156,65 ha	212,71 ha	Landsat 5 TM
24-02-1990	76,60 ha	71,04 ha	Landsat 5 TM
02-05-1997	455,64 ha	177,71 ha	Landsat 5 TM
31-03-2000	95,37 ha	64,99 ha	Landsat 7 +ETM
21-03-2002	148,50 ha	227,07 ha	Landsat 7 +ETM
14-04-2008	99,87 ha	62,46 ha	Landsat 7 +ETM
Promedio	172,11 ha	136,00 ha	-
Desviación estándar	130,01 ha	71,40 ha	-
Coeficiente de Variación	75,5%	52,5%	-

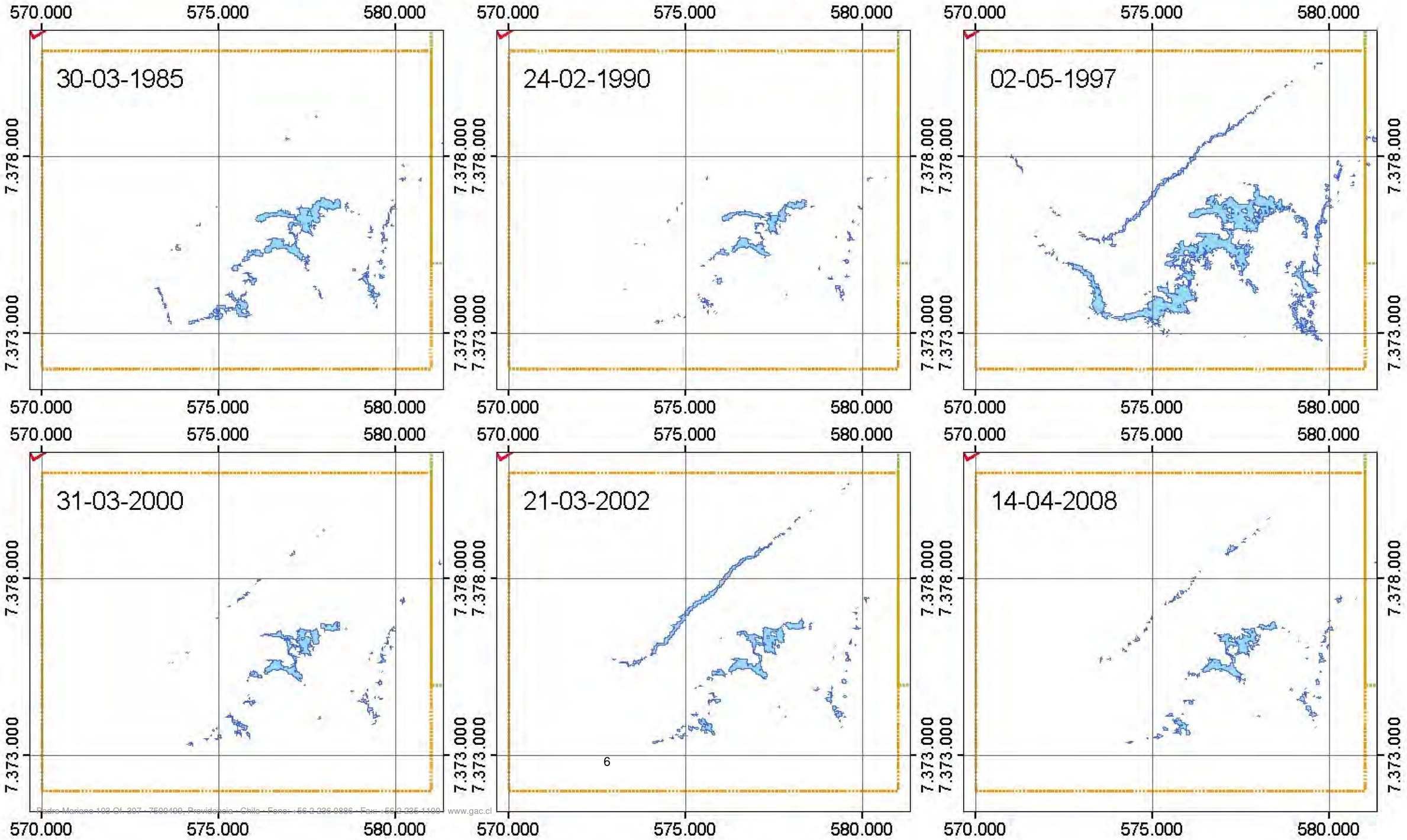
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Sistema de Lagunas La Punta y La Brava

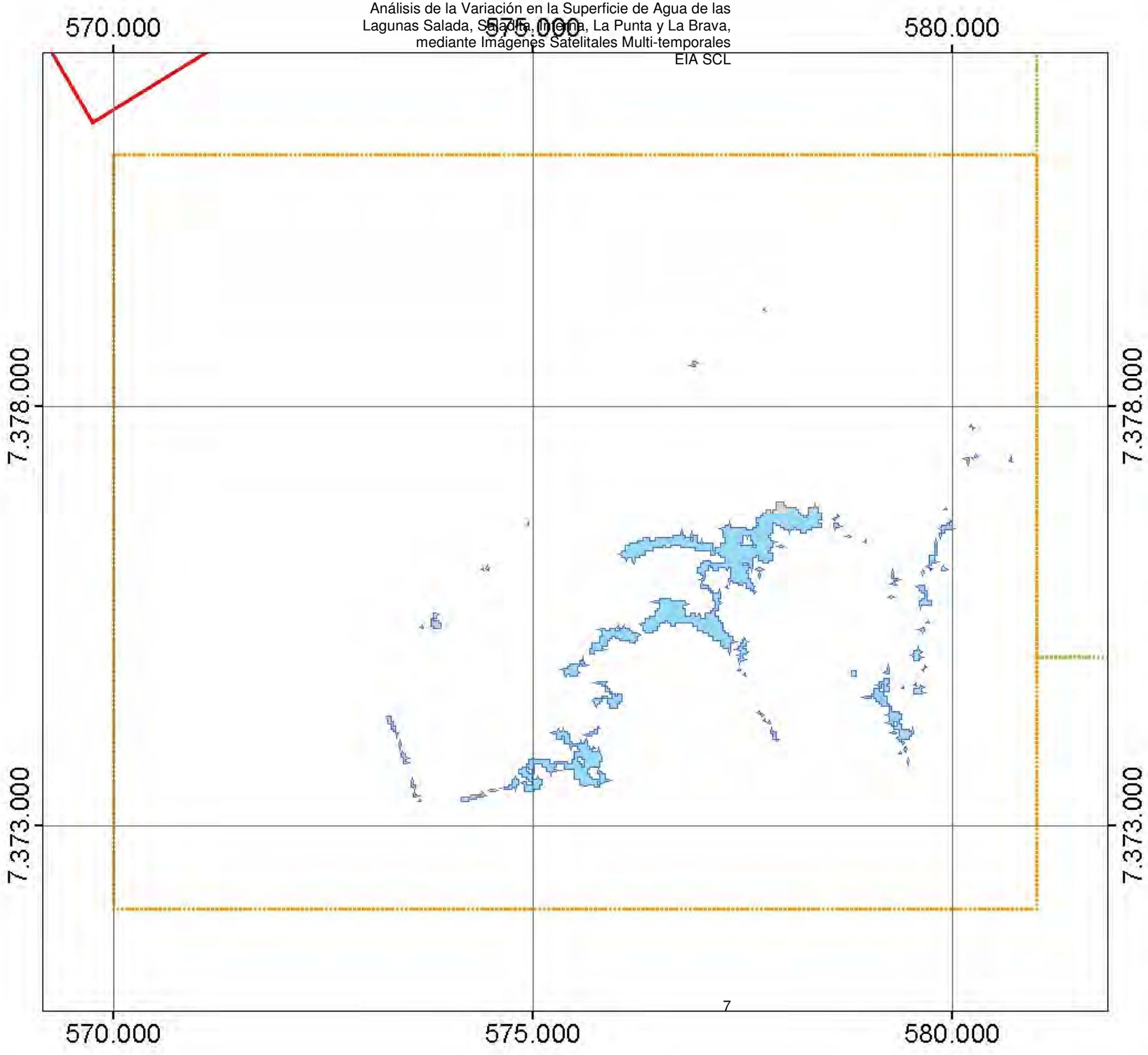
Análisis de la Variación en la Superficie de Agua de las Lagunas Salada, Saladita, Interna, La Punta y La Brava, mediante Imágenes Satelitales Multi-temporales
EIA SCL

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.

Agua | Sistema La Punta y La Brava | Sistema Salada, Saladita e Interna | SCL



Pedro Mariano 103 Of. 207 - 7500400, Providencia - Chile - Fono: (56-2) 236 0886 - Fax: (56-2) 235 1100 - www.gac.cl



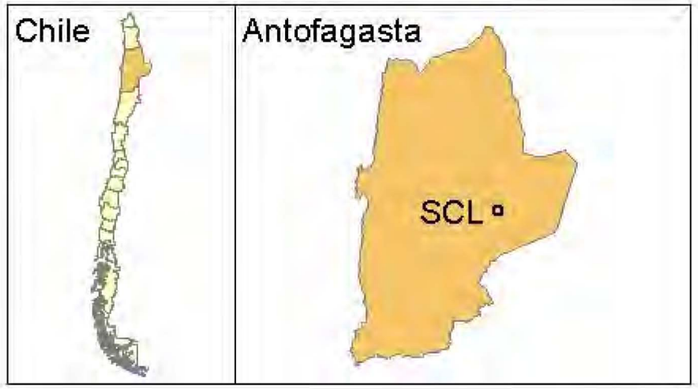
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas La Punta y La Brava 30/03/1985 Landsat 5 TM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



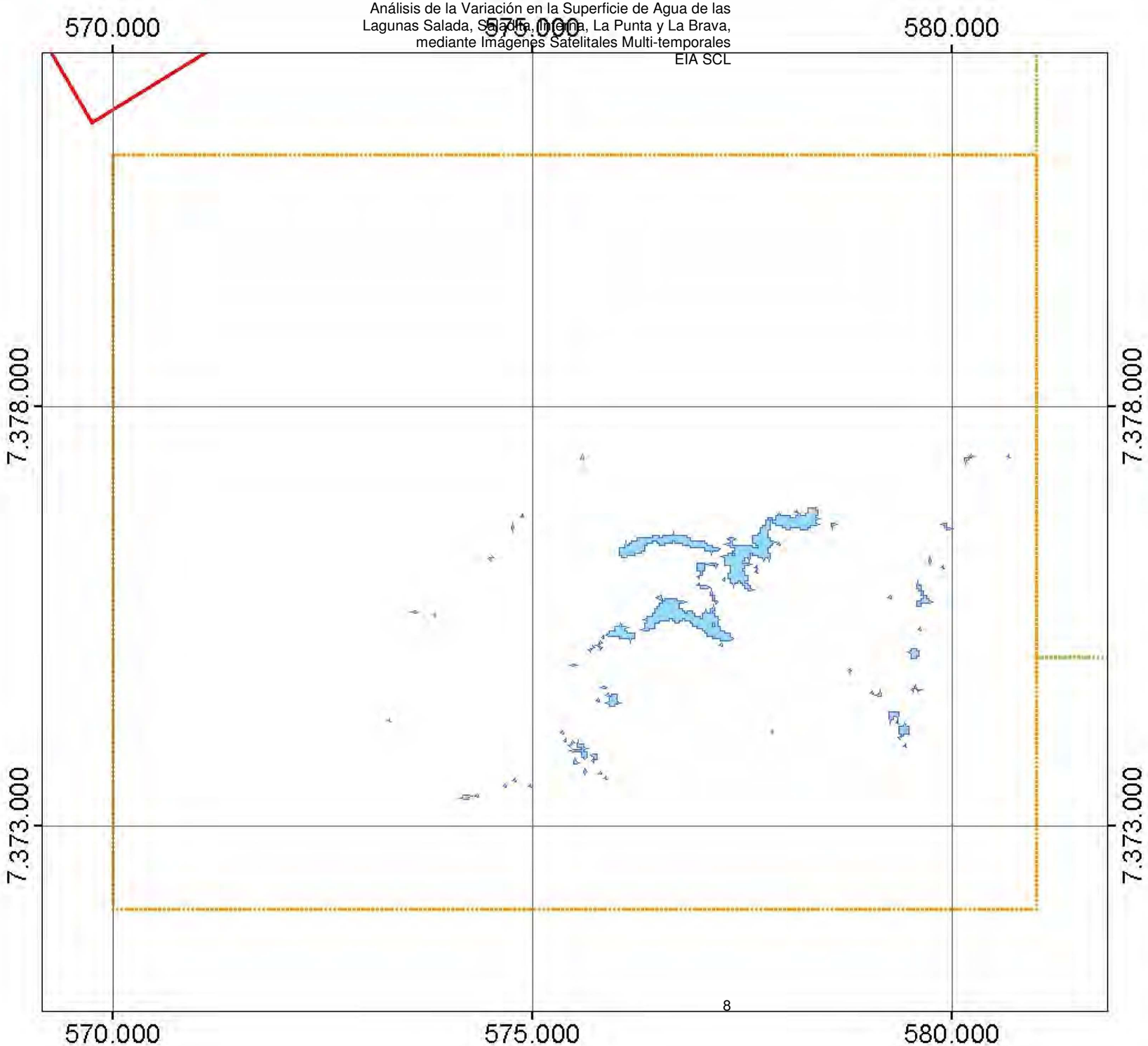
Escala: 1:50.000

0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES



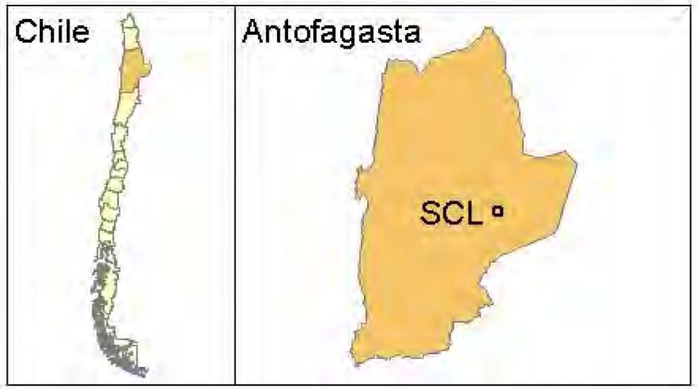
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas La Punta y La Brava 24/02/1990 Landsat 5 TM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

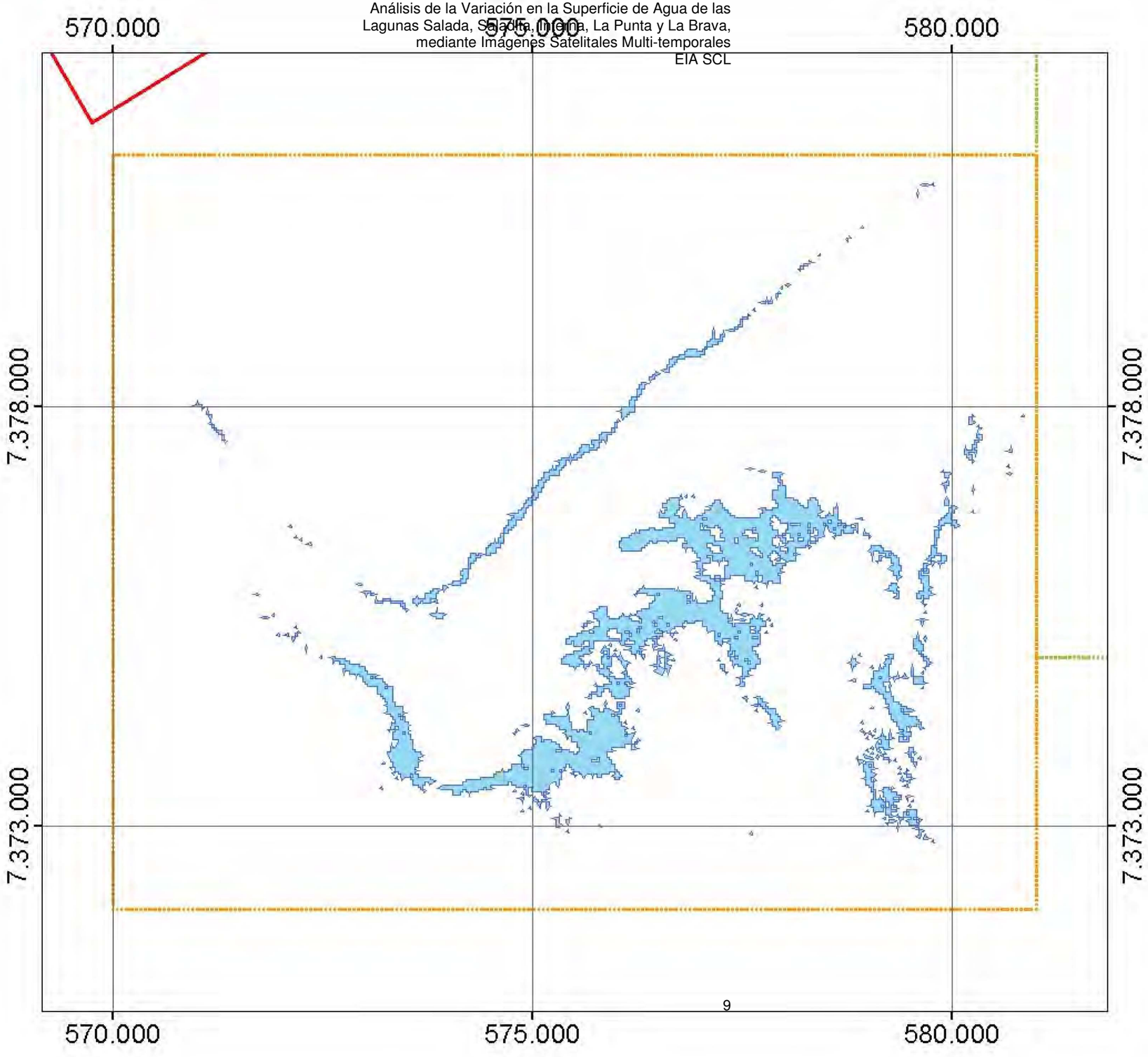
0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



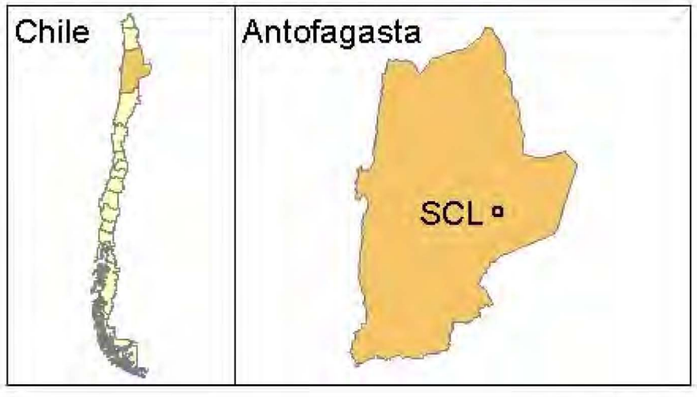
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas La Punta y La Brava 02/05/1997 Landsat 5 TM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

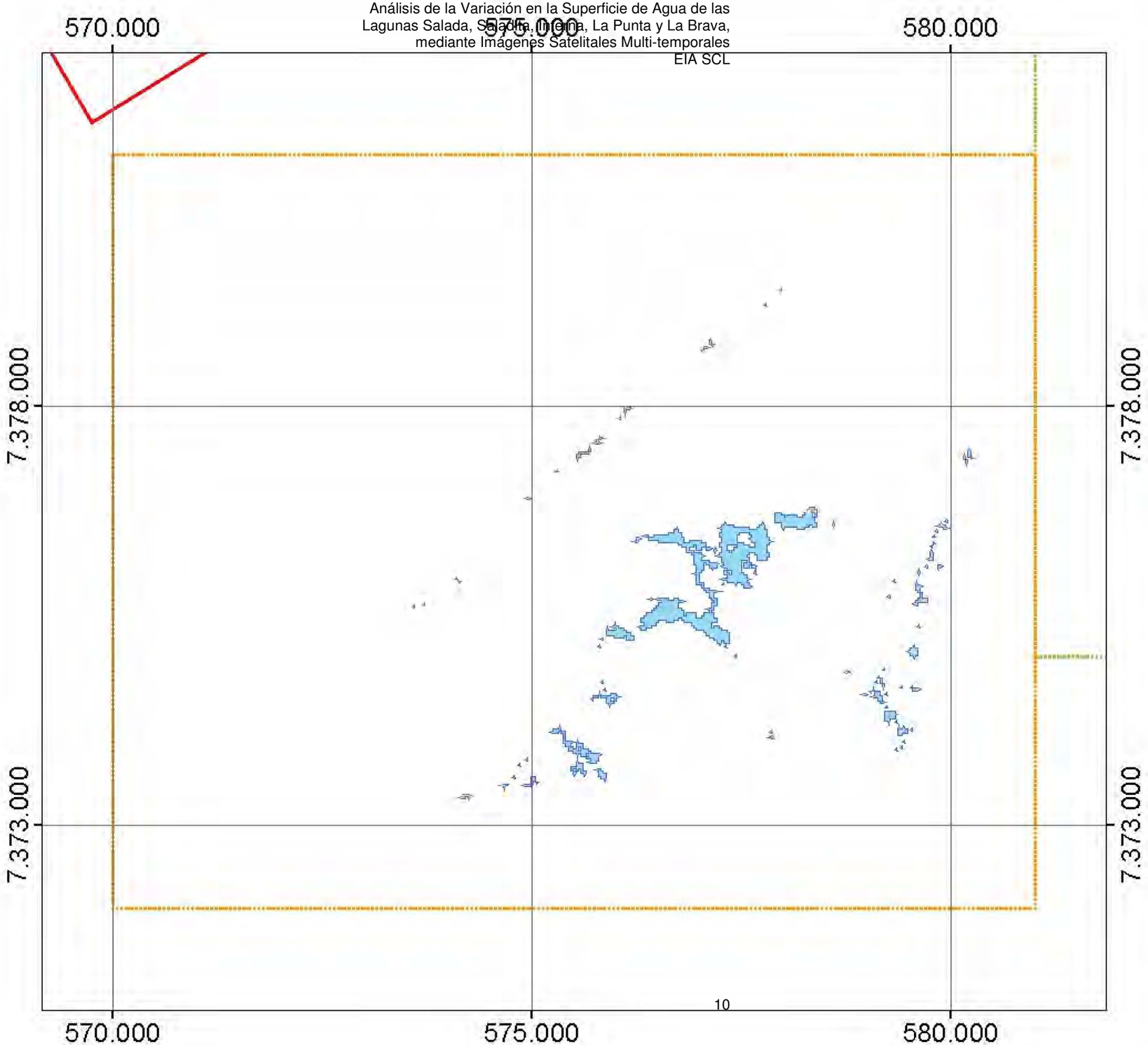
0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



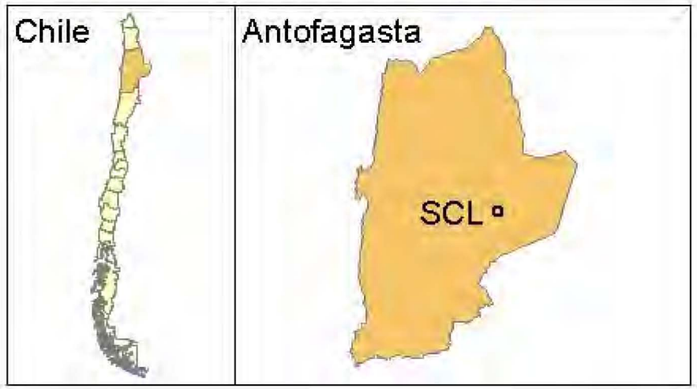
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas La Punta y La Brava 31/03/2000 Landsat 7 +ETM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

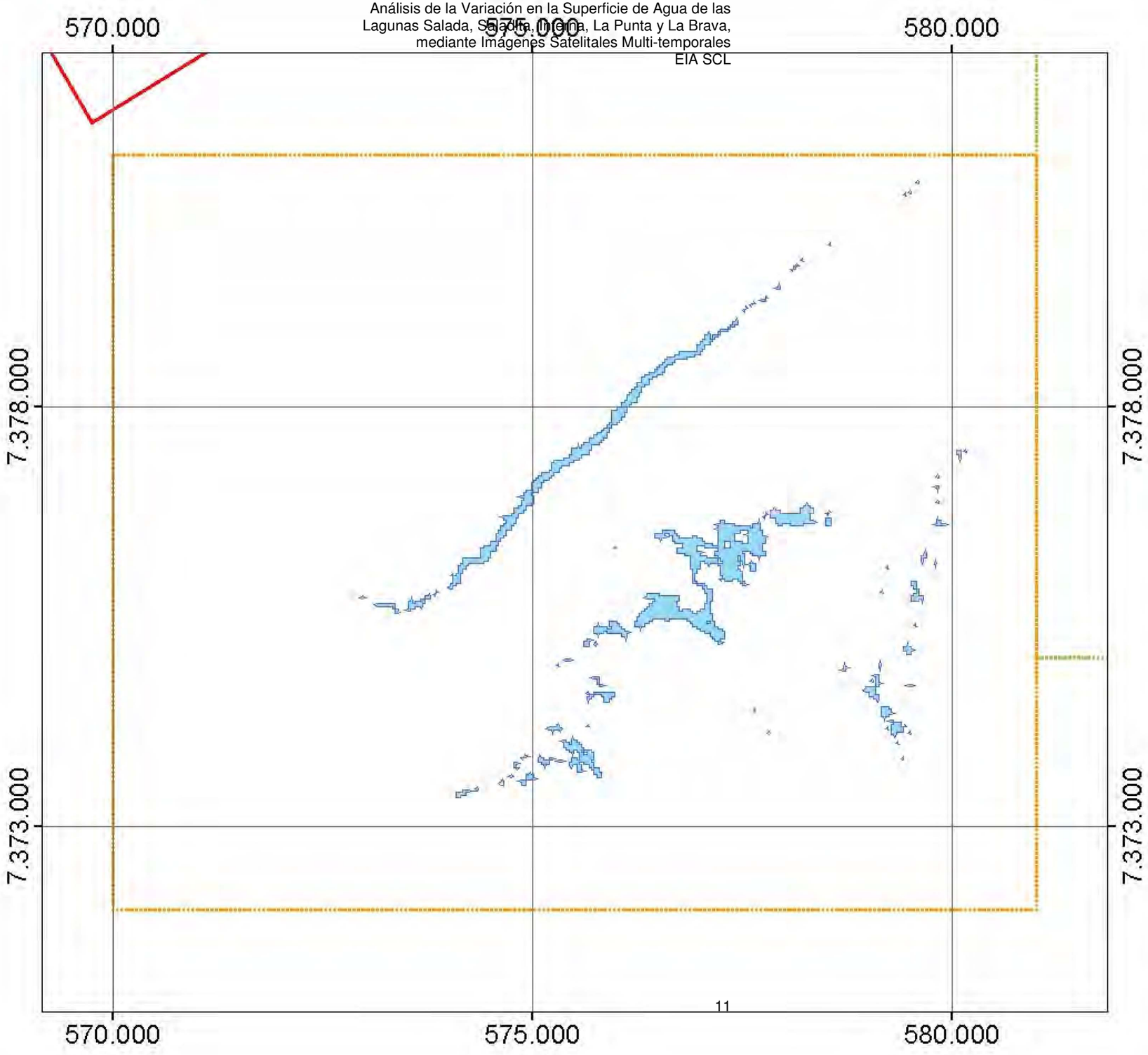
0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



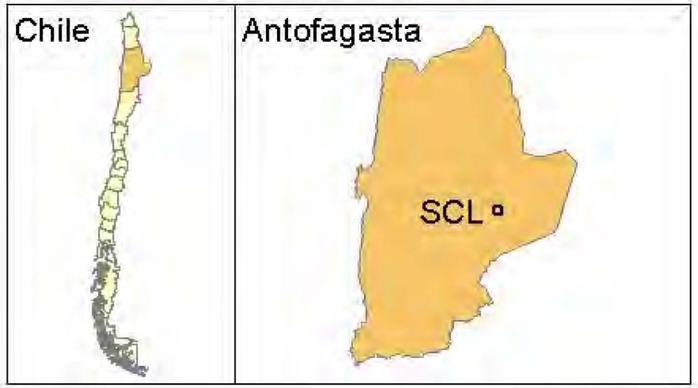
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas La Punta y La Brava 21/03/2002 Landsat 7 +ETM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

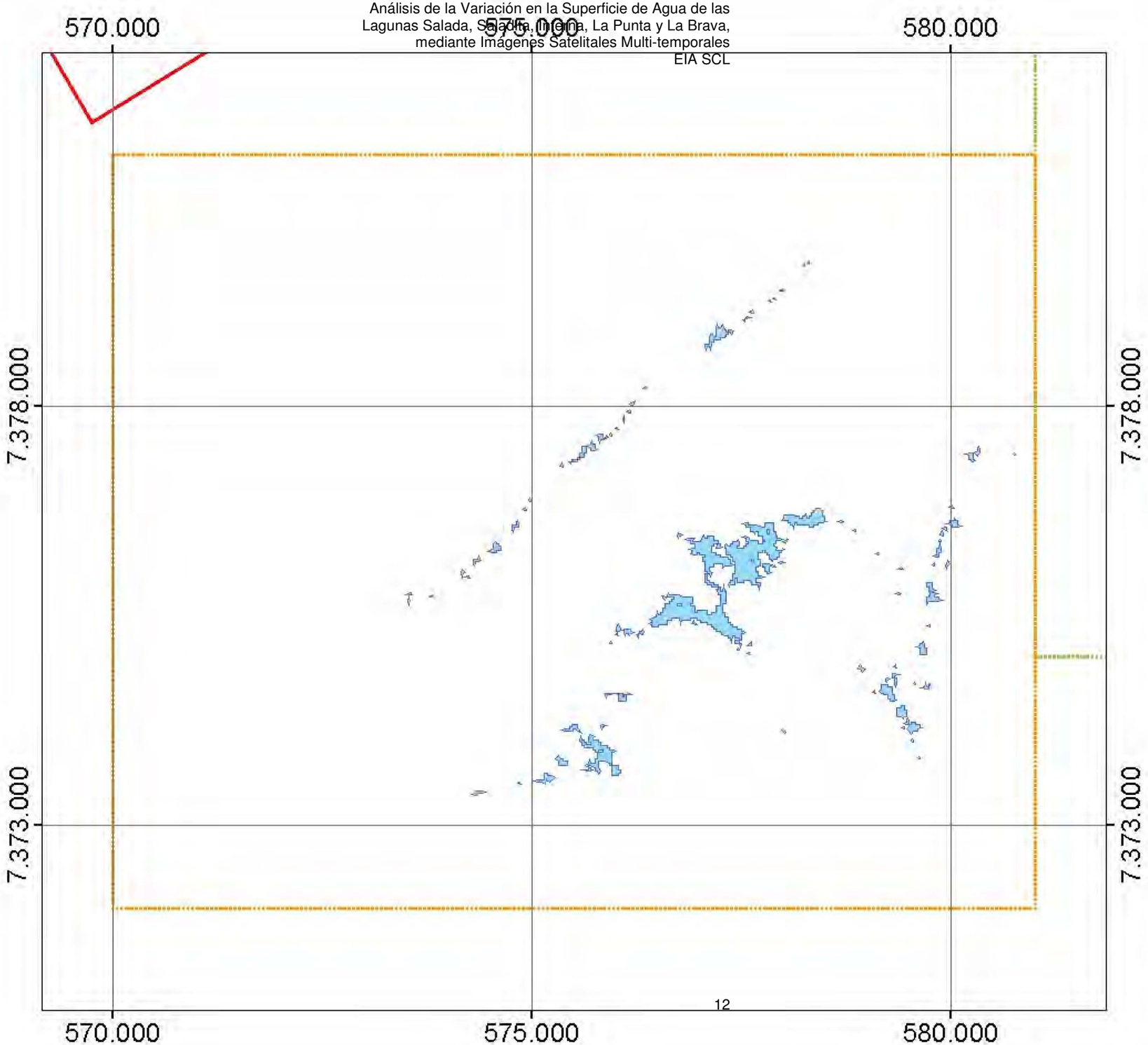
0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



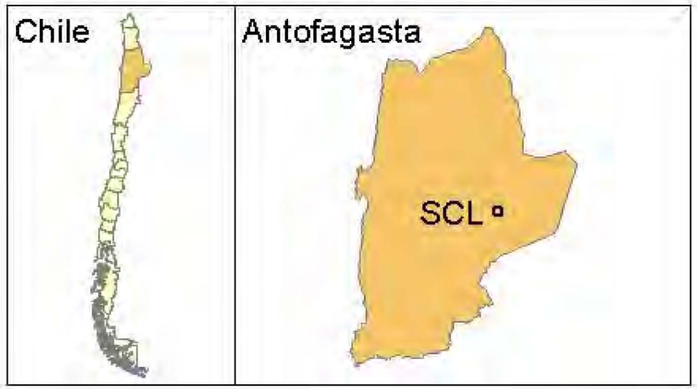
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas La Punta y La Brava 14/04/2008 Landsat 7 +ETM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

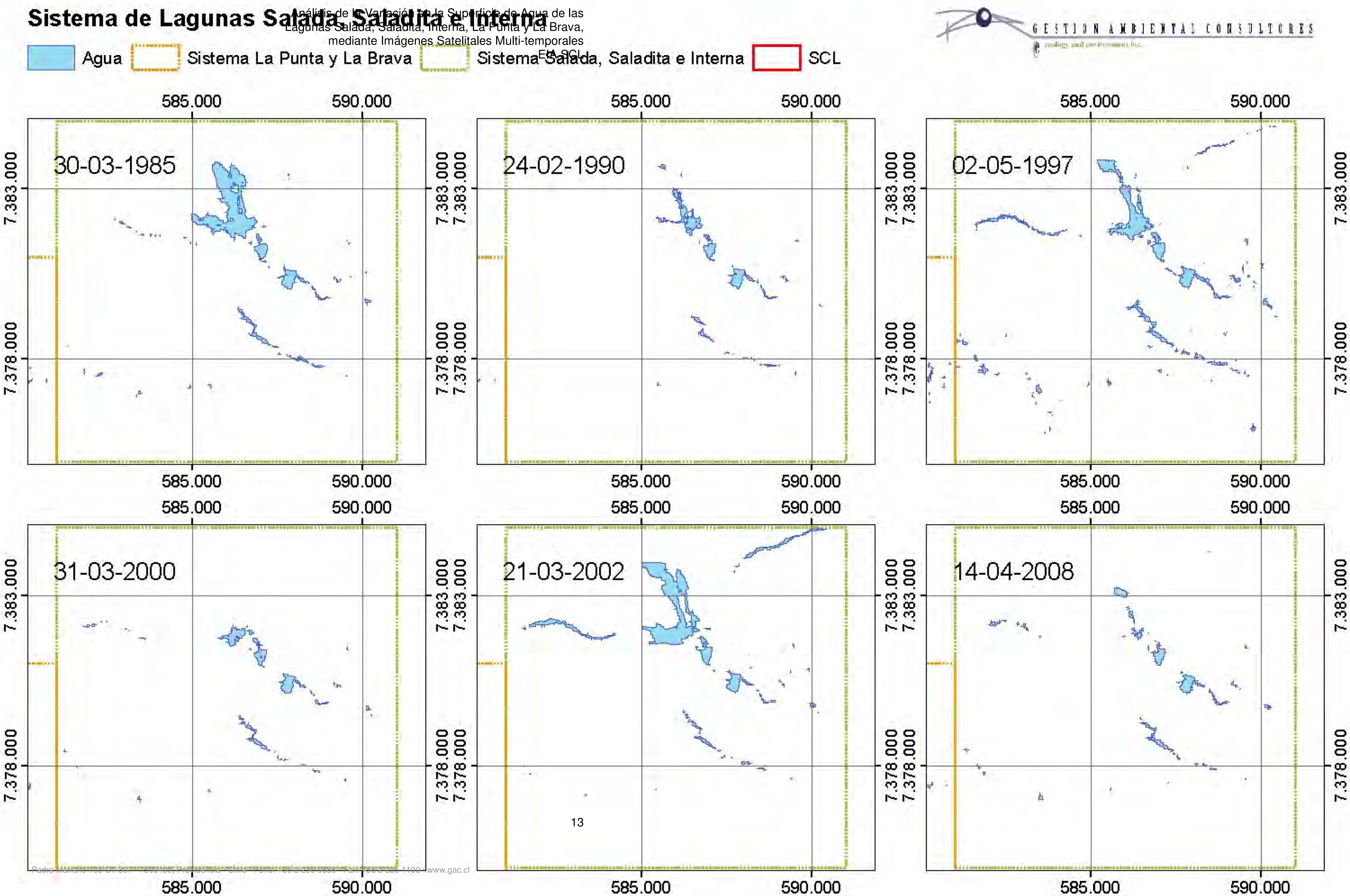
0 0,5 1 2 3 4 km

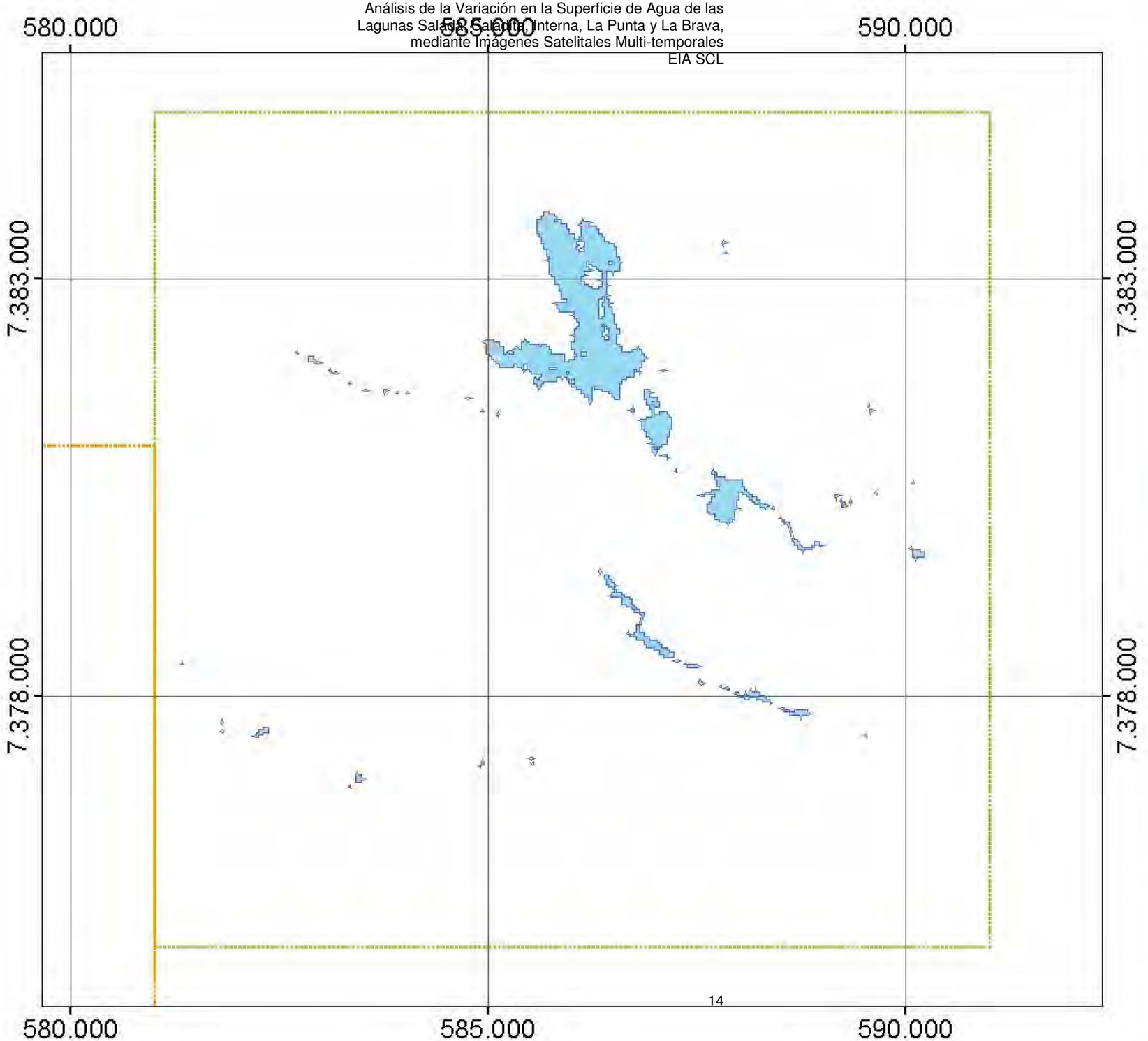
Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl


Sistema de Lagunas Salada, Saladita e Interna
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
Agua
Sistema La Punta y La Brava
Sistema Salada, Saladita e Interna
SCL
30-03-1985
24-02-1990
02-05-1997
31-03-2000
21-03-2002
14-04-2008
585.000
590.000
7.383.000
7.378.000



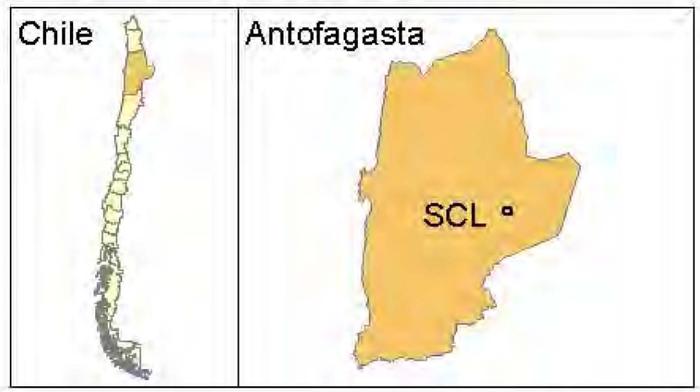
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas Salada, Saladita e Interna 30/03/1985 Landsat 5 TM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

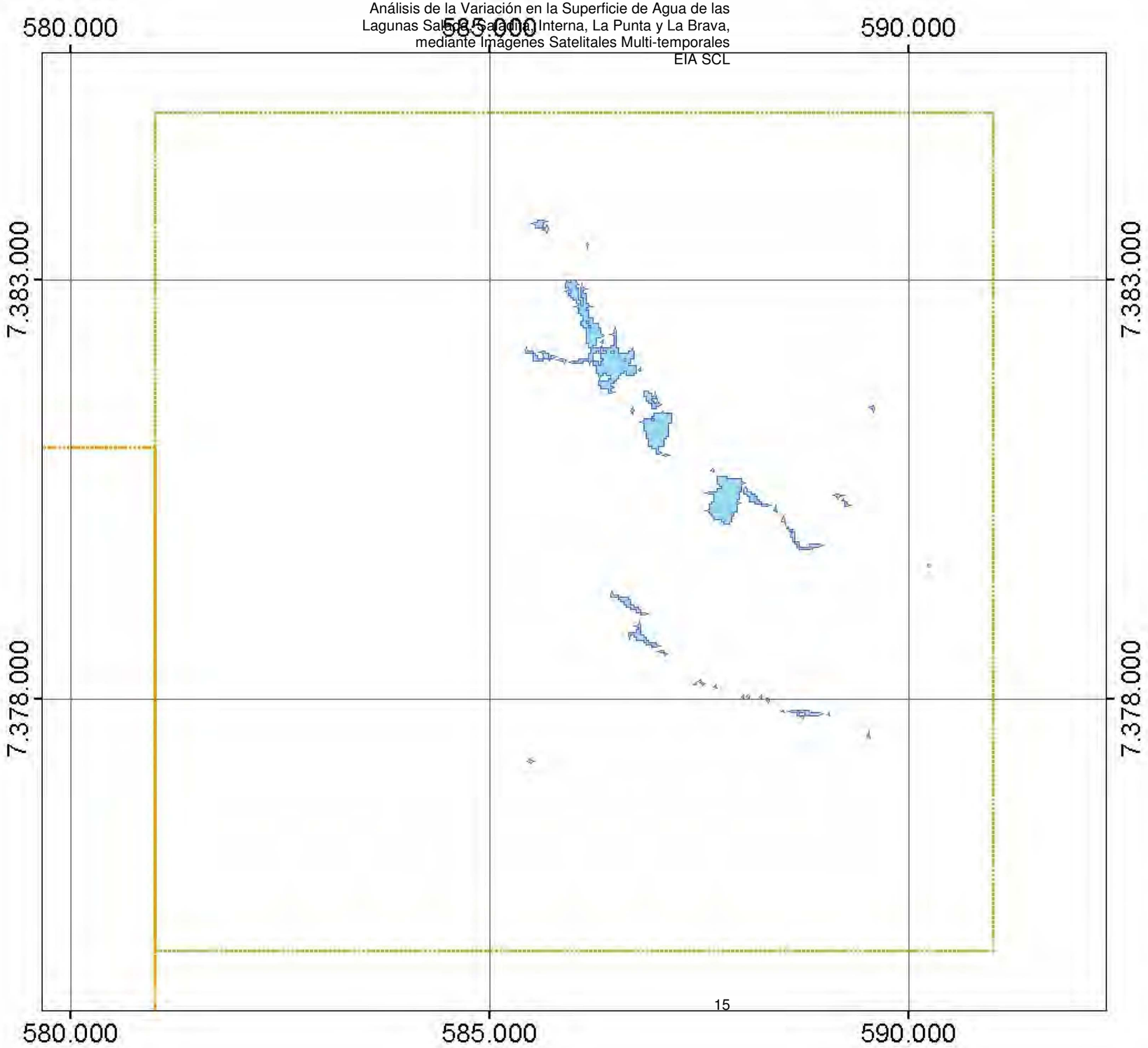
0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



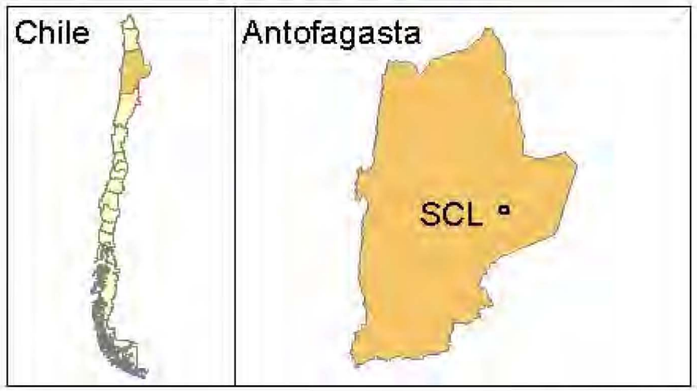
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas Salada, Saladita e Interna 24/02/1990 Landsat 5 TM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



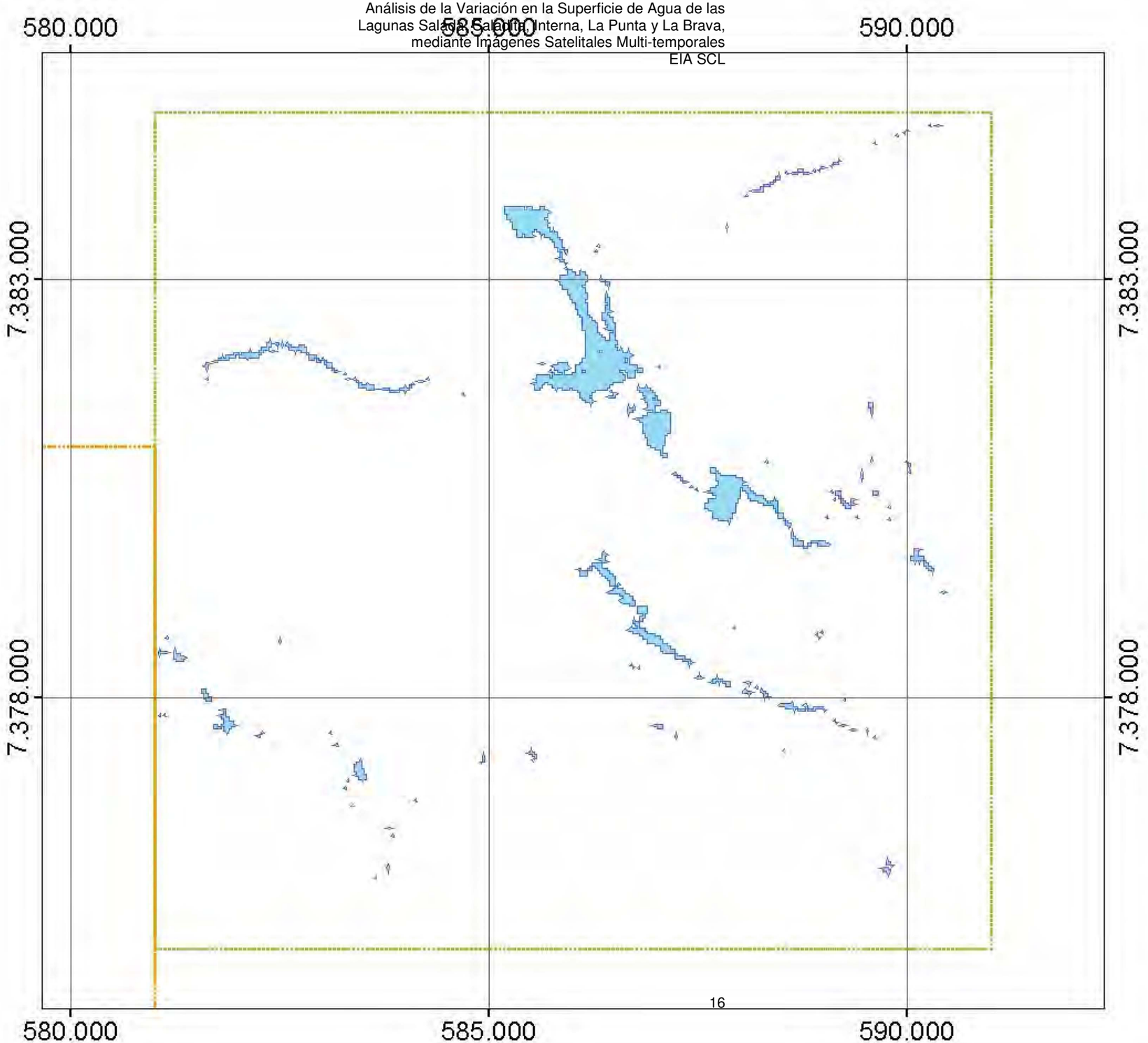
Escala: 1:50.000

0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES



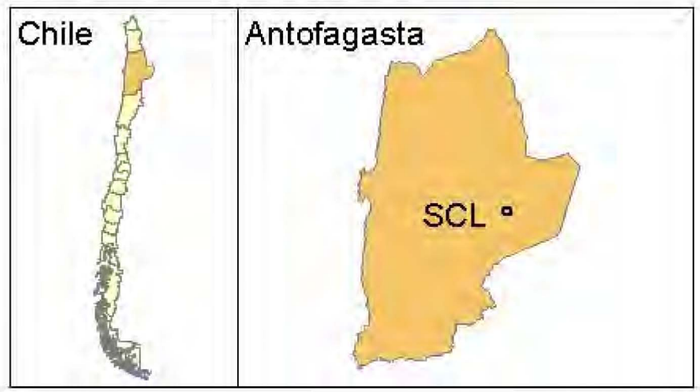
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas Salada, Saladita e Interna 02/05/1997 Landsat 5 TM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

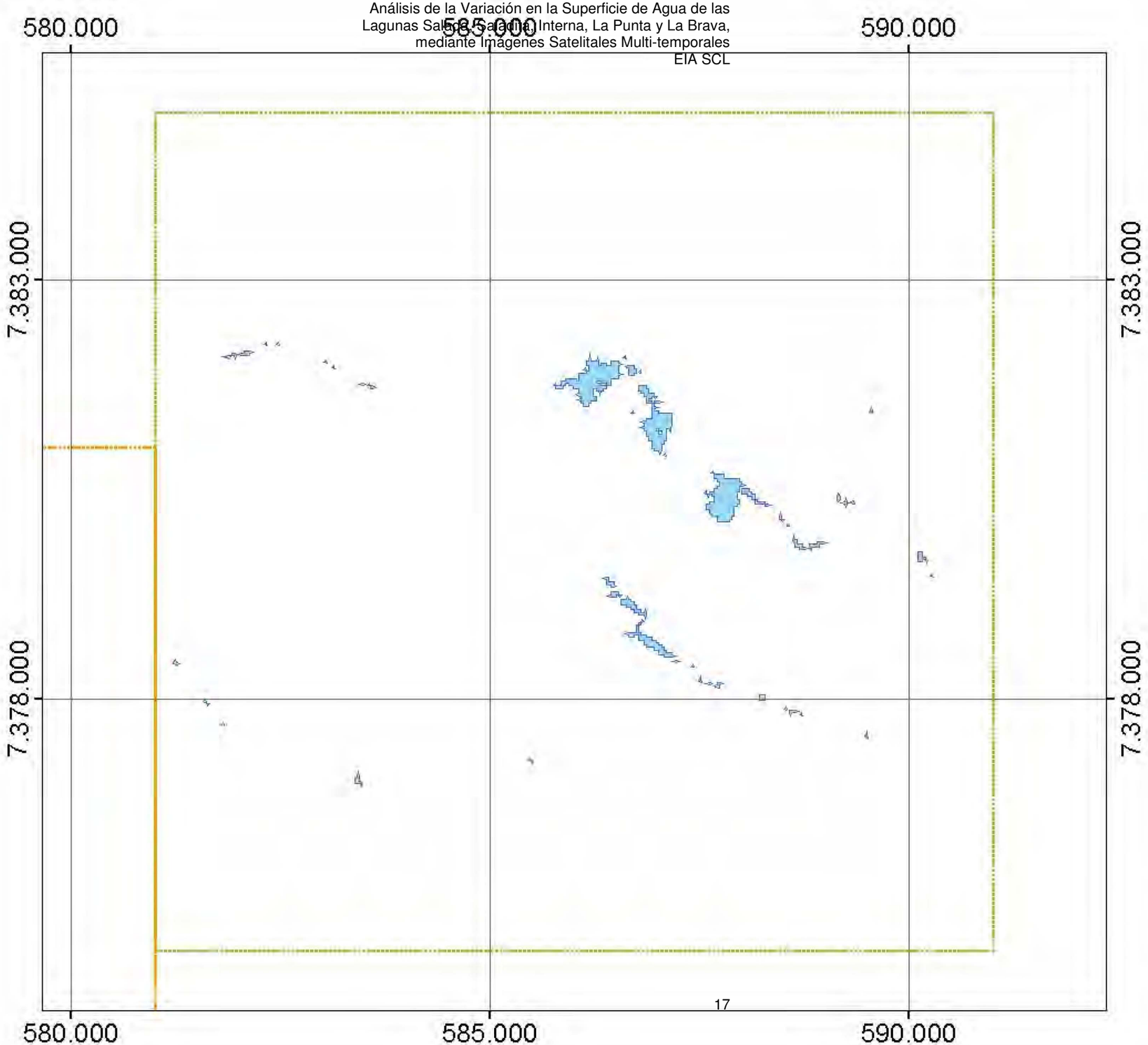
0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



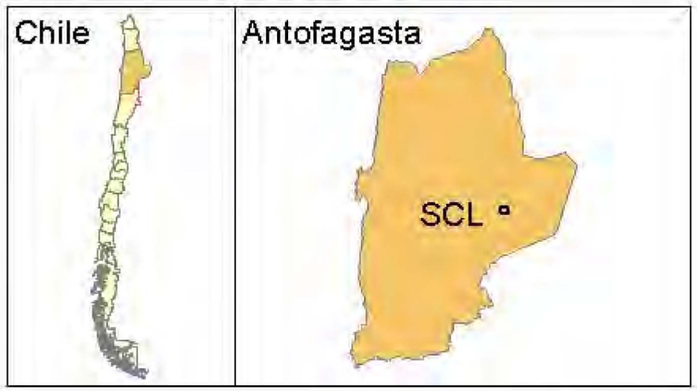
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas Salada, Saladita e Interna 31/03/2000 Landsat 7 +ETM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

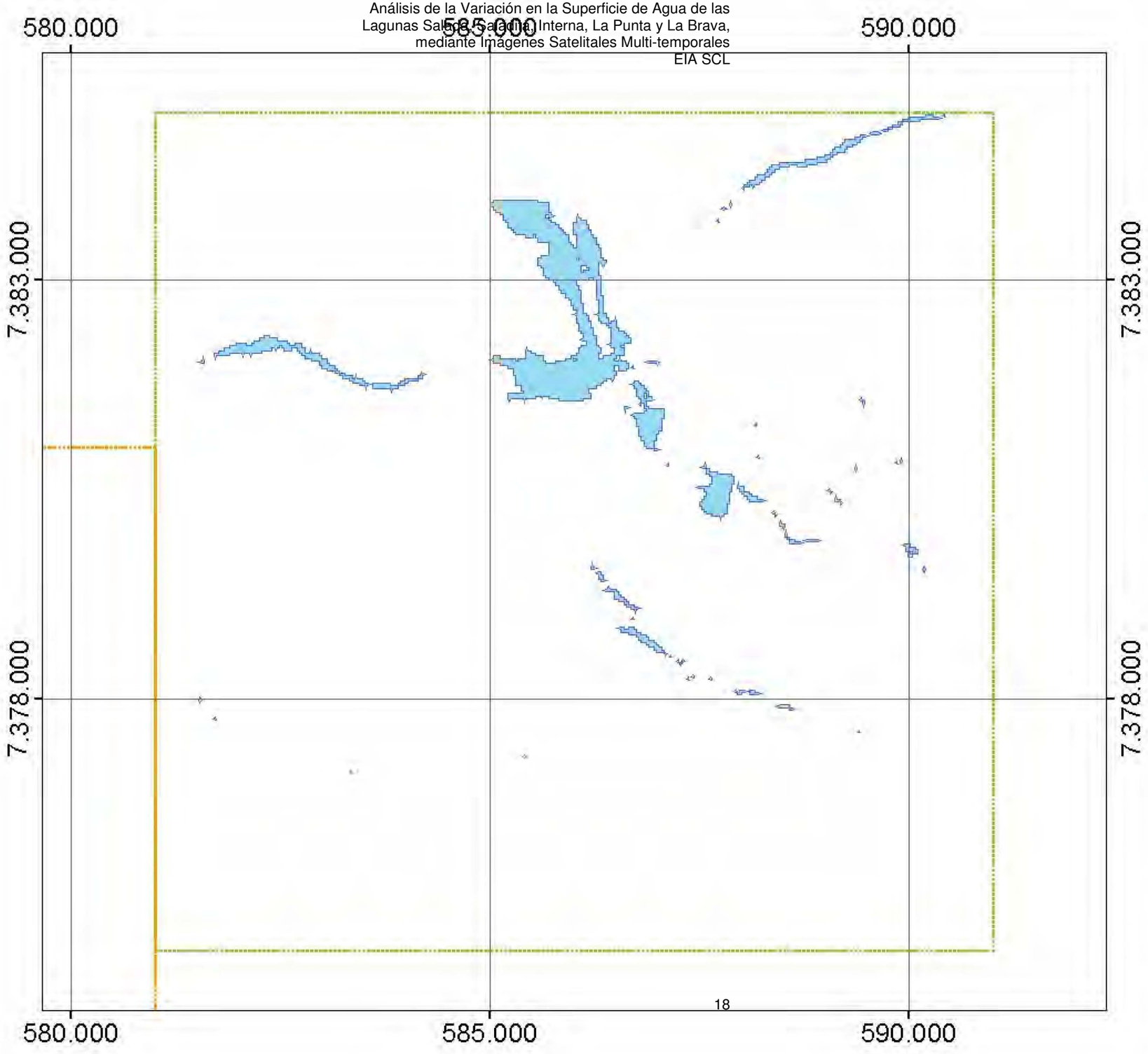
0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



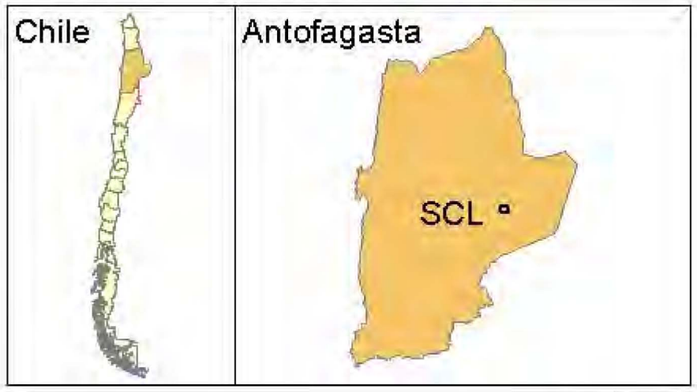
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas Salada, Saladita e Interna 21/03/2002 Landsat 7 +ETM

Leyenda:

- Agua
- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL



Escala: 1:50.000

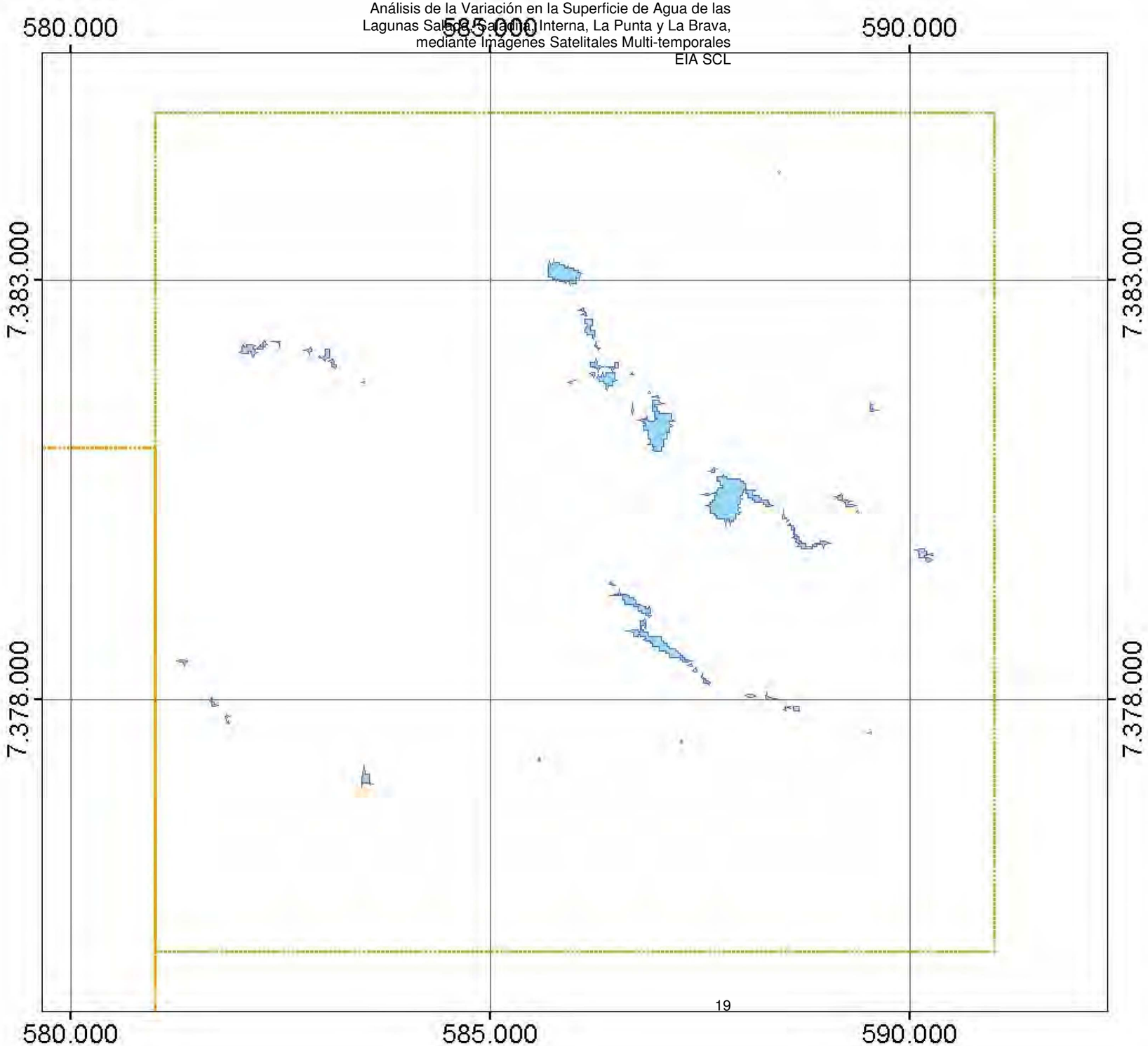
0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



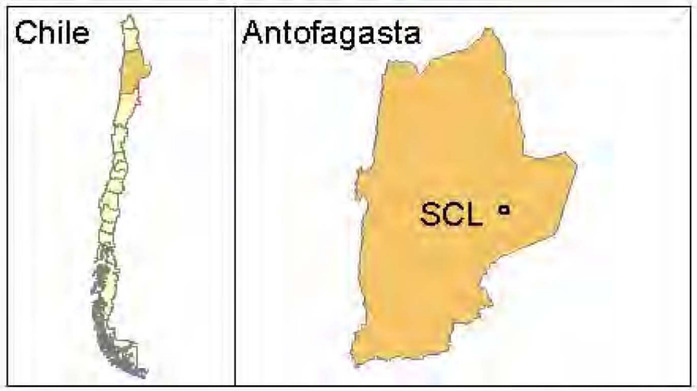
Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Plano:

Sistema de Lagunas Salada, Saladita e Interna 14/04/2008 Landsat 7 +ETM

Leyenda:

- Sistema La Punta y La Brava
- Sistema Salada, Saladita e Interna
- SCL
- Agua



Escala: 1:50.000

0 0,5 1 2 3 4 km

Coordenadas UTM Huso 19 Dátum WGS84

Elaborado por:

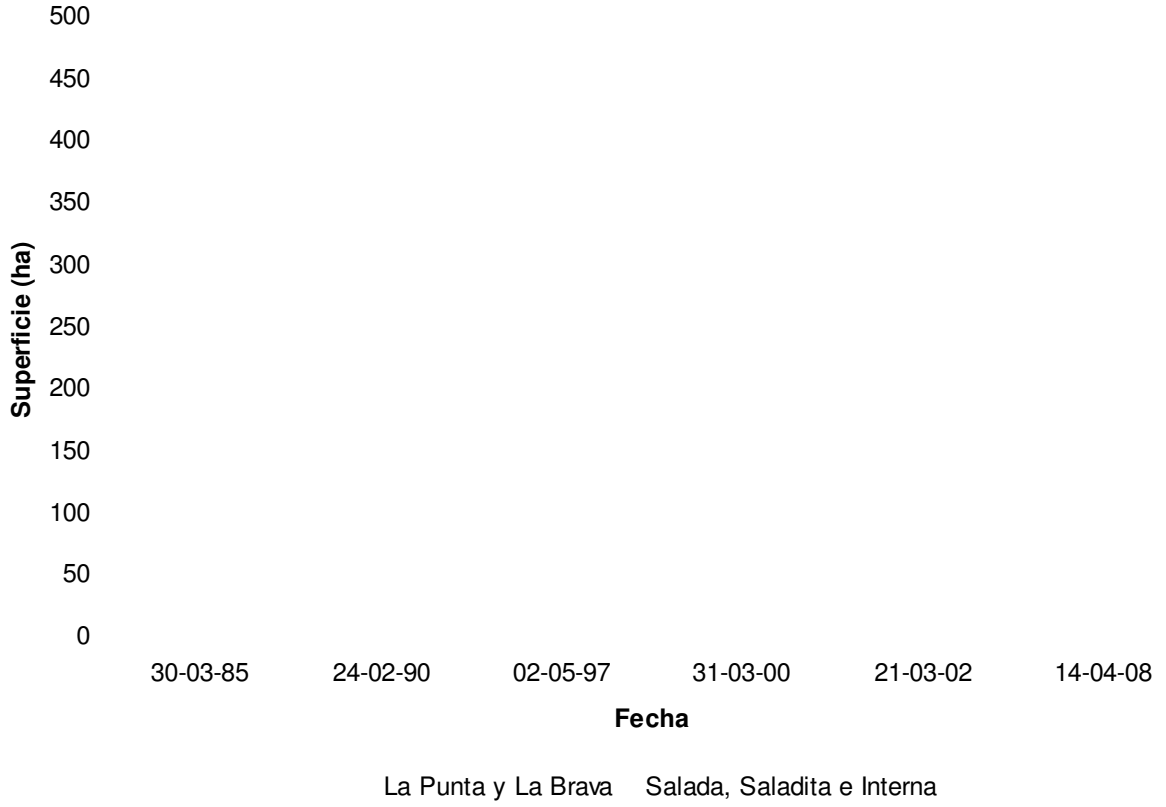
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

4. Conclusiones

Como se observa en la Tabla 3 y en los planos anteriores, la superficie de las lagunas presenta una importante variación en el período analizado (i.e., CV=75,5% La Punta y La Brava, CV=52,5% Salada, Saladita e Interna). En el caso del sistema de lagunas La Punta y La Brava, la superficie de agua va desde 76,6 ha en febrero de 1990 a 455,64 ha en mayo de 1997. Por otro lado, para el período analizado, la superficie de agua del sistema de lagunas Salada, Saladita e Interna alcanzó su mínimo en abril de 2008 con 62,46 ha y su máximo en marzo de 2002 con 227,07 ha.

Figura 2: Variación de la Superficie de Agua en los Sistemas de Lagunas



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Anexo 5.2

Modelo de Simulación Flujo Sistema Salar de Atacama

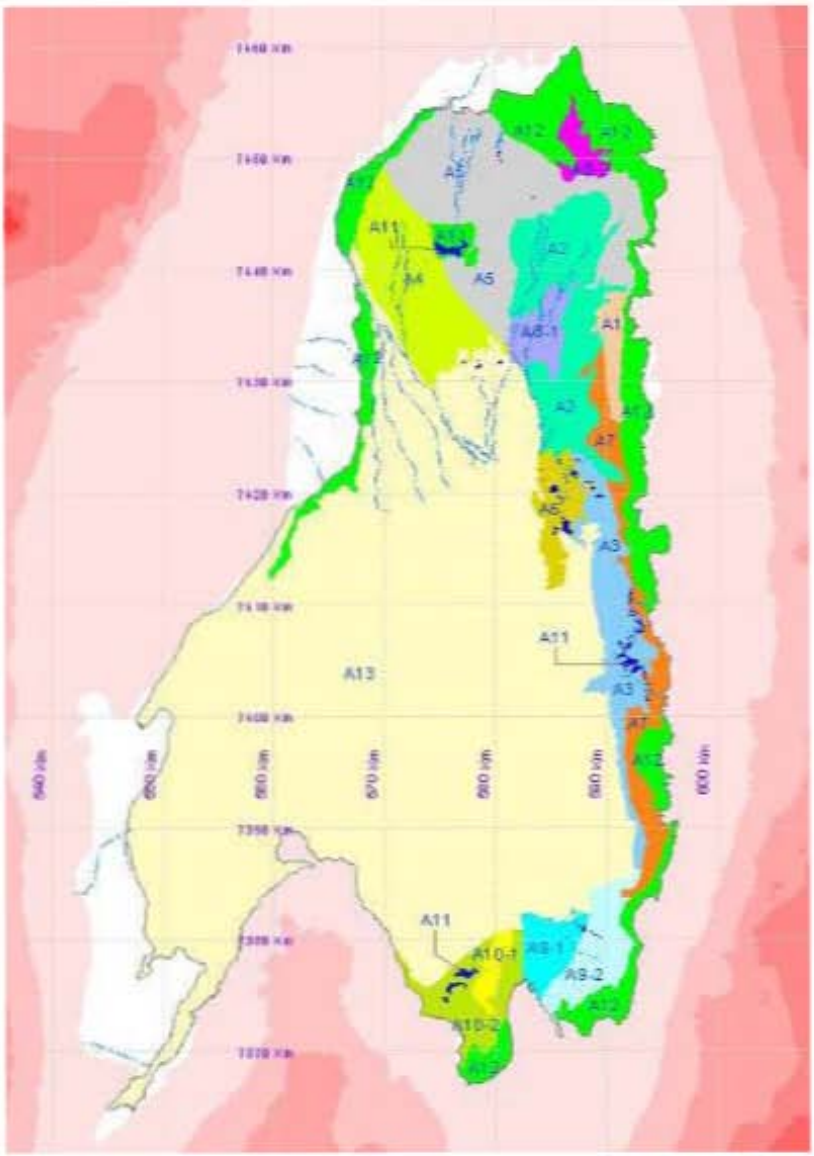
Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Sociedad
Chilena
de Litio Ltda.

MODELO DE SIMULACIÓN DE FLUJO
SISTEMA SALAR DE ATACAMA



SEPTIEMBRE 2005

ÍNDICE GENERAL

1	GENERALIDADES	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivo	1
1.3	Enfoque General	2
2	FUNCIONAMIENTO GLOBAL DEL SISTEMA	2
3	ESCORRENTÍA AFLUENTE AL SALAR DE ATACAMA	5
3.1	Balance hídrico en el salar	5
3.2	Evaporación desde el salar y sus bordes	6
3.3	Evaporación desde el núcleo del salar	10
3.4	Precipitación	12
3.5	Recarga efectiva al sistema	15
4	MODELO DE FLUJO	19
4.1	Zona modelada	19
4.2	Condiciones de borde	21
5	CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE	25
5.1	Ajuste de la representación de la evaporación	26
5.2	Balance en régimen permanente	30
6	CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE	30
6.1	Extracciones superficiales y subterráneas en la cuenca de aporte superficial al salar	31
6.2	Recargas artificiales de salmuera al núcleo	34
6.3	Recargas históricas	34
6.4	Bombeos históricos	36
6.5	Propiedades físicas del medio	37
6.6	Balance escenario histórico de calibración en régimen impermanente	38
7	CONCLUSIONES	57

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	HIDROLOGÍA	
A-1.1	ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIONES MEDIDAS	A1- 1
A-1.2	RELLENO DE ESTADÍSTICAS	A1- 6
A-1.3	CORRECCIÓN DE ESTADÍSTICAS	A1- 7
A-1.4	ESTADÍSTICAS RELLENADAS Y CORREGIDAS	A1- 7
A-1.5	ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIONES REPRESENTATIVAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	A1-15
A-1.6	DISTRIBUCIÓN DE RECARGA EFECTIVA	A1-17
ANEXO 2	PROPIEDADES FÍSICAS DE LA COSTRA: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (k) Y POROSIDAD EFECTIVA (S_Y)	
A-2.1	PRUEBAS 1985	A2-1
A-2.2	PRUEBAS 2001	A2-1
ANEXO 3	BOMBEO PROYECTADO POR SQM	

1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

El Salar de Atacama y su entorno poseen una gran importancia desde los puntos de vista ecológico y económico. En los bordes del salar existen zonas de vegas y lagunas que albergan especies animales y vegetales. Por otro lado, la salmuera del núcleo, considerada como un recurso minero, y el agua dulce, que fluye a través de los acuíferos que circundan el salar, tienen gran relevancia en los procesos productivos que se desarrollan en el área.

En la zona donde entran en contacto el agua dulce y la salmuera, se desarrollan los sistemas biológicos mencionados. Por consiguiente, su estabilidad depende de la evolución dinámica de ambos fluidos. Es por ello que la planificación y el control en la explotación de esos recursos resultan fundamentales para preservar aquellos ambientes.

1.2 Objetivo

En ese contexto, Sociedad Chilena de Litio (en adelante SCL), desde los inicios de sus labores en el salar en 1981, se ha preocupado por monitorear las variables que determinan el estado del sistema, para representarlo y así predecir su evolución. La forma de representación ha consistido en un modelo de flujo del núcleo, el cual se ha ido actualizando y mejorando a través del tiempo. Ese modelo fue desarrollado para describir los niveles de salmuera en torno a la planta de SCL, por lo tanto, representaba adecuadamente el comportamiento del flujo de salmuera en el núcleo, sin incluir las zonas protegidas de los bordes del salar.

Dada la gran importancia económica y ecológica de las zonas de humedales y lagunas, SCL ha encargado la elaboración del presente trabajo, que incluye, además de una caracterización hidrológica e hidrogeológica integral del sistema Salar de Atacama, un nuevo modelo de flujo, con el que se ha representado el núcleo y las zonas húmedas, ubicadas en los bordes del salar.

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de una herramienta confiable de simulación y predicción de los flujos de agua dulce y salmuera en el Salar de Atacama.

Se pretende lograr un consenso, entre la visión técnica de SCL y la de la autoridad (DGA-Conama). De esa forma, la representación elaborada podrá servir como herramienta de decisión en la gestión de los recursos del sistema Salar de Atacama y en la preservación de sus áreas protegidas.

1.3 Enfoque General

En la elaboración de este trabajo se ha procurado utilizar datos respaldados por mediciones e hipótesis de validez lo más generales posibles. Además, se ha tratado de

exponer cada elemento de la manera más clara y transparente. Algunos de los datos usados fueron registrados por SCL y pueden ser verificados en terreno en el instante en que esto sea solicitado.

Lo expuesto en el párrafo anterior debería ser un requisito inherente a cualquier estudio, y ha sido expresado explícitamente, debido a que en estudios anteriores realizados en el área de interés, a menudo se ha omitido información y los resultados se han presentado de manera imprecisa e incluso contradictoria.

La omisión de información en estudios anteriores se fundamenta en la prerrogativa de privacidad asociada a la propiedad minera (sobre la salmuera) y se relaciona principalmente con datos de extracción de salmuera.

La presentación imprecisa, y en ocasiones contradictoria, se asocia a las variables que tienen directa relación con el volumen de salmuera almacenado, es decir, flujos de recarga, niveles de salmuera, precipitación sobre el salar, etc.

En estudios de este tipo, donde el objetivo es evaluar el efecto de la extracción de salmuera y/o agua dulce sobre el entorno, el omitir información relacionada con lo que causa el efecto, hace perder validez y credibilidad a los resultados obtenidos.

2 FUNCIONAMIENTO GLOBAL DEL SISTEMA

El sistema hídrico asociado al Salar de Atacama comprende elementos de distintas naturalezas y dimensiones que interactúan, creando una unidad hidrológica e hidrogeológica de gran extensión y complejidad.

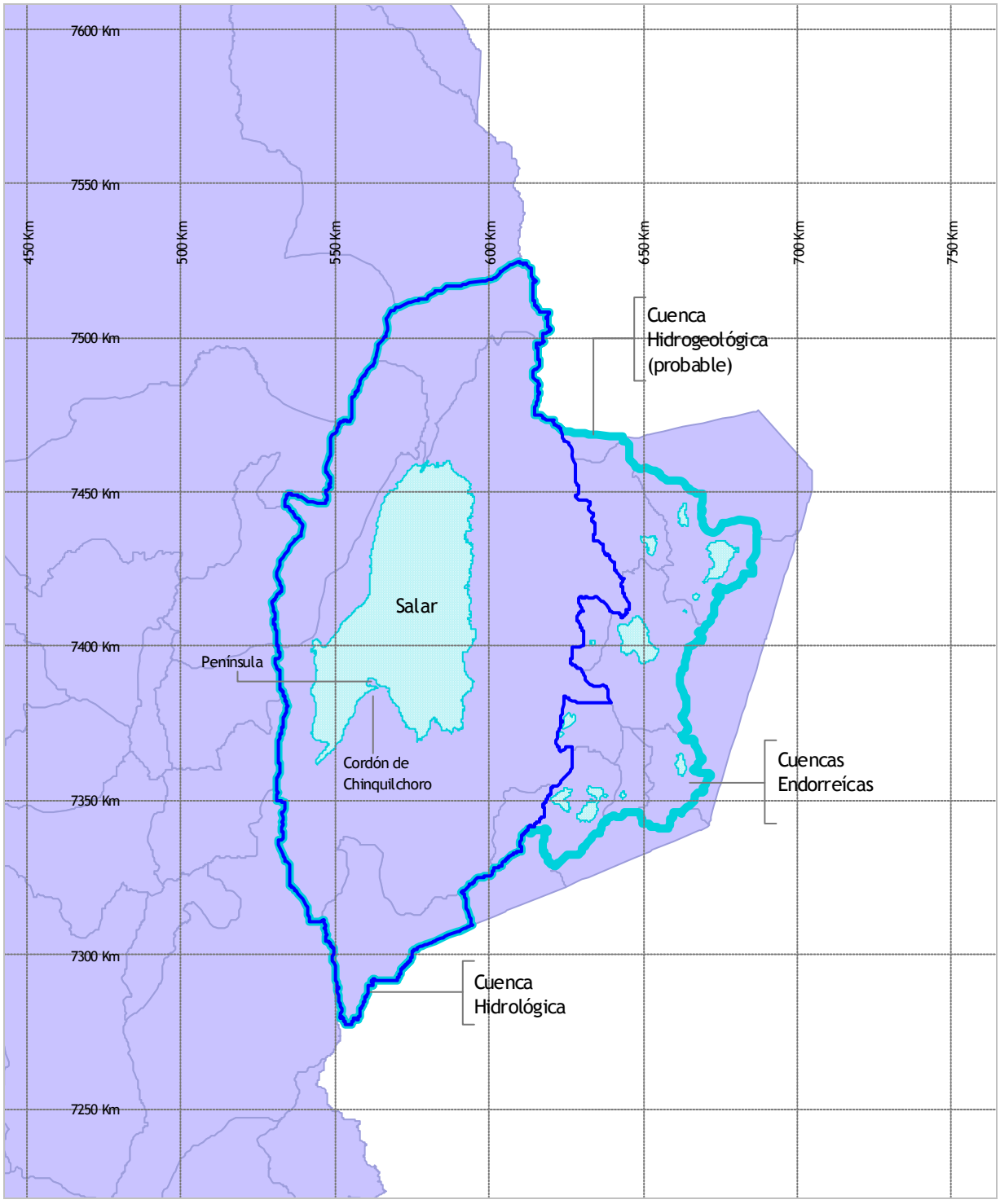
Para comprender el funcionamiento global del sistema, en Figura 1 se han esquematizado las siguientes unidades geográficas:

a) Salar: costra formada por depósitos salinos, saturada con agua de elevada concentración de sales (salmuera).

b) Cuenca hidrológica: corresponde al área de aporte al salar, según la red de drenaje superficial.

c) Cuenca hidrogeológica: corresponde al área de aporte al salar, según la escorrentía subterránea.

FIGURA 1 UNIDADES GEOGRÁFICAS ESCALA 1:2.000.000



Existen varias cuencas endorreicas que circundan la cuenca hidrológica del Salar de Atacama (ver Figura 1), cuyas descargas son análogas a la de éste, es decir, por evaporación desde salares más pequeños o lagunas, ubicados en las áreas de menor elevación.

Estas cuencas podrían estar conectadas subterráneamente con el Salar de Atacama, puesto que existen medios compuestos por rocas volcánicas alteradas y sedimentos cuaternarios que podrían constituir vías de conexión. Análogamente, la cuenca del Salar de Atacama, podría estar conectada subterráneamente con cuencas de elevación inferior ubicadas hacia el poniente. No existen, en el área, unidades geológicas asociables al basamento impermeable que permitan establecer divisorias hidrogeológicas, salvo el Cordón de Chinquilchoro, cuyo extremo norte corresponde a la Península de Chepica.

Por consiguiente, no se conoce la dimensión real de la cuenca hidrogeológica, la que podría incluso extenderse hasta Argentina. Antecedentes geológicos sugerirían la existencia de una paleocuenca que incluiría a varias cuencas hidrológicas actuales.

De lo anterior, se puede concluir que existiría una cuenca de extensión y forma desconocida cuyos aportes llegan de alguna forma al salar. Ésta se denominará en adelante: "cuenca de aporte efectivo". Su existencia y extensión teórica ayudará a entender el funcionamiento del sistema y las limitaciones asociadas a su representación matemática.

En cada una de las 3 componentes geográficas, el agua (con distintas concentraciones de sales) ingresa o sale del sistema y fluye a través de éste, de formas diversas.

Particularmente, en la cuenca de aporte efectivo, el agua entra a través de precipitación nival y pluvial, sale por evaporación y evapotranspiración, y fluye superficial y subterráneamente.

La escorrentía total que se desarrolla en la cuenca de aporte efectivo depende de la precipitación, evaporación y evapotranspiración, infiltración y conductividades hidráulicas, verticales y horizontales de los medios subterráneos, entre otros.

La cuantificación de la escorrentía total en la cuenca de aporte efectivo, en función de esos elementos, en el caso hipotético de que se conociese su extensión, involucra una gran indeterminación, debido a la gran diversidad de medios (roca volcánica, sedimentos cuaternarios, salares, etc.), variables (conductividad hidráulica vertical y horizontal, coeficiente de almacenamiento, etc.) y los datos hidrológicos que se requieren para plantear el cálculo (precipitación, evaporación efectiva, evapotranspiración efectiva).

A pesar de ello, existen numerosos cálculos de escorrentía total realizados en distintos estudios, a través de metodologías hidrológicas convencionales. Éstos presentan una gran incertidumbre y los valores obtenidos difieren bastante. Dichos resultados, no poseen un respaldo real, dado que involucran variables que difícilmente pueden ser medidas (principalmente evaporación efectiva e infiltración real en la cuenca) sobre una extensión que se desconoce (cuenca de aporte efectivo).

Probablemente, una de las pocas formas de estimar la escorrentía que llega al salar, con cierta base y consistencia, es a través del análisis de caudales superficiales medidos en

cauces afluentes al salar. Con esos datos es posible determinar rendimientos unitarios asociados a las subcuencas superficiales de aporte a los cauces controlados, que se pueden extrapolar al resto de la cuenca hidrológica del salar. La validez de los resultados obtenidos con ese procedimiento es limitada, debido a que la cuenca hidrológica no necesariamente coincide con la cuenca de aporte efectivo y, además, se deben adoptar valores para los flujos subterráneos pasantes por las secciones de aforo.

3 ESCORRENTÍA AFLUENTE AL SALAR DE ATACAMA

Los procesos físicos que determinan la distribución de la escorrentía, asociada a una cuenca de la extensión y características de la del Salar de Atacama, son demasiado complejos como para ser representados, adecuadamente, sólo con un modelo o procedimiento de cálculo. Se requiere además, de una forma de contraste o calibración, para restringir los resultados, del procedimiento empleado, a valores reales.

De acuerdo a lo anterior, en este punto se ha planteado un balance entre la escorrentía total de entrada al salar y la evaporación, que constituye la salida natural del sistema. De esa forma, se ha estimado una distribución de los flujos de entrada al salar en función de la precipitación, limitando los valores, según los resultados del balance.

En el balance se ha supuesto que el sistema se encuentra en equilibrio y que no existen extracciones de salmuera en el núcleo, ni captaciones en la cuenca de aporte superficial. Es decir, se ha considerado el estado del sistema antes que se iniciase la explotación de éste. En los puntos posteriores se incorporan, en el balance, los estímulos externos asociados a los consumos de agua dulce y salmuera.

3.1 Balance hídrico en el salar

El funcionamiento del sistema Salar de Atacama, antes que comenzara la extracción de salmuera y de agua dulce en la cuenca, se puede describir de manera general a través del esquema de la Figura 2.

El sistema en ese instante se encontraba en un estado de equilibrio. Si se considera un balance en un volumen de control definido por la superficie del salar y su prolongación subterránea (ver Figura 2), se puede plantear la siguiente expresión:

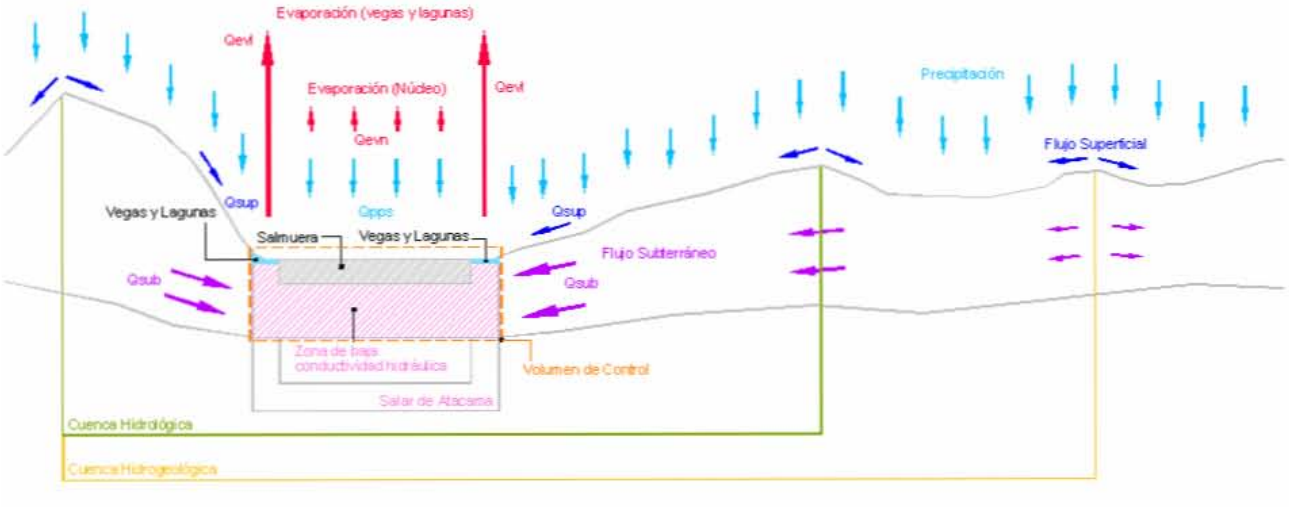
$$Q_{sub}+Q_{sup}+Q_{pps} = Q_{evl}+Q_{evn} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

donde:

Q_{sub}: flujo subterráneo de entrada hacia el volumen de control (VC)
Q_{sup}: flujo superficial de entrada al VC
Q_{pps}: precipitación en el salar (sobre la superficie del VC). Este caudal corresponde a la parte de la precipitación que infiltra, recargando al volumen de salmuera.

Q_{evl}: evaporación desde las áreas del salar ubicadas fuera del núcleo, incluyendo las zonas de vegas y lagunas
Q_{evn}: evaporación desde el núcleo

FIGURA 2
ESQUEMA DE FLUJO EN SISTEMA DE SALAR DE ATACAMA



3.2 Evaporación desde el salar y sus bordes

Según el balance planteado en el punto anterior, se debe estimar la magnitud del caudal de salida del sistema (Q_{evl}+Q_{evn}, en Ecuación 1). En 1986, Leonardo Mardones[†] realizó mediciones de evaporación en varios puntos del Salar de Atacama y caracterizó los tipos de suelos o las superficies desde las cuales se evapora el agua (dulce o salmuera) en el núcleo del salar y su entorno.

Mardones sectorizó el salar según la geología de superficie de éste y la profundidad del nivel de agua o salmuera. La zonificación integró además, las medidas de evaporación, lo que le permitió establecer áreas de propiedades evaporativas a las que asoció tasas promedio de evaporación.

Según los cálculos de Mardones (ver Tabla 1), la evaporación total promedio desde el Salar de Atacama sería aproximadamente 5.4 m^3/s.

Los resultados obtenidos por Mardones se han citado en la mayoría de los estudios realizados anteriormente. Algunos de esos estudios han incluido una figura con los contornos de las áreas de evaporación definidas por Mardones, pero sin verificar la consistencia entre los datos de superficie y su correspondencia gráfica en los planos.

[†] "El litio, un nuevo recurso para Chile", Capítulo 2.4 "Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama", Leonardo Mardones P., 1986.

No se dispone de los planos originalmente generados por Mardones, pero se cuenta con el plano geológico[§] que sirvió como base para la zonificación que estableció y para la elaboración de las figuras incluidas en estudios anteriores.

Observando los límites de las unidades geológicas incluidas en el plano mencionado y las figuras de zonas de evaporación de Mardones, se confeccionó la Figura 3. El objetivo de reelaborar la figura de áreas de evaporación, a partir de la fuente principal (plano geológico[§]), fue el posibilitar la medición de las áreas de cada zona de evaporación junto con su ubicación geográfica; de esa forma, se pudo establecer la cuantía y además, la distribución espacial de los flujos de salida del sistema.

En los estudios anteriores se presentaban los datos de superficies de cada zona, pero no se incluía de manera precisa los contornos de cada zona.

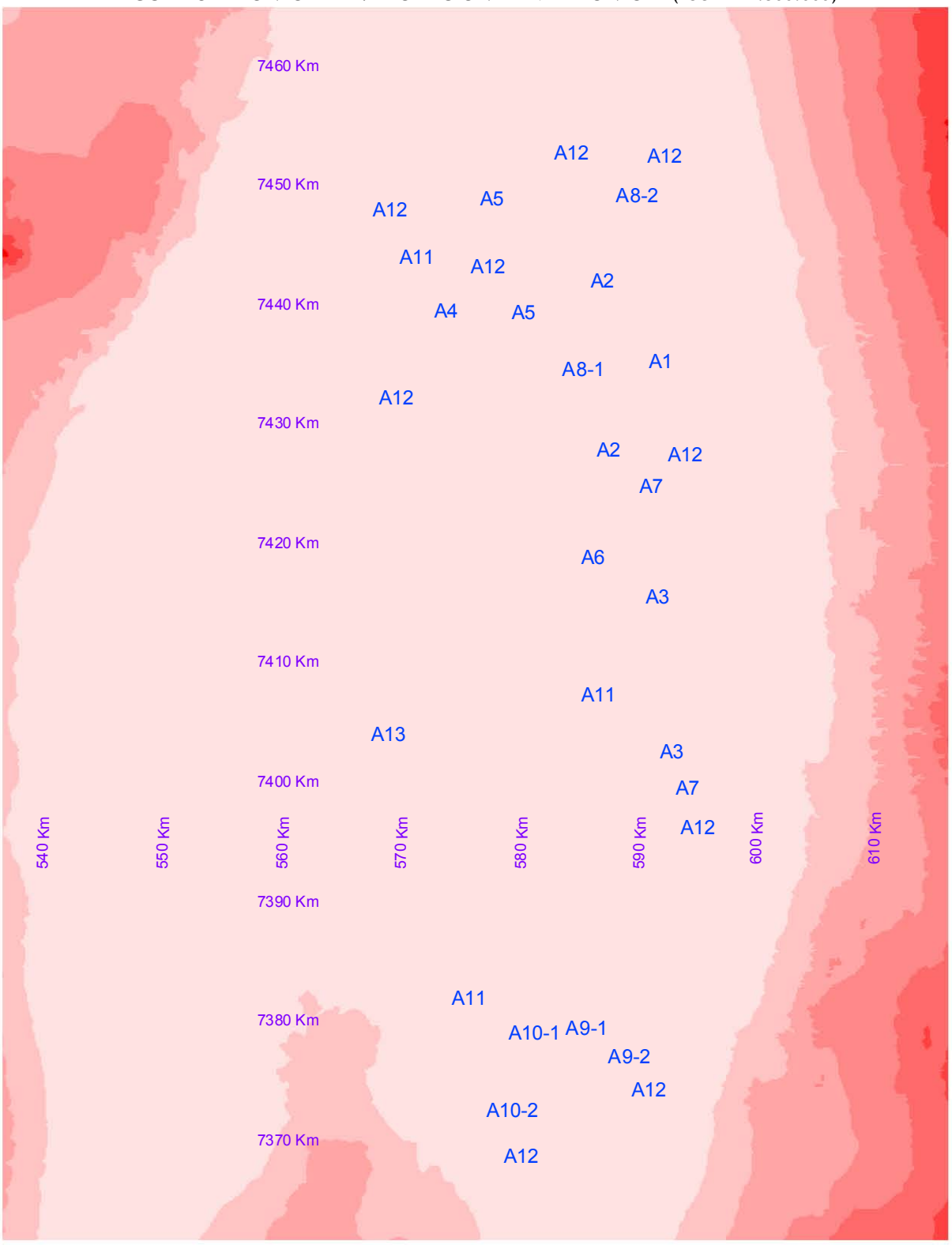
Tras elaborar la Figura 3 y medir las superficies de las zonas de evaporación, se comprobaron algunas diferencias importantes entre los datos de áreas, incluidos en estudios anteriores, y su correspondencia gráfica. Probablemente, se han propagado errores de identificación de algunas áreas en las reproducciones posteriores de la información original de Mardones.

La tasa de evaporación desde un punto en el entorno del núcleo del salar, depende de la densidad del fluido (a mayor densidad, menor evaporación) y de la profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico (a menor profundidad, mayor evaporación). Las tasas de evaporación, asignadas a cada zona por Mardones, están respaldadas por mediciones de evaporación puntuales para distintas profundidades del nivel de agua. Por lo tanto, es bastante probable que esas tasas de evaporación sean similares a las tasas reales de evaporación, para las profundidades y medios identificados.

Por otro lado, Mardones estimó valores promedio para las profundidades del nivel de agua en cada zona evaluada. La extrapolación de esos niveles a una zona de gran extensión, puede incorporar cierto error. Esa probable fuente de error podría resultar determinante en la estimación del caudal total de evaporación. A pesar de lo anterior, los datos analizados corresponden a los antecedentes hidrológicos más confiables registrados en el salar.

[§] "Mapa geológico Salar de Atacama", octubre de 1969, Aldo Moraga B, Guillermo Chong D., M. Angélica Fortt Z. y Hugo Henríquez A. Instituto de investigaciones geológicas - Comisión Antofagasta.

FIGURA 3 ZONAS DE EVAPORACIÓN DE MARDONES (ESCALA 1.500.000)



En la Tabla 1 se han calculado los caudales de evaporación con las áreas obtenidas de estudios anteriores y con las áreas medidas de la Figura 3, manteniendo las tasas obtenidas por Mardones. La diferencia más relevante, en términos de caudal evaporado, corresponde a la superficie de Vegas (A12). El área de esa zona, en la Figura 3, alcanza a 261 Km^2 y los datos de Mardones señalan una superficie de 180 Km^2.

TABLA 1
ZONAS DE EVAPORACIÓN DE MARDONES

zona	descripción	prof. promed. del agua [m]	tasa prom. de evap. [mm/día]	Caudales de evaporación calc. con datos de superficie de zonas, incluidos en estudios anteriores		Caudales de evaporación calculados con áreas medidas en la Figura 3	
				áreas según estudios anteriores) [Km^2]	caudal prom. de evap. [l/s]	áreas según Figura 3 [Km^2]	caudal prom. de evap. [l/s]
A1	**costra de limo salino blando** (la profundidad promedio del agua varía entre 0.50 m y 0.55 m; se usó un valor intermedio, 0.53 m)	0.53	0.400	20.0	92.6	20.0	92.6
A2	**costra de limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio** ($CaCO_3$)	0.37	0.100	130.0	150.5	134.0	155.1
A3	**costra delgada sobre sal granulada**	0.34	1.450	80.3	1347.6	84.0	1409.7
A4	**yeso limoso blando**	0.72	0.300	120.0	416.7	112.0	388.9
A5	**yeso limoso blando**	1.11	0.100	200.0	231.5	197.0	228.0
A6	**costra de cloruro de sodio** (NaCl) (la tasa promedio de evaporación es de 4.4 mm/año)	1.00	0.012	100.0	13.9	34.0	4.7
A7-1	**costra salino limosa de yeso y halita** (se distribuyó la superficie de la zona A7 en A7-1 y A7-2, según la proporción de áreas establecida por Mardones)	0.31	1.000	45.0	520.8	50.0	578.7
A7-2	**costra salino limosa de yeso y halita** (idem anterior)	0.50	0.500	17.0	98.4	19.0	110.0
A8-1	**limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio** ($CaCO_3$)	0.47	0.100	26.0	30.1	28.0	32.4
A8-2	**limo salino** (se detectó un error de transcripción en el texto, ya que aparecía, en la tabla original, una superficie de 16 Km2, una tasa de evaporación de 1.45 mm/día, y un caudal evaporado de 185 l/s, en vez de 269 l/s, que corresponde según el cálculo; analizando comparativamente los datos, es probable que la tasa de evaporación sea 1.00 mm/día, en vez de 1.45 mm/día. Por consiguiente, se adoptó 1.00 mm/día.)	0.27	1.000	16.0	185.2	16.0	185.2
A9-1	**limo salino**	0.32	1.500	30.0	520.8	29.0	503.5
A9-2	**limo salino**	0.60	0.100	48.0	55.6	49.0	56.7
A10-1	**limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio** ($CaCO_3$)	0.25	1.000	8.0	92.6	12.0	138.9
A10-2	**limo salino sobre costra dura de carbonato de calcio** ($CaCO_3$)	0.25	0.200	50.0	115.7	48.0	111.1
A11	**lagunas** (Área verano=11.8 Km2 / Área invierno=13.4 Km2 / Área promedio=12.6 Km2)	0.00	5.800	12.6	845.8	12.6	845.8
A12	**vegas**	0.00	0.300	180.0	625.0	261.0	906.3
A13	**núcleo, costra dura de cloruro de sodio** (NaCl) (La tasa promedio de evaporación es de 2 mm/año)	0.67	0.005	1620.0	93.8	1664.0	96.3
	Totales			**2703**	**5437**	**2770**	**5844**

Según los resultados presentados en la Tabla 1, se obtuvieron caudales totales de evaporación de 5437 l/s, al estimar la evaporación con las áreas de las zonas obtenidas de estudios anteriores, y de 5844 l/s, al realizar el cálculo con las superficies medidas de la Figura 3. Puesto que no es posible establecer entre esas magnitudes cuál es el resultado más cercano a la realidad, se ha adoptado un caudal intermedio, para el flujo de evaporación promedio total desde el salar, de 5.6 m^3/s. El caudal adoptado se distribuye en las zonas de la Figura 3 según las tasas de evaporación de la Tabla 1.

Se deben tener en cuenta los órdenes de magnitud de las tasas de evaporación de las distintas áreas del salar obtenidas por Mardones:

En las lagunas o superficies de agua libre, la evaporación promedio anual es de 5.8 mm/día. En zonas donde el nivel de agua (o salmuera) se ubica bajo el nivel de terreno, la tasa de evaporación varía entre 0.012 mm/día y 1.5 mm/día, dependiendo de la profundidad del nivel piezométrico, de la densidad del agua y de las características físicas del medio saturado. Finalmente, en el núcleo del salar, la tasa de evaporación medida por Mardones alcanzó un valor bastante reducido (0.005 mm/día), pero como se verá más adelante, ese valor fue corregido a 0.017 mm/día.

3.3 Evaporación desde el núcleo del salar

En el punto anterior se estimaron los caudales de evaporación, tanto en los bordes del salar, como en el núcleo, pero se cree necesario analizar particularmente lo que ocurre con la evaporación en el núcleo.

La evaporación en el núcleo es muy baja debido a la existencia de una costra de sal compacta, fracturada en placas poligonales, y a la elevada densidad de las salmuera (>1.2). La reducida evaporación se produce a través de las fracturas.

De acuerdo a lo observado en el núcleo a través del tiempo, se debe tener en cuenta que éste ocasionalmente recibe recargas directas por las lluvias sobre el salar. Esa recarga produce un ascenso temporal del nivel de salmuera, el que posteriormente desciende hasta un nivel de equilibrio, debido a la evaporación.

La tasa de evaporación promedio desde el núcleo debería ser un valor intermedio, entre la tasa máxima, que se produce inmediatamente tras un evento de lluvia en el salar, y la tasa mínima, que corresponde a la que se verifica en el salar, en estado de equilibrio (valor medido por Mardones, 0.005 mm/día). En la Figura 4 se han esquematizado los niveles de salmuera, su evolución temporal y las tasas de evaporación asociadas.

FIGURA 4
EVAPORACIÓN EN EL NÚCLEO

Como se indicó anteriormente, la tasa de evaporación durante el período de tiempo en que el nivel de salmuera elevado retorna a su punto de equilibrio, debería ser bastante mayor a la medida por Mardones (0.005 mm/día), pues de lo contrario el núcleo estaría permanentemente llenándose, lo que en realidad no ocurre.

Por lo tanto, para que en el núcleo se mantenga un nivel de salmuera de equilibrio, el caudal promedio de evaporación debería ser:

$$[QEv]^{\text{núcleo}} = A_{\text{núcleo}} \cdot [TEv]^{\text{promedio}} = A_{\text{núcleo}} \cdot [TEv]^{\text{equilibrio}} + Q_{ref}$$

con:

$[QEv]^{\text{núcleo}}$: caudal promedio de evaporación desde el núcleo
$A_{\text{núcleo}}$: superficie del núcleo
$[TEv]^{\text{promedio}}$: tasa de evaporación promedio real del núcleo
$[TEv]^{\text{equilibrio}}$: tasa de evaporación promedio del núcleo en estado de equilibrio; medida por Mardones (0.005 mm/día).
Q_{ref}: Caudal de recarga efectiva sobre el núcleo

3.3 Precipitación

En el área de estudio, gran parte de la precipitación se evapora, otra parte escurre superficialmente y el resto infiltra. La componente que es absorbida por el terreno y que logra llegar hasta los acuíferos, corresponde a la recarga efectiva del sistema acuífero.

Con el objetivo de estimar la recarga efectiva del sistema, se elaboró un estudio pluviométrico que permitió generar una distribución de lluvias mensuales representativa de toda la cuenca de aporte superficial al salar en un período de 30 años.

El análisis pluviométrico consistió en correlacionar las estadísticas medidas en las estaciones:

1) Camar
2) Socaire
3) Peine
4) Talabre
5) Monturaqui

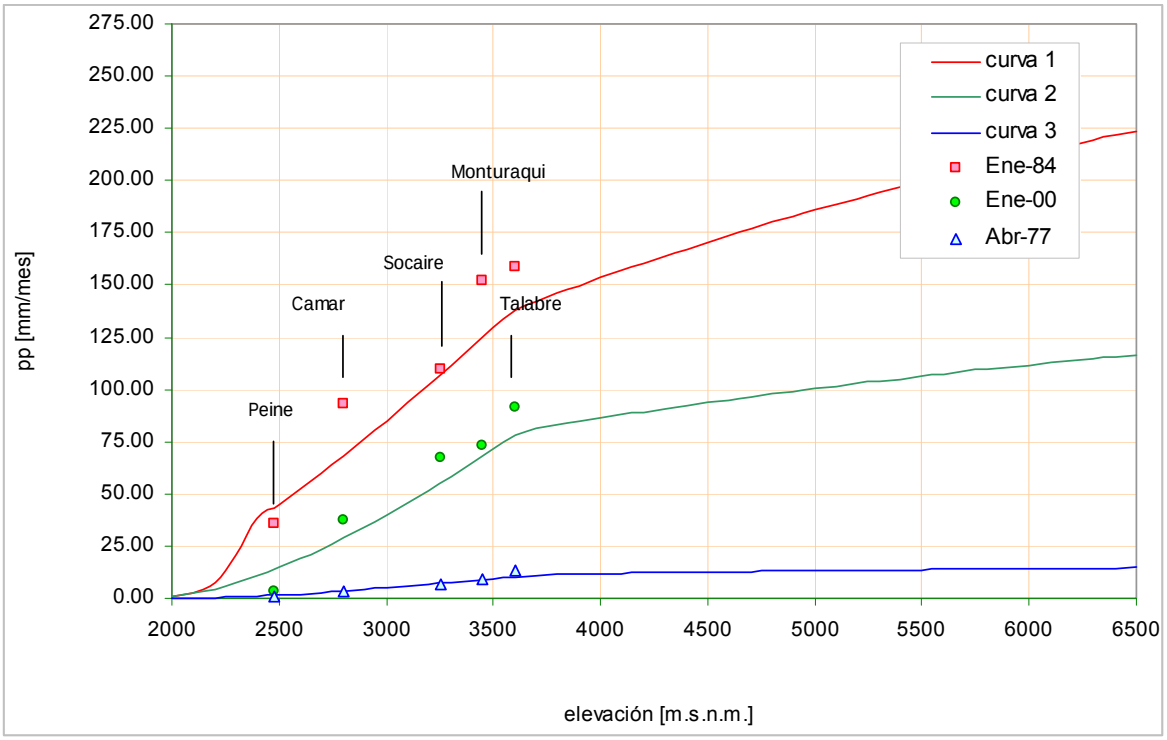
Los datos de lluvias fueron rellenados en función de las correlaciones establecidas. De esa forma, se generaron 5 estadísticas completas de precipitaciones, que cubren el período comprendido entre agosto de 1974 y mayo de 2004.

Con esas estadísticas se construyó una función $P^k_{CSA}(z)$ que permite representar la precipitación mensual, en una elevación z, de la cuenca de aporte superficial al salar, y correspondiente a un determinado mes k (k entre agosto de 1974 y mayo de 2004). De esa forma, se incorporó en la distribución de precipitaciones para la cuenca de aporte superficial al Salar de Atacama, la variación espacial ligada a la cuantía de las precipitaciones mensuales.

Se eligió la estación Socaire como estación base, dado que es la más completa y se ubica a una elevación intermedia (3251 m.s.n.m.).

Para construir la función $P^k_{CSA}(z)$, se analizaron algunos valores extremos de precipitaciones mensuales registrados en las 5 estaciones seleccionadas; se eligieron tres meses, en los que se registraron en las 5 estaciones lluvias crecientes, con relación a sus respectivas altitudes. Con esos valores, se construyeron funciones de precipitación mensual en función de la elevación; en el Gráfico 1 se muestran éstas.

GRÁFICO 1 CURVAS C(z)



Para calcular $P^k_{CSA}(z)$, la precipitación mensual en una elevación z de la cuenca de aporte superficial al Salar de Atacama, en el mes k, se compara la precipitación del mes k en la estación Socaire (P_S^k) con $C_1(z)$, $C_2(z)$ y $C_3(z)$, y se estima la precipitación interpolando la precipitación en función de los valores de las curvas más cercanas, es decir:

si $P_S^k > C_1(z) \rightarrow P^k_{CSA}(z) = C_1(z)$

si $C_1(z) > P_S^k > C_2(z) \rightarrow P^k_{CSA}(z) = a \cdot C_1(z) + b \cdot C_2(z)$, con $a = [P_S^k - C_2(z)] / [C_1(z) + C_2(z)]$ y $b = [C_1(z) - P_S^k]) / [C_1(z) + C_2(z)]$

si $C_2(z) > P_S^k > C_3(z) \rightarrow P^k_{CSA}(z) = c \cdot C_2(z) + d \cdot C_3(z)$, con $c = [P_S^k - C_3(z)] / [C_2(z) + C_3(z)]$ y $d = [C_2(z) - P_S^k] / [C_2(z) + C_3(z)]$

si $P_S^k < C_3(z) \rightarrow P^k_{CSA}(z) = C_3(z)$

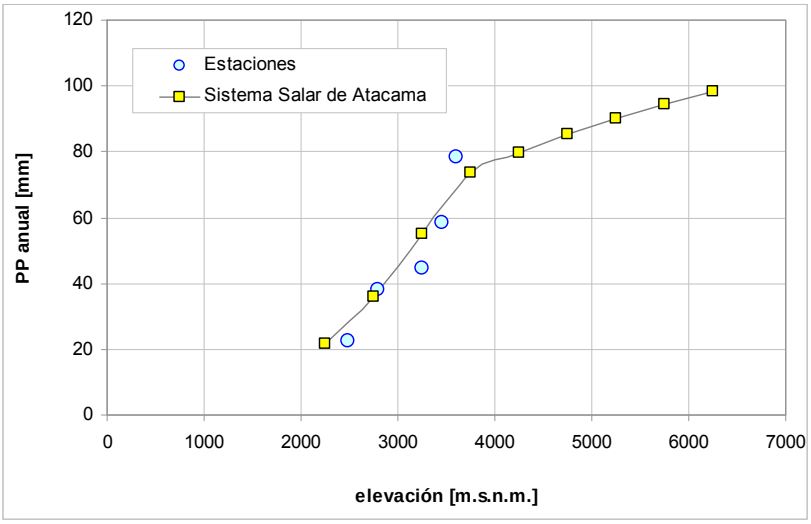
El resultado final del procedimiento descrito es una serie de estadísticas de precipitaciones mensuales para distintos rangos de elevación y que se extienden entre agosto de 1974 y mayo de 2004.

En la Tabla 2 se presentan las precipitaciones medias anuales asociadas a cada rango de elevación usado y en el Gráfico 2 se comparan esos valores con las precipitaciones medidas en las estaciones. En el Anexo I se presenta el detalle del estudio pluviométrico elaborado.

TABLA 2
PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES EN CUENCA DE APORTE SUPERFICIAL AL SALAR DE ATACAMA PARA DISTINTOS RANGOS DE ELEVACIÓN

rango de elevación [m.s.n.m.]	elevación representativa del rango [ms.n.m.]	precipitación anual [mm]
2000-2500	2250	21.7
2500-3000	2750	36.1
3000-3500	3250	55.1
3500-4000	3750	73.7
4000-4500	4250	79.8
4500-5000	4750	85.1
5000-5500	5250	89.9
5500-6000	5750	94.2
6000-6500	6250	98.2
lluvia anual promedio en cuenca completa (área cuenca de aporte al salar = 17342 Km^2)		61.4
Caudal de lluvia promedio (m^3/s)		33.765

GRÁFICO 2
PRECIPITACIONES ANUALES MEDIDAS EN ESTACIONES Y ESTIMADAS EN SISTEMA SALAR DE ATACAMA



3.4 Recarga efectiva al sistema

De acuerdo al balance planteado en el punto 3.1 (Ecuación 1) y manteniendo la hipótesis del sistema en equilibrio, sin extracciones de salmuera en el núcleo, ni captaciones en la cuenca de aporte superficial. Para el salar se cumple:

$$Q_{sub}+Q_{sup}+Q_{ppes} = Q_{evl}+Q_{evn} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Q_{sub}: flujo subterráneo de entrada hacia el volumen de control (VC, ver Figura 5)
Q_{sup}: flujo superficial de entrada al VC

Q_{pps}: precipitación sobre la superficie del VC. Este caudal corresponde a la parte de la precipitación que infiltra, recargando al volumen de salmuera.
Q_{evl}: evaporación desde las áreas de vegas y lagunas
Q_{evn}: evaporación desde el núcleo

Si se define como caudal de recarga efectiva al sistema, a la parte de la escorrentía total que llega al flujo subterráneo (de agua dulce y salmuera), éste sería:

$$Q_{\text{recarga efectiva}} = Q_{sub} + Q_{sup} + Q_{ppes} = Q_{evl} + Q_{evn} \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Como se indicó en el Capítulo 2, la recarga del salar proviene de la cuenca de aporte efectivo, que puede ser mayor a la cuenca de aporte superficial, pero, la magnitud de ese caudal debe coincidir con el caudal total evaporado (Ecuación 3). Según lo expuesto en el punto 3.2, ese caudal en promedio, para el sistema en estado de equilibrio y sin explotación, sería de 5.6 m^3/s.

Adoptando una simplificación que permita distribuir ese caudal en el espacio y en el tiempo, se ha supuesto que la recarga efectiva se incorpora al sistema en la cuenca de aporte superficial, según la misma distribución de la precipitación generada para la lluvia en el salar (ver punto 3.3), siendo directamente proporcional a la relación entre la evaporación total desde el salar y la precipitación total sobre el sistema, para mantener con ello la condición de equilibrio que existía antes del inicio de su explotación.

Este caudal se incorpora al sistema en toda la extensión de la cuenca de aporte efectivo y puesto que no se conoce la precisa extensión de esa cuenca, es razonable adoptar la hipsometría de la cuenca hidrológica como criterio para establecer su distribución espacial.

Es decir, la recarga efectiva ($R^k(z)$) se determinó en función de $P^k(z)$, que es la relación descrita en el punto 3.3, que permite representar la precipitación mensual, en una elevación z de la cuenca de aporte superficial al salar, en un determinado mes k (k entre agosto de 1974 y mayo de 2004).

$$R^k(z) = Q_{ev}/Q_{pp} \cdot P^k_{CSA}(z) = 5.6 \,/\, 33.765 \cdot P^k_{CSA}(z) = 0.166 \cdot P^k(z) \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

donde:

$R^k(z)$: recarga efectiva en el mes k en el rango de elevación z (z es el promedio de un rango (z_{min}, z_{max})).
Q_{ev}: Caudal promedio de evaporación total en el salar (Ecuación 3)
Q_{pp}: Caudal promedio de lluvia en la cuenca de aporte superficial al salar, incluido éste (Tabla 2, Punto 3.3).

En la Figura 5 se muestran los rangos de elevación de la cuenca hidrológica y los caudales de aporte efectivo asociados a las 13 zonas en que se dividió la cuenca. Las zonas o subcuencas se definieron según criterios geográficos, hidrogeológicos y

concordantemente con el área cubierta por el modelo de flujo, que se describe más adelante.

La zona de flujo representada con el modelo corresponde a la subcuenca 9 de la Figura 5. Si se resta a la recarga efectiva que llega a la zona norte (2302 l/s) el caudal evaporado (1903 l/s), se obtiene el flujo pasante desde la zona norte hacia la zona sur (399 l/s, ver Figura 6).

Los restantes flujos pasantes coinciden con las recargas efectivas estimadas para las subcuencas que descargan en el perímetro de la zona modelada (zona sur, ver Figuras 5 y 6).

FIGURA 5 RANGOS DE ELEVACIÓN Y CAUDALES DE RECARGA EFECTIVA [l/s]
ESCALA 1:1.200.000

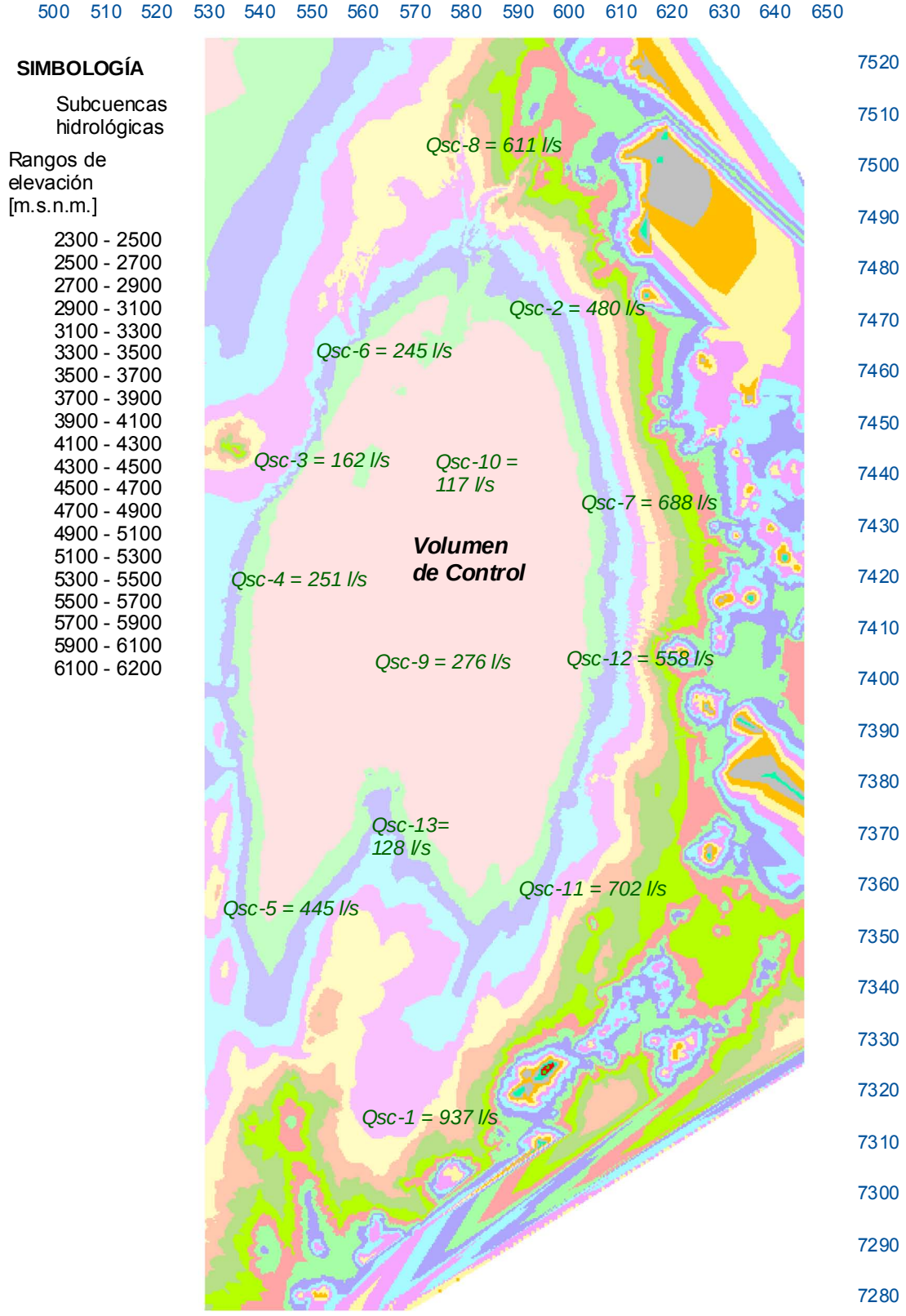
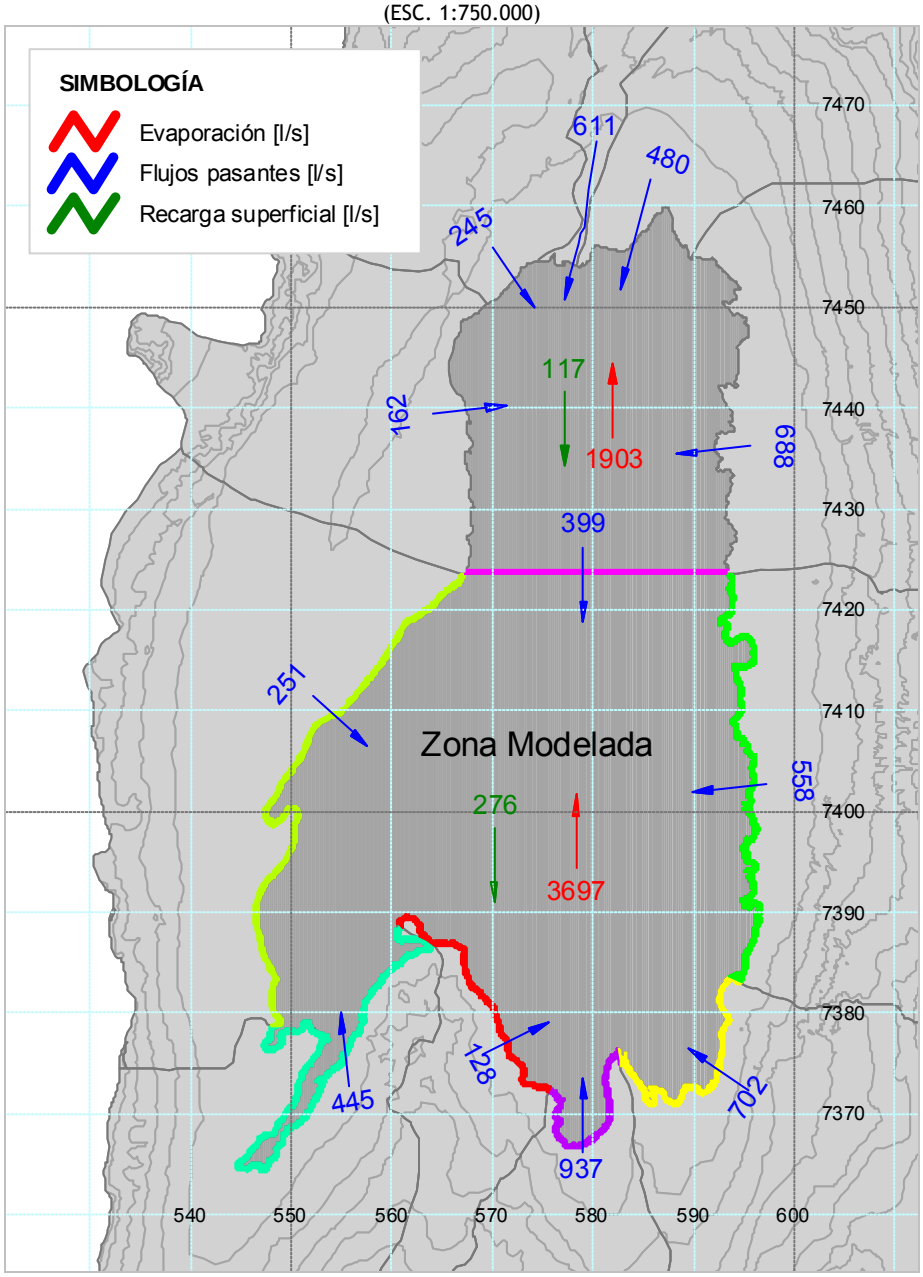


FIGURA 6
BORDES DE ENTRADA AL SALAR Y CAUDALES PASANTES [l/s]
(ESC. 1:750.000)



4 MODELO DE FLUJO

4.1 Zona modelada

El modelo de flujo elaborado se construyó con Visual Modflow y, como se indicó en el punto anterior, la zona representada corresponde a la subcuenca 9 de la Figura 5. Ese sector del salar se ubica al sur de la coordenada UTM Norte 7.425.000 m.

Se restringió el área modelada a ese sector, puesto que cubre íntegramente el núcleo del salar, que es la zona que se encuentra sometida a la extracción de salmuera.

En la Figura 7 se muestra la malla de diferencias finitas utilizada. Cada celda tiene una dimensión de 500x500 m y la malla contiene 124 filas y 120 columnas, lo que equivale a 62 Km de norte a sur y 60 Km de este a oeste.

El modelo elaborado corresponde a una representación regional de gran parte del Salar de Atacama. Por ello, la subdivisión del medio comprende unidades de 500x500 m. Se adoptó ese nivel de detalle y no uno más fino, debido a que una subdivisión espacial menor, implica un gran aumento en los procesos que realiza el modelo y, por consiguiente, en los tiempos asociados a cada operación.

Se consideró que la dimensión mínima elegida (500 m) cumple con los objetivos predictivos requeridos y permite realizar simulaciones en menos de 5 minutos, lo que posibilitó realizar los procedimientos de calibración y predicción de manera más eficiente.

En la Figura 8 se presenta un corte vertical de la malla este-oeste; en el corte se aprecian dos estratos definidos. La capa más superficial corresponde a la costra salina permeable que actualmente constituye la reserva de salmuera explotable del salar. Tiene un espesor promedio de aproximadamente 40 m. Bajo ese estrato, se ha representado una capa de 500 m de espesor que incluye una serie de materiales de baja permeabilidad. Ese estrato está saturado, pero su baja conductividad hidráulica impide la factibilidad de su explotación.

Los acuíferos que circundan el salar han sido representados a través de los caudales pasantes incorporados en la condición de borde de flujo; es por ello que aguas arriba de ese límite, las celdas de la malla del modelo se han dejado inactivas.

FIGURA 7
ZONA MODELADA
(ESCALA1:750.000)

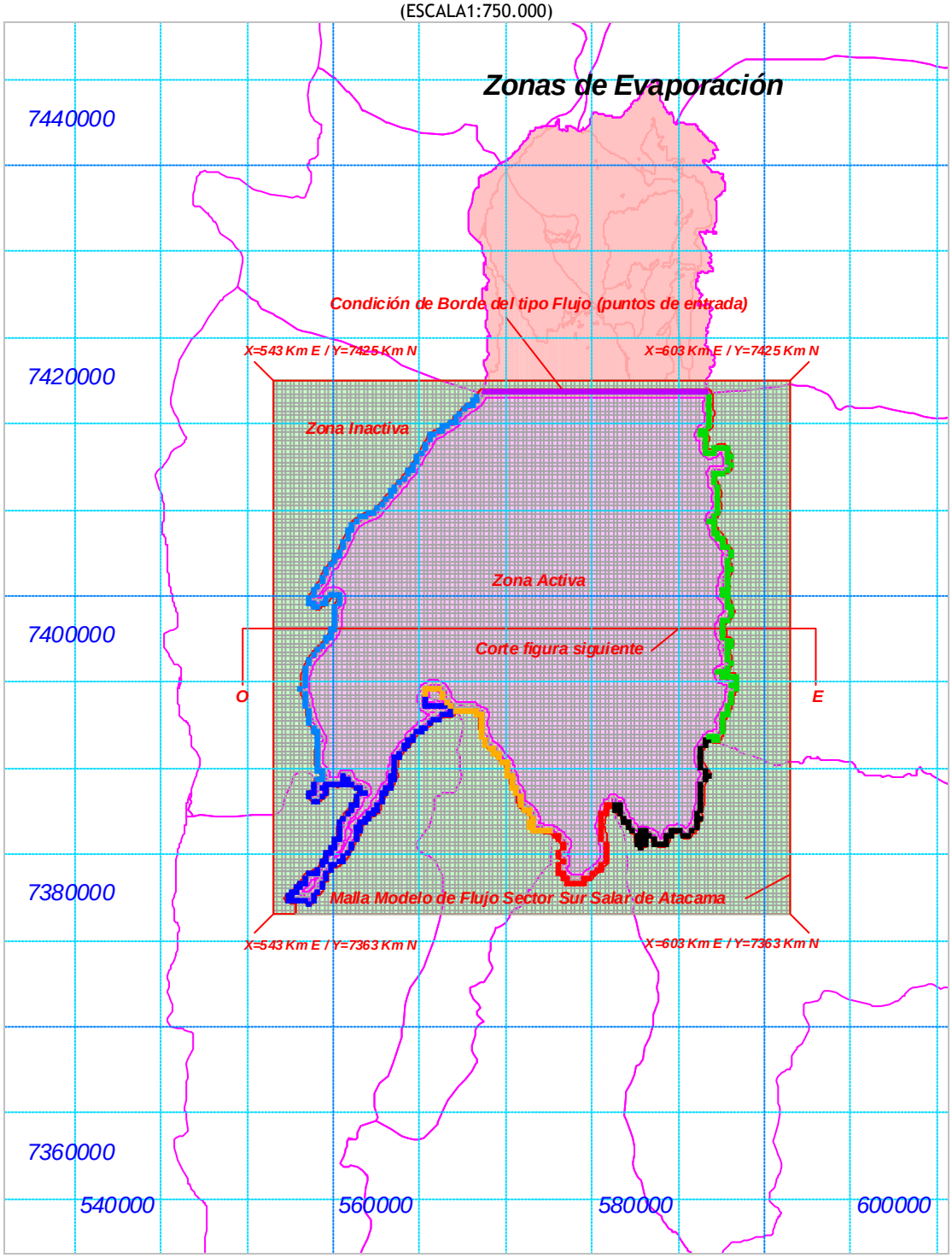
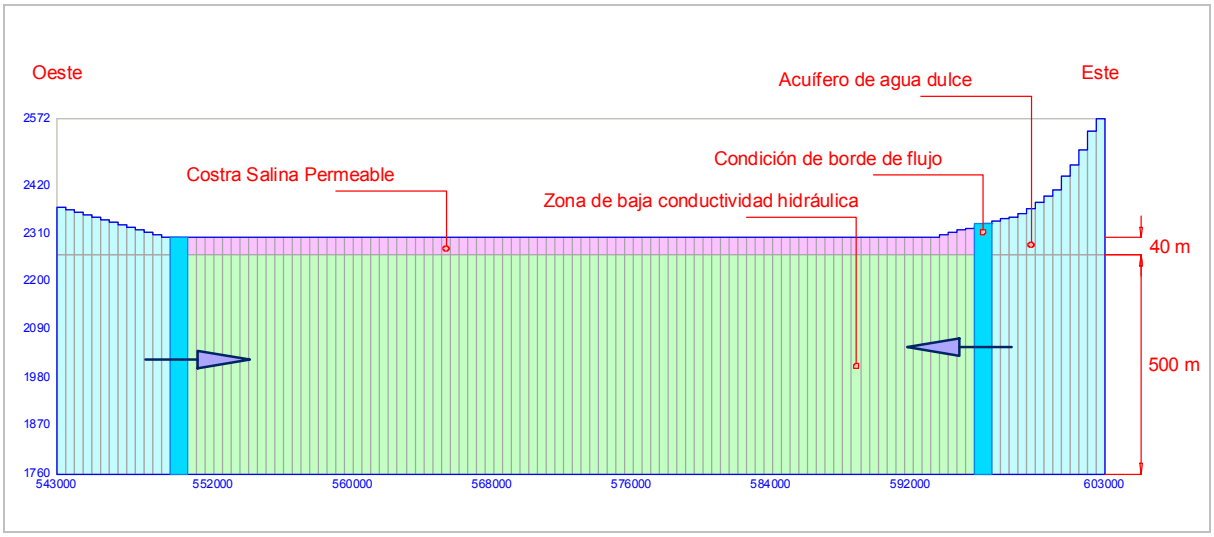


FIGURA 8
CORTE VERTICAL ESTE-OESTE MALLA DE MODELO DE FLUJO



4.2 Condiciones de borde

a) Condiciones de borde entrada

a.1) Flujos laterales

En la Figura 7 se puede observar la condición de borde de flujo que representa los flujos de recarga lateral estimados en el punto 3.4. Cada punto de la Figura 7, ubicado en el borde del salar, corresponde a un pozo ficticio de inyección, éstos permiten simular una condición de borde definida por el ingreso de cierta cantidad de agua a un área determinada.

Para el escenario correspondiente al estado promedio del sistema previo a la explotación (régimen permanente), los caudales de entrada por los bordes del salar corresponden a los incluidos en la Figura 6.

La zona delimitada por la condición de borde de flujo se denomina zona activa. El área exterior a ese límite corresponde a la zona inactiva. El modelo efectúa cálculos en las celdas coincidentes con la zona activa.

a.2) Flujos superficiales

Para el mismo escenario antes mencionado (régimen permanente), se incorporó superficialmente un flujo distribuido por unidad de superficie de 276 l/s (ver Figuras 5 y 6) en toda la zona activa. Esta componente corresponde al flujo de recarga proveniente de la lluvia directa sobre la parte del salar representada en el modelo.

b) Condiciones de borde salida

La descarga natural del sistema es la evaporación; se incorporó una distribución de evaporación basada en las zonas definidas por Mardones. En todas las celdas activas se definió dicha condición de salida.

b.1) Evaporación desde medios saturados

La evaporación desde los medios saturados (todo el salar, excepto lagunas) se representó a través de la opción *evapotranspiration* del Visual Modflow.

La opción *evapotranspiration* del Visual Modflow permite simular la evapotranspiración de áreas con vegetación y la evaporación desde el medio. Para ello requiere la definición de 2 parámetros:

i) $(T_{ev})_{max}$ = Tasa de evaporación máxima (o evapotranspiración): corresponde a la máxima tasa de evaporación en un punto y ocurre cuando el nivel piezométrico coincide con el nivel de terreno.

ii) H_{ext} = Profundidad de extinción: Es la profundidad bajo el nivel de terreno a partir de la cual la evaporación es nula.

Si el nivel piezométrico simulado supera o coincide con el nivel de terreno, la tasa de evaporación simulada coincide con $(T_{ev})_{max}$.

Si el nivel piezométrico simulado está por debajo de H_{ext}, la tasa de evaporación simulada es nula.

Si el nivel piezométrico simulado se encuentra entre el nivel de terreno y H_{ext}, la tasa de evaporación es calculada linealmente por el modelo.

Las tasas de evaporación ($(T_{ev})_{max}$) y las profundidades de extinción (H_{ext}) se ajustaron operando el modelo en régimen permanente. En el punto 5 se detalla ese proceso.

b.2) Evaporación desde lagunas

Para el caso de las lagunas se usó la función *river* (celdas del tipo río) del Visual Modflow.

Se eligió esa forma de representación puesto que si se representase con la opción de evapotranspiración, una variación del nivel piezométrico, en una celda coincidente con una laguna, produciría una variación, de la tasa estimada por el modelo, mucho mayor a la que se obtiene con la opción *river*. En la realidad, la tasa de evaporación desde las lagunas prácticamente no varía con la elevación del nivel agua, a diferencia de lo que

ocurre en los medios saturados. Por consiguiente, la opción *river* reproduce la realidad de mejor forma.

Una forma alternativa de representar las lagunas es a través de la opción evapotranpiraction, combinada con la asignación de una conductividad hidráulica muy alta en las celdas. Esta opción fue descartada porque la conductividad elevada quedaría asociada al estrato completo (de 40 m de espesor), lo que se aleja demasiado de la realidad.

La superficie cubierta por las lagunas, según Mardones, varía entre 11.8 y 13.4 Km^2; para el cálculo de la evaporación (Tabla 1), se adoptó el promedio (12.6 Km^2).

El 73.4 % del área cubierta por lagunas coincide con el área modelada, por lo tanto, en la zona que cubre la representación, la superficie promedio ocupada por lagunas sería:

$$\text{Área promedio de lagunas en zona modelada} = 0.734 \cdot 12.6 = 9.25\ Km^2.$$

Las 37 celdas de tipo *river* (de 500 · 500 m^2), incorporadas en la malla, cubren, coincidentemente, un área de 9.25 Km^2.

Las celdas tipo *river* requieren de la asignación de tres parámetros:

i) un nivel de superficie libre en el río (en este caso, corresponde al nivel de la superficie libre de la laguna).

ii) un nivel de fondo del río (en este caso, corresponde al fondo de la laguna).

iii) una conductancia, que es un parámetro que representa la resistencia del flujo a entrar o salir del río (en este caso, representa la resistencia del flujo a evaporarse desde la laguna o pasar desde la laguna al medio permeable).

El caudal evaporado desde las lagunas (o de ingreso al río) es calculado por el modelo con una relación lineal entre la conductancia y la diferencia entre el nivel asignado a la celda y el simulado en la misma.

La conductancia de las celdas río se ajustó procurando igualar la tasa de evaporación medida. Se obtuvo una conductancia de 3200 m^2/día (en escenario de régimen permanente que se describe más adelante), que permitió obtener una tasa promedio de evaporación de 5.8 mm/día (valor igual al medido por Mardones) para las 37 celdas del tipo río.

c) Caudales asociados a las condiciones de borde

Efectuando un balance entre los aportes laterales, la lluvia sobre el salar y los caudales evaporados, se calculó los caudales promedio asociados a las condiciones de borde de entrada descritas en le punto a), válidos para el sistema en equilibrio y sin explotación.

Se calcularon 2 balances separados:

i) Sector Norte: es la parte que se ubica fuera del área modelada, tanto del salar como de sus cuencas de aporte (ver Figura 5, Figura 6 y Tabla 3).

ii) Sector Sur: es la zona modelada (ver Figura 5, Figura 6 y Tabla 4).

El balance combinado de ambos sectores permitió calcular los caudales promedio (régimen permanente, sin explotación) de los flujos de entrada y salida, representados a través de las condiciones de bordes lineales y distribuidas por área, descritas en los puntos a y b (ver tablas 3 y 4).

TABLA 3 BALANCE ZONA NORTE SALAR

Descargas de subcuencas al salar (flujos pasantes de entrada) [l/s]	subc. Nº 2	479.6
	subc. Nº 3	162.3
	subc. Nº 6	245.1
	subc. Nº 7	687.9
	subc. Nº 8	610.6
	subc. Nº 10 (salar norte)	116.8
Subtotal entradas [l/s]		**2302.2**
Evaporación desde el salar, subc. Nº 10 (salar norte) [l/s]		1902.8
Flujo pasante desde subc. 10 (salar norte) a subc. 9 (salar sur, zona modelada) [l/s]		399.5
Subtotal salidas [l/s]		**2302.2**
Entradas - Salidas [l/s]		**0.0**

TABLA 4 BALANCE ZONA SUR (MODELADA)

Descargas de subcuencas al salar (flujos pasantes de entrada) [l/s]	subc. Nº 1	937.4
	subc. Nº 4	251.2
	subc. Nº 5	445.5
	subc. Nº 9 (salar sur, zona modelada, corresponde a recarga superficial)	276.1
	subc. Nº 11	701.6
	subc. Nº 12	558.0
	subc. Nº 13	128.0
Flujo pasante subc. 10 a subc. 9 (desde salar norte a zona modelada) [l/s]		399.5
Subtotal entradas [l/s]		**3697.2**
Evaporación desde el salar, subc. Nº 9 (salar sur, zona modelada) [l/s]		3697.2
Subtotal salidas [l/s]		**3697.2**
Entradas - Salidas [l/s]		**0.0**

La operación del modelo con las condiciones de borde de entrada y salida permitió efectuar un ajuste inicial de conductividades hidráulicas y de los parámetros que determinan la evaporación. En el capítulo 5 se detalla el proceso realizado.

5 CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE

El proceso de calibración del modelo en régimen permanente, consistió en su operación sucesiva, modificando las distribuciones de conductividad hidráulica y evaporación, además de los parámetros que determinan su representación funcional. Las recargas incorporadas son constantes y corresponden a las incluidas en la Tabla 4. Este escenario se puede asociar a un instante previo a la explotación del sistema, en un estado promedio de equilibrio. En el Capítulo 6 se incorpora la explotación de salmuera en el núcleo y la extracción de agua dulce en la cuenca.

El resultado de cada simulación consiste en una superficie que representa el nivel de salmuera en el salar. Ésta, a su vez, se comparó con datos de niveles de salmuera

puntuales medidos. El procedimiento se realizó de manera iterativa hasta lograr una diferencia reducida entre los valores medidos y los simulados.

Se cuenta con 91 puntos de control; de ésos, 50 pertenecen a SCL y 41 a SQM. En esos pozos de observación, se han medido los niveles de salmuera a través del tiempo. En algunos pozos controlados por SCL, las mediciones comenzaron en agosto de 1989 y en la mayoría de los pozos de SQM, los niveles se registran desde enero de 1997.

Se graficaron los niveles históricos de todos los pozos de observación y se extrapolaron niveles representativos del estado inicial de salar; es decir, en su estado inalterado, previo al inicio de la extracción de salmuera.

Se compararon y homogeneizaron los valores de las elevaciones de los niveles de salmuera entre pozos cercanos, dado que en el estado inalterado, el nivel de salmuera del núcleo debió haber sido bastante uniforme.

Se calibró el modelo en régimen permanente con las elevaciones puntuales de los niveles de salmuera iniciales, extrapoladas de los limnigramas y posteriormente homogeneizadas por sector. En la Figura 9 se muestran las cotas del nivel de salmuera inicial en cada punto de control y las curvas equipotenciales trazadas en función de éstos.

5.1 Ajuste de la representación de la evaporación

Como se indicó en el punto 4.2b, el software Visual Modflow permite representar la evaporación a través de funciones dependientes de una tasa de evaporación máxima ($(T_{ev})_{max}$) y de una profundidad de extinción (H_{ext}). Los caudales de evaporación son un resultado de la operación del modelo, dependientes del estado del sistema y de esos parámetros. Por ello, los parámetros asignados a celdas de evaporación fueron calibrados, tratando de reproducir las tasas de evaporación medidas por Mardones.

En la Figura 10 se muestra la distribución de la evaporación resultante del proceso de calibración en régimen permanente. Los valores obtenidos a través de la operación del modelo para las tasas de evaporación, se asemejan bastante a los valores adoptados (ver Tabla 1), para el balance que permitió estimar los caudales de recarga. En la Tabla 5 y en el Gráfico 3 se comparan los valores bases (Tabla 1), con los valores que se obtienen de la operación del modelo en régimen permanente. Debe reiterarse que las tasas de evaporación así determinadas corresponden al promedio de la evaporación en cada zona, ante una condición de equilibrio que existía antes del inicio de las operaciones en el núcleo del salar y de las extracciones de agua dulce, tanto superficiales como desde pozos en cuencas aledañas.

FIGURA 9 COTAS NIVEL DE SALMUERA INICIAL EN PUNTOS DE CONTROL Y CURVAS EQUIPOTENCIALES (ESCALA 1:250.000)

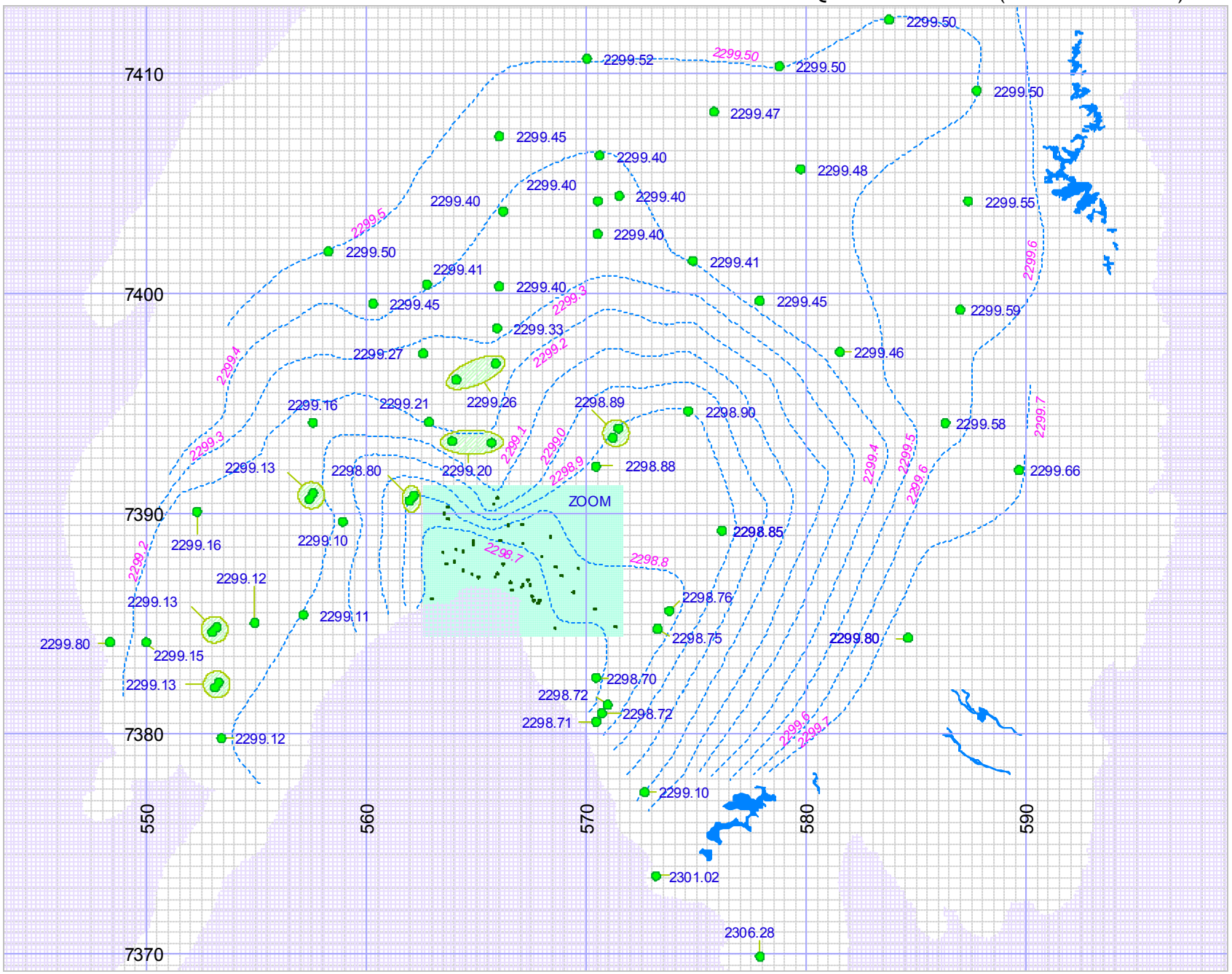


FIGURA 10

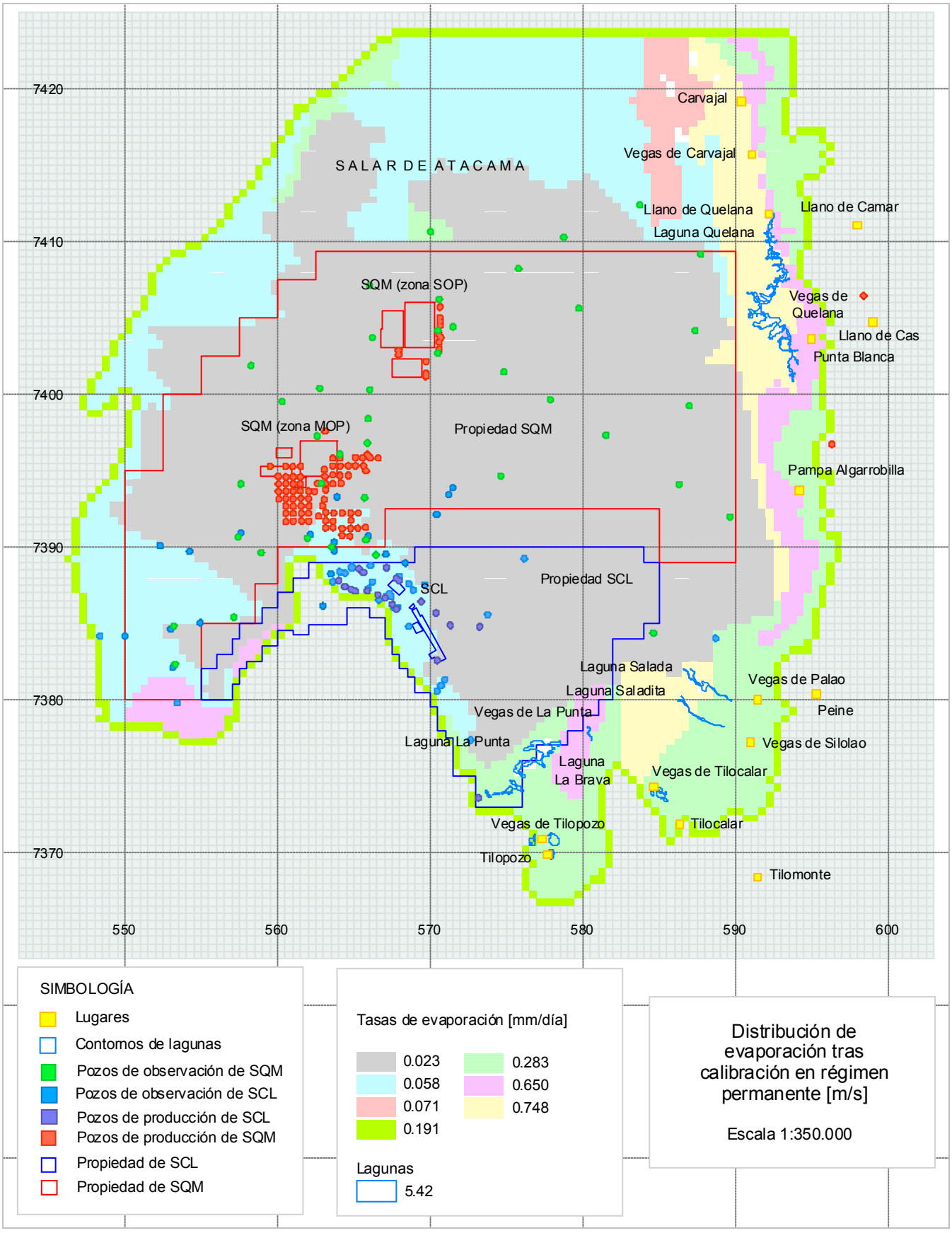
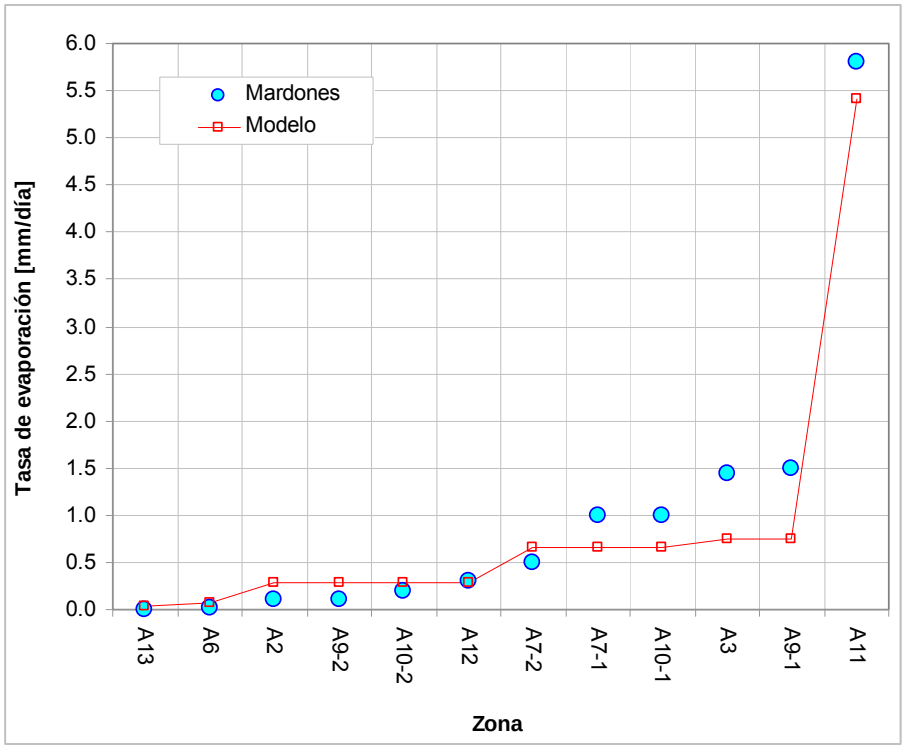

7420
7410
7400
7390
7380
7370
550
560
570
580
590
600
SALAR DE ATACAMA
Carvajal
Vegas de Carvajal
Llano de Quelana
Laguna Quelana
Llano de Camar
SQM (zona SOP)
Vegas de Quelana
Llano de Cas
Punta Blanca
SQM (zona MOP)
Propiedad SQM
Pampa Algarrobilla
Propiedad SCL
SCL
Laguna Salada
Laguna Saladita
Vegas de Palao
Peine
Vegas de La Punta
Laguna La Punta
Vegas de Silolao
Laguna
La Brava
Vegas de Tilocalar
Vegas de Tilopozo
Tilocalar
Tilopozo
Tilomonte
SIMBOLOGÍA
Lugares
Contornos de lagunas
Pozos de observación de SQM
Pozos de observación de SCL
Pozos de producción de SCL
Pozos de producción de SQM
Propiedad de SCL
Propiedad de SQM
Tasas de evaporación [mm/día]
0.023
0.058
0.071
0.191
0.283
0.650
0.748
Lagunas
5.42
Distribución de evaporación tras calibración en régimen permanente [m/s]
Escala 1:350.000

TABLA 5 TASAS DE EVAPORACIÓN DE MARDONES Y MODELADAS

Zona definida por mardones	Tasa de evaporación adoptada (Tabla 1) [mm/día]	Tasa de evaporación (resultado modelo en régimen permanente) [mm/día]
A1	0.400	fuera de zona modelada
A2	0.100	0.283
A3	1.450	0.748
A4	0.300	fuera de zona modelada
A5	0.100	fuera de zona modelada
A6	0.012	0.071
A7-1	1.000	0.650
A7-2	0.500	0.650
A8-1	0.100	fuera de zona modelada
A8-2	1.000	fuera de zona modelada
A9-1	1.500	0.748
A9-2	0.100	0.283
A10-1	1.000	0.650
A10-2	0.200	0.283
A11	5.800	5.420
A12	0.300	0.283
A13	0.005	0.033

GRÁFICO 3 TASAS DE EVAPORACIÓN REGISTRADAS POR MARDONES Y RESULTANTES DE LA OPERACIÓN DEL MODELO



5.2 Balance en régimen permanente

En la Tabla 6 se muestra el resultado del balance global (*Zone Budget*) para la operación de modelo en régimen permanente.

TABLA 6 BALANCE EN RÉGIMEN PERMANENTE

Componente en *Visual Modflow*	**Caudal [l/s]**	**Elemento del sistema representado**
Wells	3421	Escorrentía total entrante por los bordes (condición de borde de flujo)
Recharge	276	Precipitación efectiva sobre el salar (zona modelada)
ET	-3075	Evaporación desde medios sólidos en zona modelada
River Leakage	-622	Evaporación desde lagunas en zona modelada
Suma	**0.0**	
Magnitudes globales	**Caudal [l/s]**	**Elementos del sistema representados**
Recarga Total	3697	Escorrentía total entrante por los bordes y precipitación efectiva sobre el salar
Evaporación Total	-3697	Evaporación desde medios sólidos y lagunas en zona modelada
Suma	**0.0**	

Como se puede apreciar en la Tabla 10, los flujos resultantes de la operación del modelo en régimen permanente, reproducen los caudales previamente definidos para este escenario (Tabla 4).

6 CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

La calibración en régimen permanente cubrió el período comprendido entre el 1 de abril de 1988 y el 1 de junio de 2004. Los intervalos de modelación (Stress Periods) varían entre 28 y 183 días (1 y 6 meses); éstos, se determinaron al superponer las reglas semestrales de bombeo y los meses secos y húmedos seguidos, tal como se puede apreciar en el siguiente esquema:

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
bombeo	semestre bombeo de invierno						semestre bombeo verano					
recarga	meses con lluvia			meses sin lluvia				con lluvia	meses sin lluvia			
intervalos de simulación (Stress Periods)	SP-1			SP-2			SP-3	SP-4	SP-5			

Fue necesario juntar meses secos y meses húmedos seguidos, debido a que la simulación mensual genera archivos de entrada excesivamente grandes que dificultan el manejo de la información, además de incrementar los tiempos de simulación.

A continuación se explica en detalle el procedimiento utilizado en la calibración impermanente del modelo.

6.1 Extracciones superficiales y subterráneas en la cuenca de aporte superficial al salar

En la cuenca de aporte efectivo circundante al Salar de Atacama existen captaciones superficiales y subterráneas que extraen el recurso hídrico, disminuyendo el flujo de entrada al sistema.

Para cuantificar magnitud y efecto real de dichas captaciones, se consultó la Minuta Técnica Nº 60[†] de la DGA y se adquirió el total de derechos superficiales y subterráneos otorgados, del Centro de Información de Recursos Hídricos de la misma DGA.

Las extracciones más importantes de agua dulce en el entorno del salar, se efectúan en el Callejón de Tilopozo, desde los sectores de Negrillar y Monturaqui. Donde existen pozos que poseen derechos otorgados, los que han sido aprovechados parcialmente.

En esa área de explotación se cumple por un lado que los niveles de la napa de agua dulce están muy por sobre la cota del salar (a más de 500 metros), los pozos de bombeo más cercanos están a 25 kilómetros y los acuíferos tienen una gran potencia, por lo que contienen un enorme volumen de agua almacenado; aquello ha permitido que los recursos captados en esas zonas, hasta el momento, provengan de ese almacenamiento.
Lo anterior ha sido comprobado a través de periódicos monitoreos de niveles de agua subterránea realizados por las empresas CMZ y MEL; éstos han demostrado que los niveles en el área de Tilopozo (zona de descarga de la subcuenca del Callejón de Tilopozo), han permanecido inalterados a través del tiempo. Lo que es equivalente a afirmar que los flujos subterráneos pasantes hacia el salar, no han sido afectados hasta la fecha.

Dado que la descarga hacia el salar ha permanecido estable a través del tiempo, es razonable suponer que el volumen almacenado y las recargas locales han sustentado esa explotación; por lo tanto, esas extracciones no deberían influir en el balance de la representación elaborada.

El resto de las captaciones subterráneas, existentes en la cuenca de aporte superficial del salar, se ubican más cerca de éste, por lo que se han incluido en el balance (ver Figura 11).

Las captaciones superficiales en la cuenca, por otro lado, obtienen sus recursos directamente de los flujos superficiales que podrían llegar al salar, luego, fueron todas incorporadas en el cálculo (ver Figura 11).
En la Tabla 6 se presentan los principales antecedentes asociados a las captaciones subterráneas y superficiales que influyen en los aportes laterales al salar; en la Figura 11 se muestran sus ubicaciones.

[†] "Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II Región", Mayo de 1999.

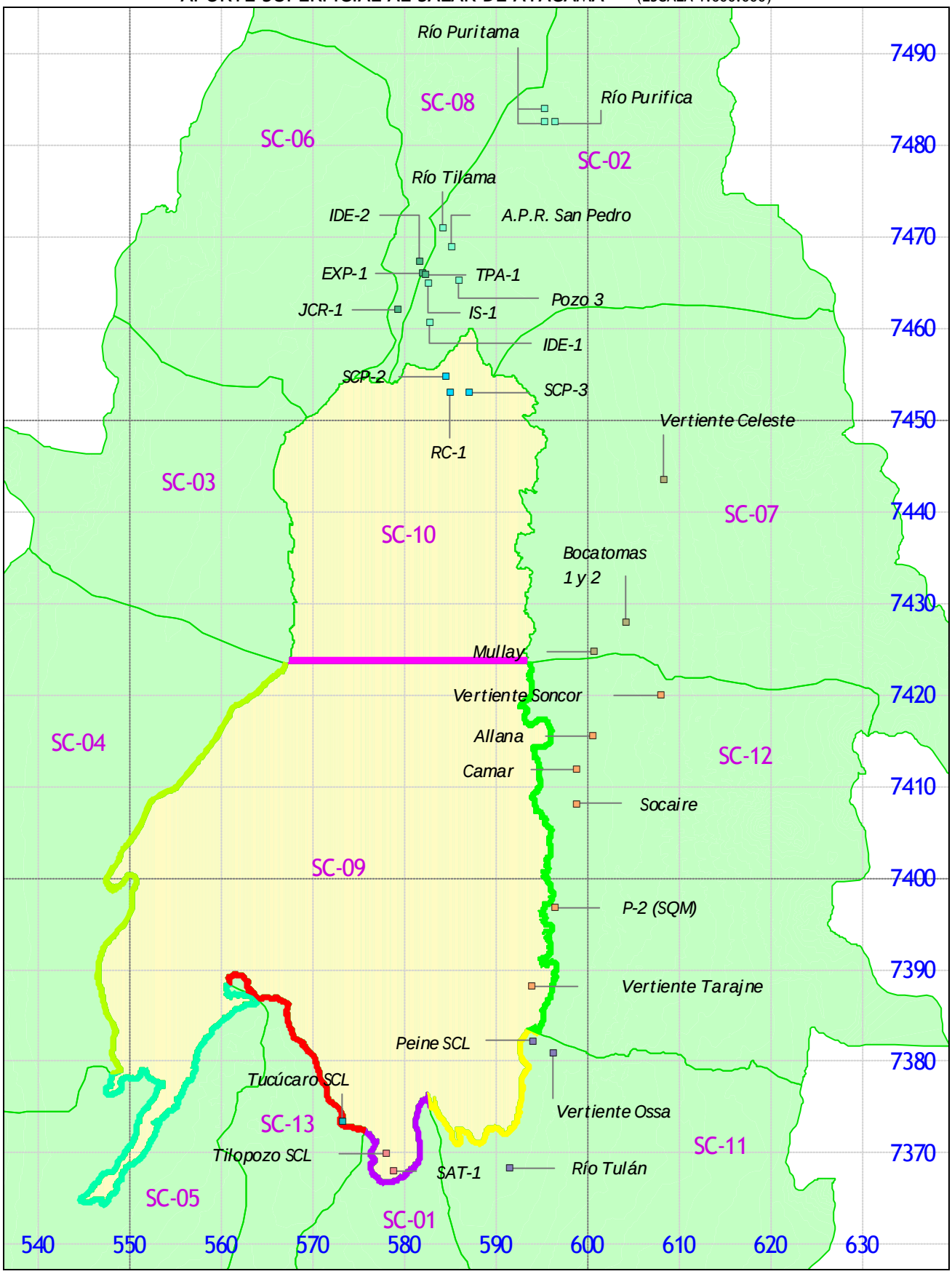
Cada caudal de derecho demandado, incluido en la Tabla 6, fue restado a los flujos de recarga lateral $(R^k_z)^{\ddagger}$, a partir de la fecha de resolución (ver Tabla 6). En el punto 6.3 se detalla la forma cómo se efectuó la resta de las extracciones.

TABLA 6 DERECHOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS OTORGADOS EN CUENCA DE APORTE SUPERFICIAL DEL SALAR DE ATACAMA (EXCEPTO SECTORES NEGRILLAR Y MONTURAQUI)

Nº	captación	tipo	coord. UTM este [m]	coord. UTM norte [m]	Peticionario	caudal otorgado [l/s]	uso	fecha de resol.	subcuenca	Caudal demandado [l/s]
1	SAT-1	subt.	578696	7367992	Compañía Minera Zaldívar	3.8	M	Sep-2000	sc01	3.8
2	Pozo 3	subt.	585825	7465175	Juana Ramos Leano	45.0	I	Sep-1996	sc02	13.5
3	A.P.R. San Pedro	subt.	585086	7468934	Dirección General de Obras Públicas	40.0	P	Jun-2001	sc02	30.0
4	IS-1	subt.	582595	7464847	Inversiones Solcor Ltda.	2.5	R	Abr-2005	sc02	1.0
5	IDE-1	subt.	582701	7460556	Inversiones D'Etigny S.A.	1.8	R	May-2005	sc02	0.7
6	Mullay	subt.	600585	7424723	SQM	40.0	M	Mar-1988	sc07	40.0
7	Tórtola 1	subt.	581841	7465970	Explora S.A.	15.0	R	Nov-1997	sc08	6.0
8	TPA-1	subt.	582174	7465857	Tomás Poblete Alay	3.8	R	May-2005	sc08	1.5
9	JCR-1	subt.	579238	7462051	Juan Carlos Riquelme Paillapán	1.8	R	May-2005	sc08	0.7
10	IDE-2	subt.	581650	7467250	Inversiones D'Etigny S.A.	1.0	R	Jun-2005	sc08	0.4
11	SCP-2	subt.	584411	7454750	Compañía Minera Riochilex S.A.	150.0	M	Feb-2000	sc10	150.0
12	SCP-3	subt.	586949	7452936	Compañía Minera Riochilex S.A.	150.0	M	Feb-2000	sc10	150.0
13	RC-1	subt.	584979	7453018	Compañía Minera Riochilex S.A.	150.0	M	Feb-2000	sc10	150.0
14	Peine	subt.	593937	7382218	SCL	5.0	P	Sep-2000	sc11	3.8
27	Camar	subt.	598773	7411818	SQM	60.0	M	Mar-1988	sc12	60.0
28	Socaire	subt.	598750	7408128	SQM	65.0	M	Mar-1988	sc12	65.0
29	Allana	subt.	600493	7415510	SQM	40.0	M	Mar-1988	sc12	40.0
30	P2	subt.	596272	7396804	SQM	35.0	M	Sep-1997	sc12	35.0
31	Tucúcaro	subt.	573225	7373400	SCL	10.0	I	Jul-1996	sc13	3.0
32	Vertiente Tilopozo	sup.	577896	7369900	SCL	8.5	I	1981	sc01	6.4
33	Río Tilama	sup.	584185	7470925	A. Atacameña Río Vilama	180.0	R		sc02	72.0
34	Río Puritama	sup.	595270	7482460	A. Atacameña Río Vilama	21.0	R		sc02	8.4
35	Río Puritama	sup.	595275	7484000	A. Atacameña Río Vilama	10.0	R		sc02	4.0
36	Río Purifica	sup.	596430	7482460	A. Atacameña Río Vilama	10.0	R		sc02	4.0
37	Bocatoma 1	sup.	604153	7427945	A. Atacameña Aguas Blancas	110.0	R		sc07	44.0
38	Vertiente Celeste	sup.	608330	7443400	A. Atacameña Celeste	4.0	R		sc07	1.6
39	Vertiente Ossa	sup.	596200	7380930	Comunidad Atacameña Peine	18.6	R		sc11	7.4
40	Río Tulán	sup.	591400	7368340	Comunidad Atacameña Peine	43.0	R		sc11	17.2
41	Vertiente Soncor	sup.	607950	7419969	A. Atacameña Soncor	12.3	R	Nov-1997	sc12	4.9
42	Vertiente Tarajne	sup.	593880	7388240	Comunidad Atacameña Peine	1.7	R		sc12	0.7
	Suma					1239				925

‡ R^k_z: recarga efectiva en el mes k en el rango de elevación z. z es el promedio de un rango (z_{min}, z_{max}).

FIGURA 11 DERECHOS OTORGADOS EN CUENCA DE APORTE SUPERFICIAL AL SALAR DE ATACAMA (ESCALA 1:600.000)



6.2 Recargas artificiales de salmuera al núcleo

La recarga artificial de salmuera al núcleo consiste en la reinyección de la salmuera que no se usa en el proceso productivo. Esta salmuera puede reinyectarse al salar en forma directa o indirecta.

La reinyección directa corresponde al bombeo y descarga de salmuera en un punto específico, recargando el volumen de salmuera almacenado.

La reinyección indirecta, consiste en la infiltración de salmuera desde las tortas de acopio de sales de descarte húmedas.

Los procesos que realiza SCL generan acopios de sales con humedades entre 4 y 8 %, humedad que es retenida por la torta y no genera infiltración.

En los estudios realizados por SQM, el único antecedente relacionado con extracciones mencionado es el caudal total promedio anual de bombeo (578 l/s). No se ha entregado información relacionada con reglas históricas de producción, ni los caudales y puntos de reinyección. Sí se ha mencionado que SQM reinyecta salmuera a través de ambos mecanismos, directo e indirecto.

Por consiguiente, no es posible agregar dicha componente en la presente representación.

6.3 Recargas históricas

Como se vio en el balance para régimen permanente, incluido en el Capítulo 3, las recargas superficiales y los flujos de entrada al sistema se calcularon según la función R^k_z descrita en el punto 3.4[**].

Como se detalló en el punto 4.2, los flujos pasantes hacia el salar fueron representados en el modelo a través de las condiciones de borde de flujo. En el escenario de calibración impermanente y en los escenarios futuros, éstos se incorporaron como series de caudales variables en el tiempo, representando las variaciones hidrológicas históricas.

Para el escenario histórico de calibración, se deben considerar las extracciones en la cuenca de aporte superficial, descritas en el punto 6.1.

Los caudales demandados por cada captación corresponden a los caudales netos que teóricamente se extraerían desde cada captación; la fracción de los caudales nominales que representan estos caudales netos se obtuvo de la Minuta Técnica N° 60 de la DGA [††].
Los flujos pasantes, desde cuencas laterales hacia el volumen de control definido, resultan nulos para algunos intervalos del período de simulación histórico considerado;

[**] R^k_z: recarga efectiva en el mes k en el rango de elevación z. z es el promedio de un rango (z_{min}, z_{max}).
[††] "Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II Región", Minuta Técnica N° 60, DGA Mayo de 1999.

por ello, los caudales demandados no se pueden restar de manera directa. Por esa razón, se ponderaron todos los aportes mensuales por un factor (f) calculado en función de los caudales demandados y el caudal promedio de la estadística de flujos pasantes. De esa forma, las captaciones subterráneas ubicadas en las cuencas de aporte superficial, cercanas al salar, fueron incorporadas al cálculo a través de la siguiente expresión:

$$\{[R^k]_{sc\ j}\}^{corr1} = f \cdot \{[R^k]_{sc\ j}\}\ ; \quad con \quad f = (1 - \Sigma[Q^{dda1}]_{sc\ j} / \langle\{[R]_{sc\ j}\rangle\}) \qquad (5)$$

donde:

$\langle\{[R]_{sc\ j}\rangle$: caudal promedio pasante desde la subcuenca j hacia el volumen de control (zona modelada).
$\Sigma[Q^{dda1}]_{sc\ j}$: Suma de caudales demandados según derechos subterráneos en subcuenca j.
$\{[R^k]_{sc\ j}\}^{corr1}$: caudal pasante desde la subcuenca j en el mes k hacia el volumen de control (zona modelada), corregido según caudales de captaciones subterráneas demandadas.

Los caudales de captaciones superficiales ubicadas en el área oriente del salar (subcuencas 7, 11 y 12) se restaron de manera directa, puesto que éstas pueden ejercer sus derechos sólo cuando existe flujo superficial, es decir, en los períodos húmedos considerados. Para esas captaciones se uso la siguiente expresión:

$$\text{si } (\{[R^k]_{sc\ j}\}^{corr1} -) < \Sigma[Q^{dda2}]_{sc\ j}\ , \quad \text{entonces:} \quad \{[R^k]_{sc\ j}\}^{corr2} = 0; \qquad (6)$$

$$\text{si no: } \{[R^k]_{sc\ j}\}^{corr2} = (\{[R^k]_{sc\ j}\}^{corr1} - \Sigma[Q^{dda2}]_{sc\ j})$$

$\Sigma[Q^{dda2}]_{sc\ j}$: Suma de caudales demandados según derechos superficiales en la subcuenca j (con j=7, 11 y 12).
$\{[R^k]_{sc\ j}\}^{corr2}$: caudal pasante desde la subcuenca j en el período k hacia el volumen de control (zona modelada), corregido según caudales demandados por captaciones superficiales en cuencas 7, 11 y 12.

Las captaciones superficiales ubicadas hacia el norte del salar, se incorporaron de manera análoga a las subterráneas; es decir, en la expresión (5), puesto que en esa zona los flujos superficiales son más estables a través del tiempo.

Cada caudal de derecho demandado considerado se restó a la recarga a partir de la fecha de resolución que constituyó el derecho de aguas (ver Tabla 6).

6.4 Bombeos históricos

Existen 3 áreas principales de bombeo de salmuera en el núcleo del salar:

a) SQM-SOP
b) SQM-MOP
c) SCL

Los datos asociados a las zonas SQM-SOP y SQM-MOP se conocen sólo parcialmente, puesto que SQM, a través del tiempo, ha mantenido reserva con relación a su extracción de salmuera desde el núcleo.

Se conocen datos globales de producción y se ha obtenido ubicaciones aproximadas de los pozos de bombeo de SQM de una figura incluida en el estudio de la referencia[⌗⌗].

En ese trabajo se afirma que la extracción en SOP (norte) corresponde aproximadamente al 50% del bombeo total de SQM, desde el año 1997 en adelante. La extracción de la zona MOP (sur) corresponde al 100% de extracción total de SQM, en los años 1995 y 1996, y al 50% extracción total SQM desde el año 1997 en adelante. Los caudales bombeados históricamente desde las zonas MOP y SOP son 276 l/s y 302 l/s, respectivamente.

Por otro lado, el bombeo histórico de SCL es de **88 l/s** y comenzó a inicios de 1989.

Debido a la variación estacional de la evaporación desde las piscinas de SCL y SQM, las demandas de salmuera varían estacionalmente. El caudal de salmuera bombeado entre los meses de abril y septiembre corresponde aproximadamente al 50 % del caudal bombeado entre octubre y marzo.

[⌗⌗] Proyecto de estudio y monitoreo del recurso hídrico del Salar de Atacama, Dictuc, 2004.

Los antecedentes indicados anteriormente se han resumido a continuación:

SCL: Bombeo desde enero de 1989	Caudales [l/s]
Caudal total promedio anual efectivamente bombeado por SCL (Q)	$[Q_{SCL}]^{anual}$ = 88
Caudal promedio bombeado entre los meses de abril y septiembre (0.66·Q)	$[Q_{SCL}]^{abr\text{-}sep}$ = 58
Caudal promedio bombeado entre los meses de octubre y marzo (1.33·Q)	$[Q_{SCL}]^{oct\text{-}mar}$ = 117
Número de pozos SCL	14
SQM : Bombeo desde enero de 1995	
Caudal total promedio anual bombeado por SQM	$([Q_{SQM}]^{anual})_{TOT}$ = 578
Caudal promedio anual bombeado desde Sector MOP	$([Q_{SQM}]^{anual})_{MOP}$ = 276
Caudal promedio anual bombeado desde Sector SOP	$([Q_{SQM}]^{anual})_{SOP}$ = 302
Caudal promedio bombeado entre los meses de abril y sep. Sector MOP	$([Q_{SQM}]^{abr\text{-}sep})_{MOP}$ = 184
Caudal promedio bombeado entre los meses de abril y sept. Sector SOP	$([Q_{SQM}]^{abr\text{-}sep})_{SOP}$ = 201
Caudal promedio total bombeado entre los meses de abril y sept. por SQM	$([Q_{SQM}]^{abr\text{-}sep})_{TOT}$ = 385 l/s
Caudal promedio bombeado entre los meses de oct. y marzo Sector MOP	$([Q_{SQM}]^{oct\text{-}mar})_{MOP}$ = 368 l/s
Caudal promedio bombeado entre los meses de oct. y marzo Sector SOP	$([Q_{SQM}]^{oct\text{-}mar})_{SOP}$ = 403
Caudal promedio bombeado entre los meses de oct. y marzo por SQM	$([Q_{SQM}]^{oct\text{-}mar})_{TOT}$ = 771
Número de pozos Sector MOP	78
Número de pozos Sector SOP	13

Los bombeos se representaron semestralmente según los caudales anteriores, uniformemente distribuidos entre los pozos de SCL (14), SQM-MOP (78) y SQM-SOP (13).

6.5 Propiedades físicas del medio

El ajuste de las propiedades físicas del medio consistió en la modificación sucesiva de las distribuciones de conductividad hidráulica y porosidad efectiva, hasta reproducir adecuadamente la variación histórica de los niveles de salmuera medidos en 46 pozos de observación. Se seleccionaron como puntos de observación aquellos pozos ubicados fuera de la influencia dinámica directa de los pozos de bombeo, puesto que no se conoce la distribución histórica exacta de la extracción de SQM.

En la Figura 13 se muestran las ubicaciones de los pozos de control utilizados. En los Gráficos 4 se puede observar el ajuste obtenido y en las Figuras 14, 15 y 16 se presentan las distribuciones de conductividad hidráulica (k) y porosidad efectiva (S_Y).

Las propiedades físicas obtenidas (k y S_Y), permiten representar adecuadamente el comportamiento global del sistema.

Los rangos de variación de k y S_Y y la distribución usada al comenzar el proceso de ajuste, se obtuvieron de datos puntuales estimados de pruebas de bombeo. En el Anexo 2 se presentan en detalle los valores y los procedimientos para el cálculo de conductividades hidráulicas (k) y porosidades efectivas (S_y). En la Figura 12 se muestran los rangos (k y S_Y) obtenidos de pruebas de bombeo y los valores finalmente adoptados para la representación desarrollada.

En el mismo estudio de SQM mencionado anteriormente[§§], se señaló que la porosidad efectiva (S_Y) de los primeros 40 m del núcleo es en promedio aproximadamente un 4.4 %, con valores más grandes hacia el centro del núcleo y menores hacia su periferia.

Como se puede apreciar en la Figura 12, de acuerdo a la calibración del modelo desarrollado, se obtuvieron valores de porosidad efectiva que varían entre un 3.0 % y un 15 % (ver Figura 16).

Al estrato inferior, bajo los 40 m de profundidad, se le asignó una porosidad efectiva de 0.0027.

A pesar de no contar con una distribución histórica precisa para el bombeo de SQM, el buen ajuste logrado en los pozos de calibración y la reproducción de las tendencias de ascenso y descenso de los niveles de salmuera, permiten concluir que con la herramienta desarrollada es posible representar adecuadamente el comportamiento del sistema en todo el entorno de las áreas de bombeo, incluyendo particularmente las zonas protegidas de vegas y lagunas.

6.6 Balance escenario histórico de calibración en régimen impermanente

En los Gráficos x se presentan los caudales resultantes de la calibración del modelo para el período histórico comprendido entre abril de 1988 y junio de 2004. Los promedios incluidos en los gráficos y en la Tabla x, corresponden a ese período.

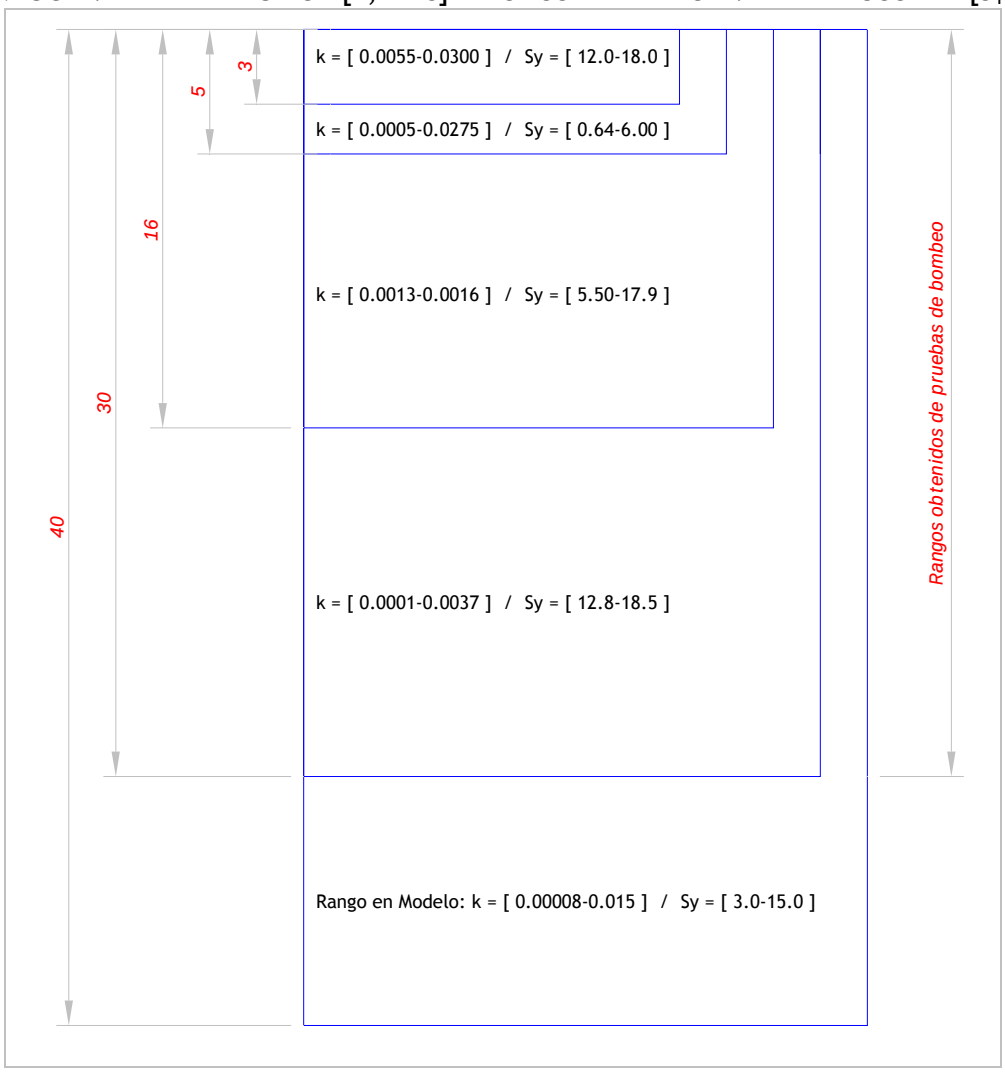
TABLA 1 FLUJOS PROMEDIOS RESULTANTES ESCENARIO DE CALIBRACIÓN [l/s]

recarga proveniente de cuencas laterales	recarga por lluvia sobre el salar	vaciamiento del volumen almacenado	bombeo	evaporación
2272.2	238.2	43.4	415.6	2138.2
entradas			salidas	
2553.8			2553.8	

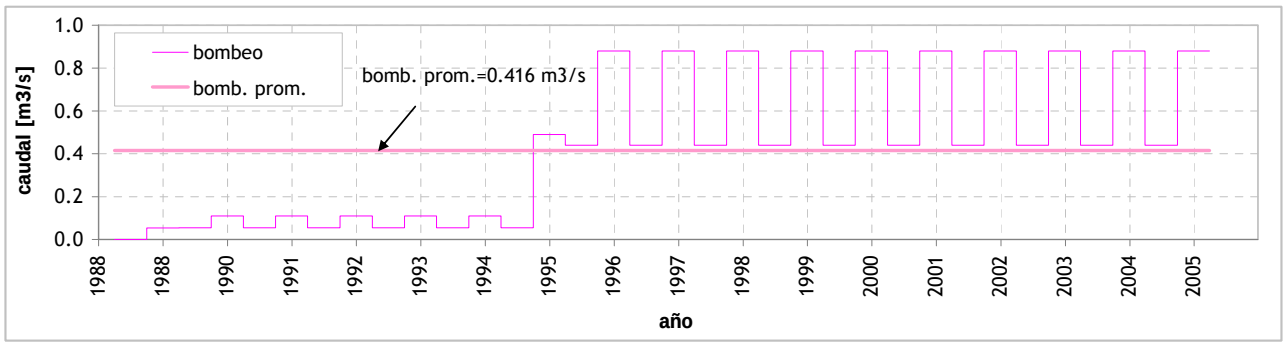
[período: abril de 1988 a junio de 2004]

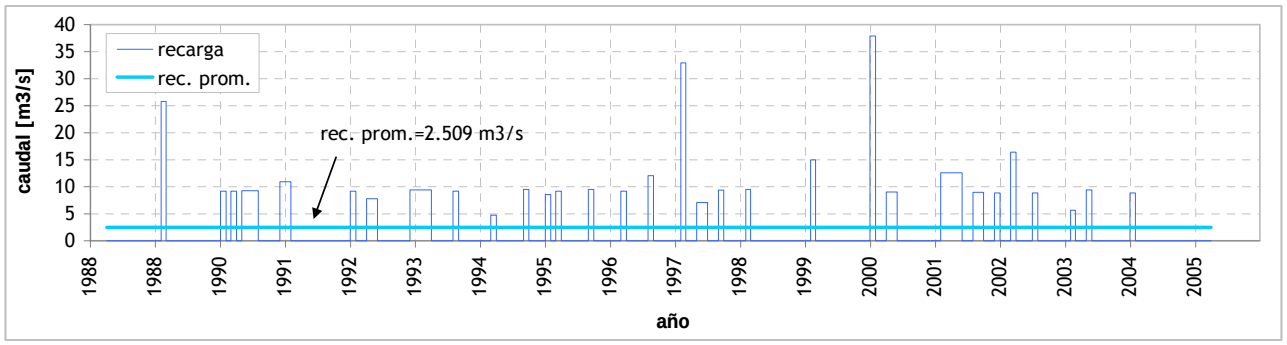
[§§] Proyecto de estudio y monitoreo del recurso hídrico del Salar de Atacama, Dictuc, 2004.

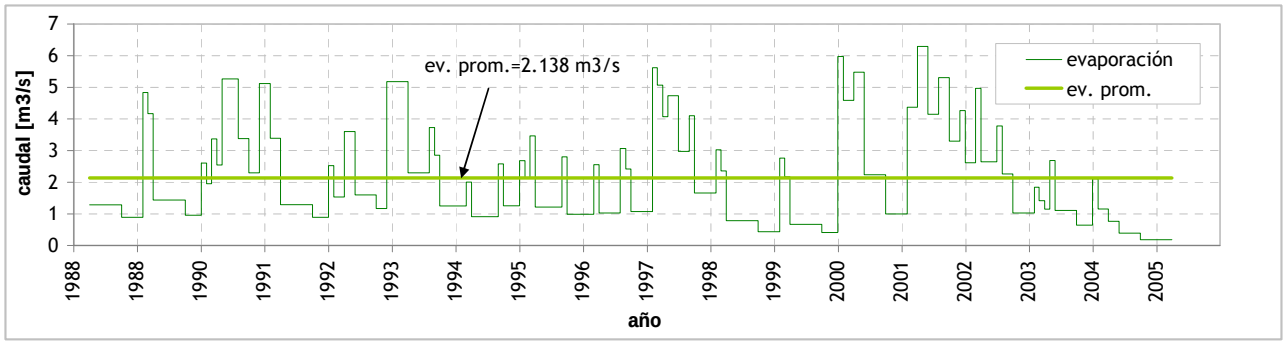
FIGURA 12
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA [k, m/s] Y POROSIDAD EFECTIVA DE LA COSTRA [S_Y, %]

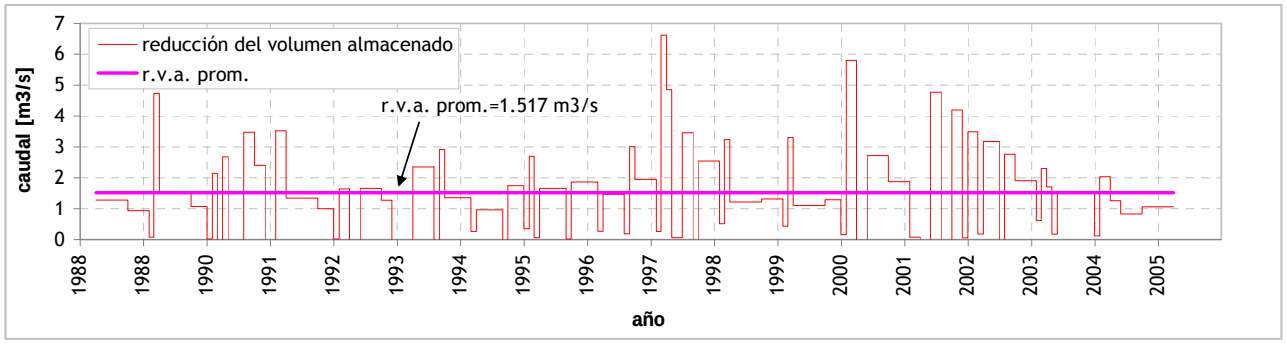


GRÁFICOS 1 FLUJOS RESULTANTES ESCENARIO DE CALIBRACIÓN









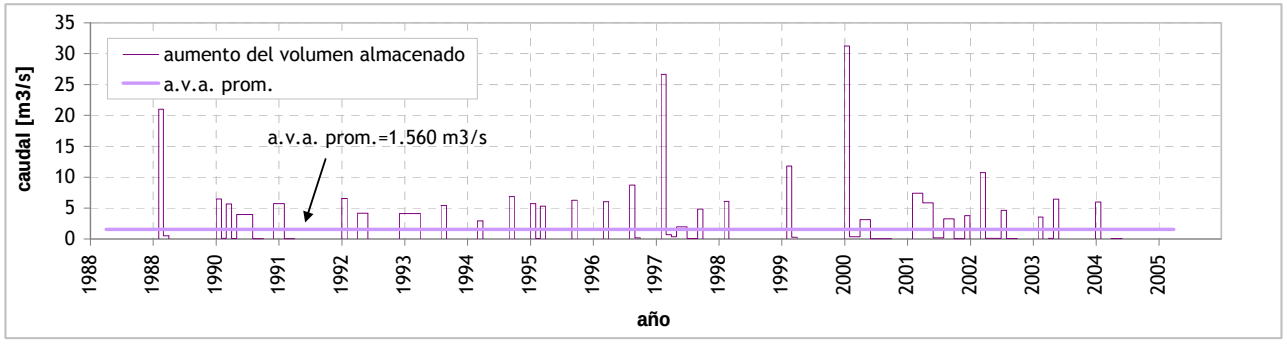
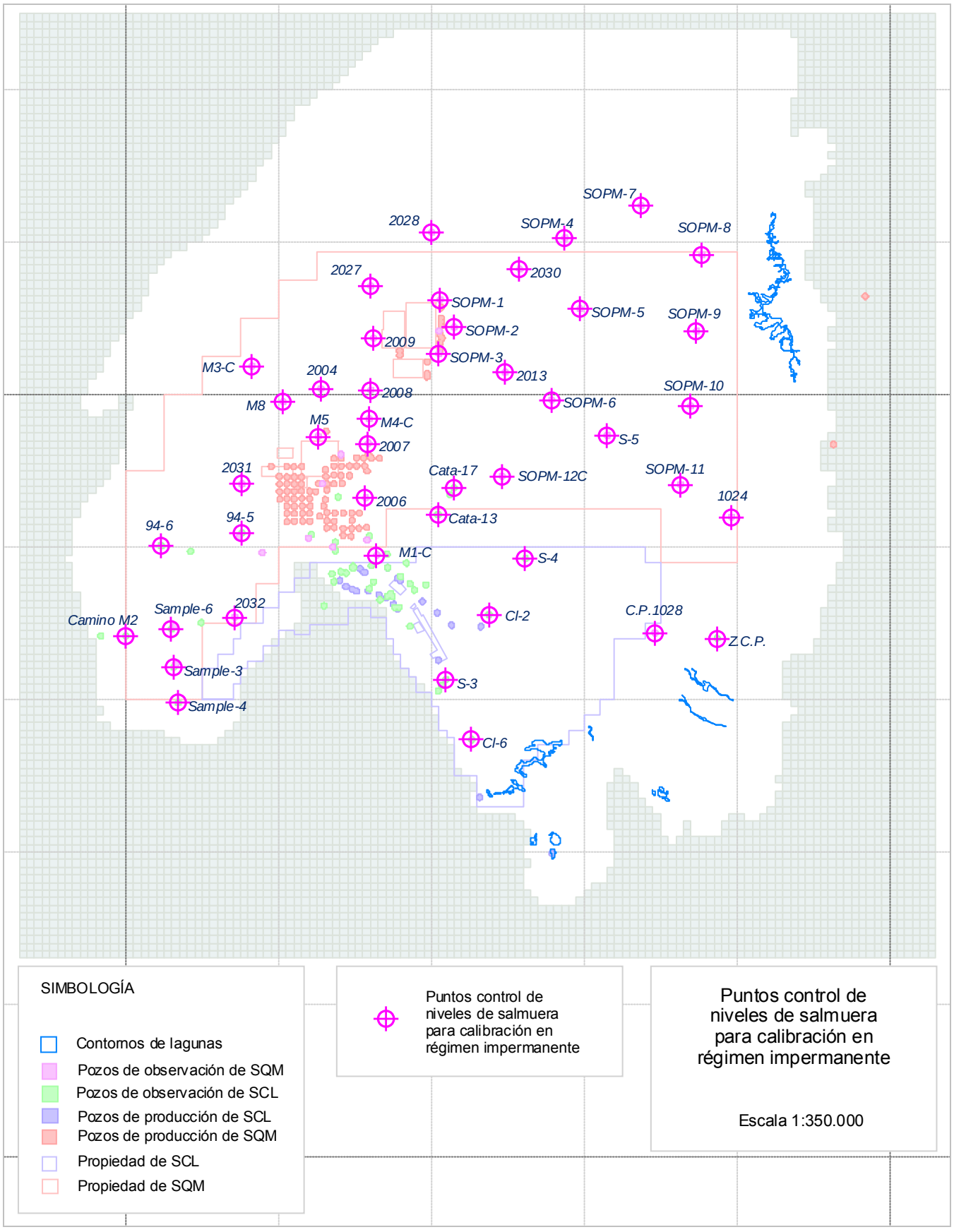
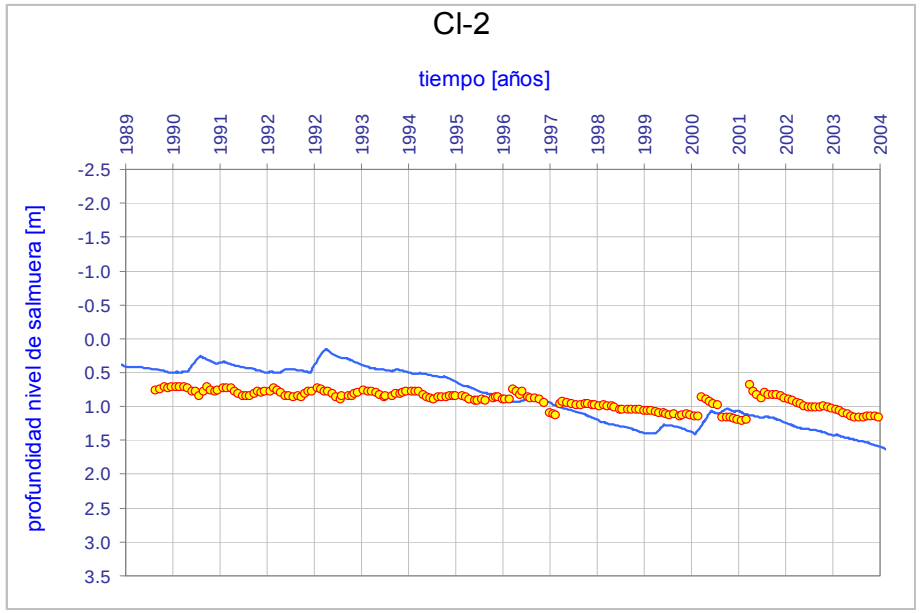
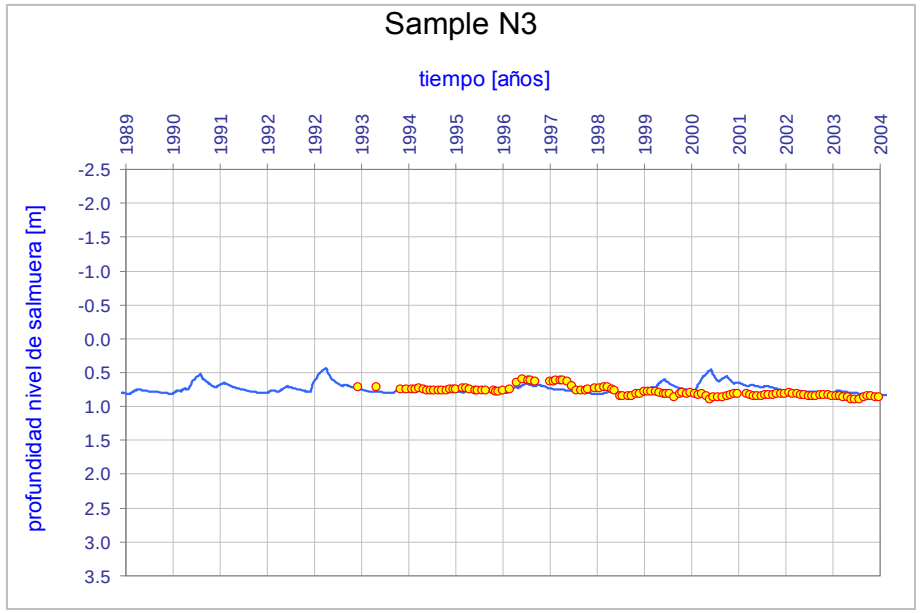


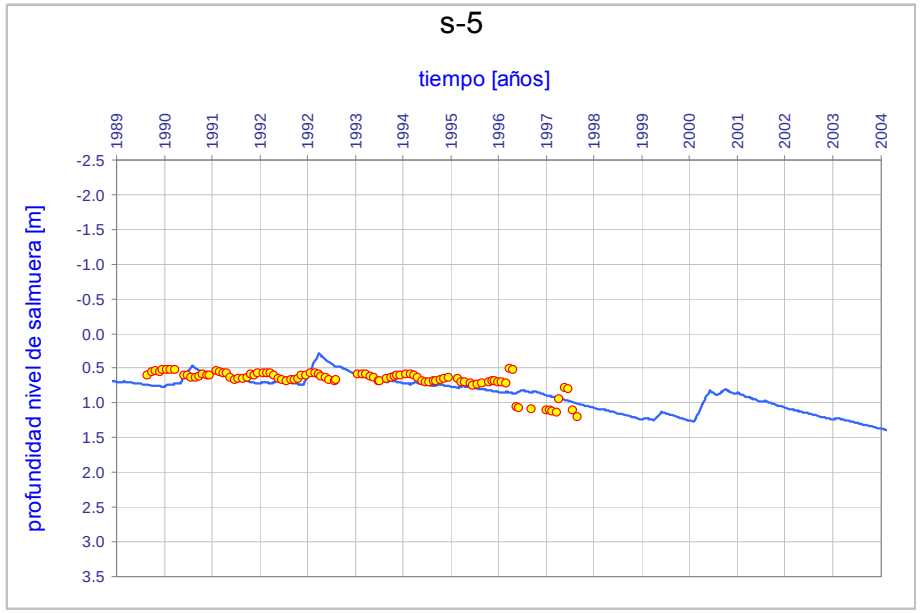
FIGURA 13

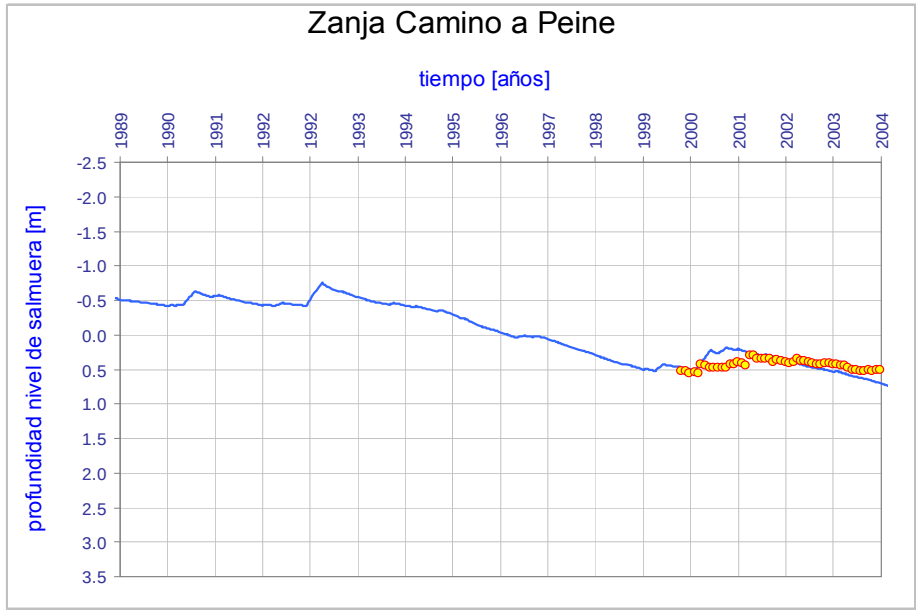

SOPM-7
2028
SOPM-4
SOPM-8
2027
2030
SOPM-1
SOPM-5
SOPM-9
SOPM-2
2009
SOPM-3
M3-C
2004
2013
2008
SOPM-10
M8
SOPM-6
M5
M4-C
S-5
2007
2031
Cata-17
SOPM-12C
SOPM-11
2006
1024
Cata-13
94-6
94-5
M1-C
S-4
Sample-6
2032
Cl-2
C.P.1028
Camino M2
Z.C.P.
Sample-3
S-3
Sample-4
Cl-6
SIMBOLOGÍA
Contornos de lagunas
Pozos de observación de SQM
Pozos de observación de SCL
Pozos de producción de SCL
Pozos de producción de SQM
Propiedad de SCL
Propiedad de SQM
Puntos control de niveles de salmuera para calibración en régimen impermanente
Puntos control de niveles de salmuera para calibración en régimen impermanente
Escala 1:350.000

GRÁFICOS 4 NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL) Y
MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

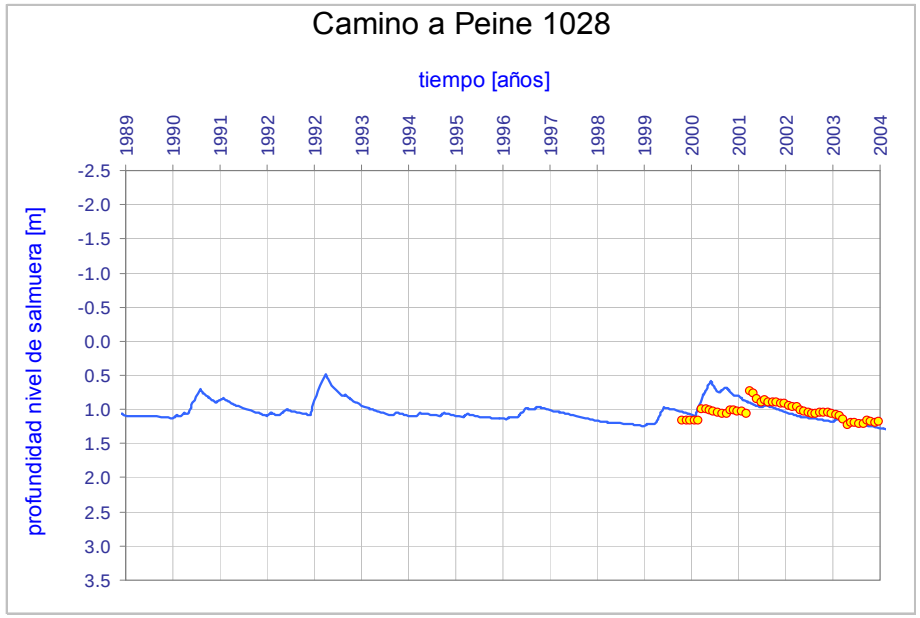


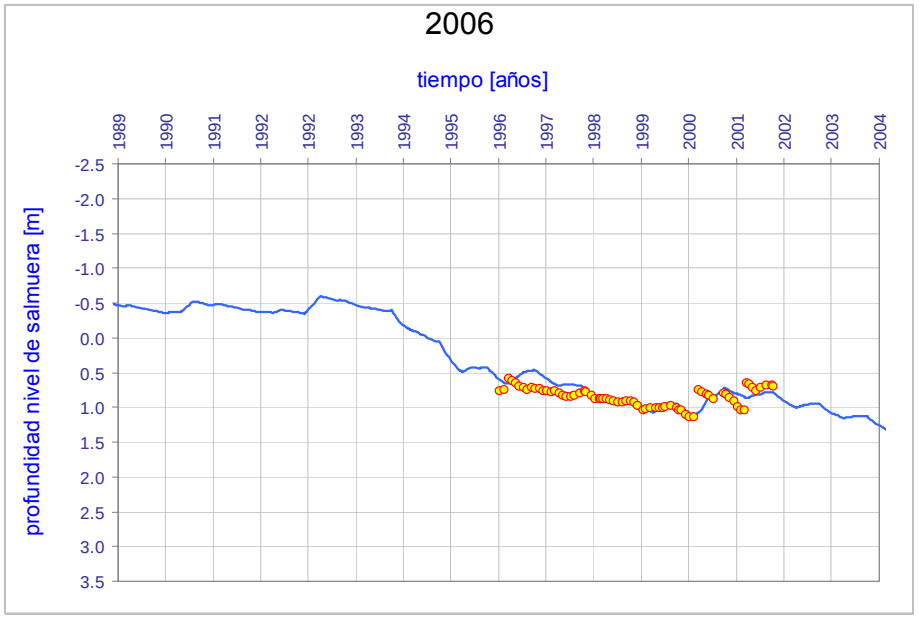


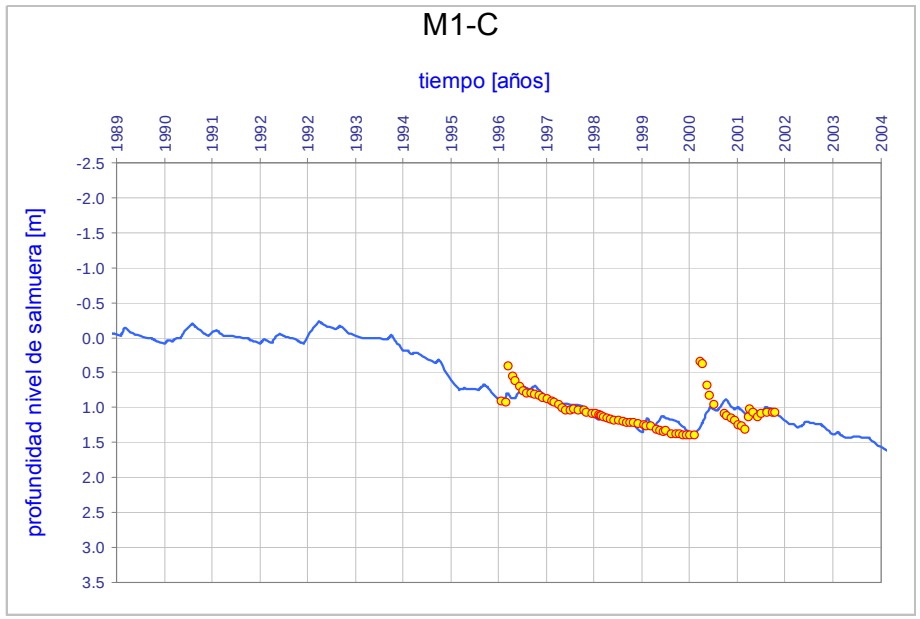


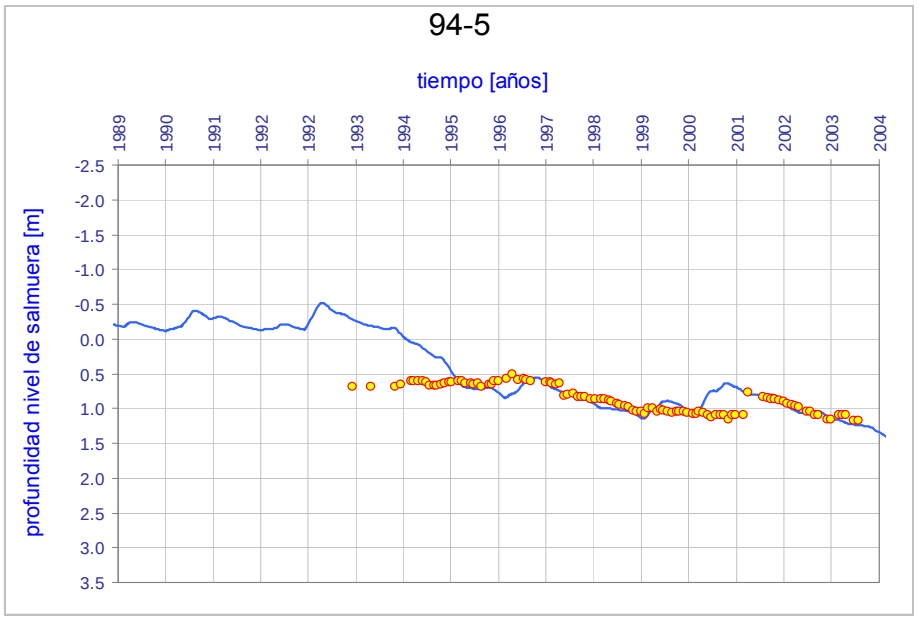


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

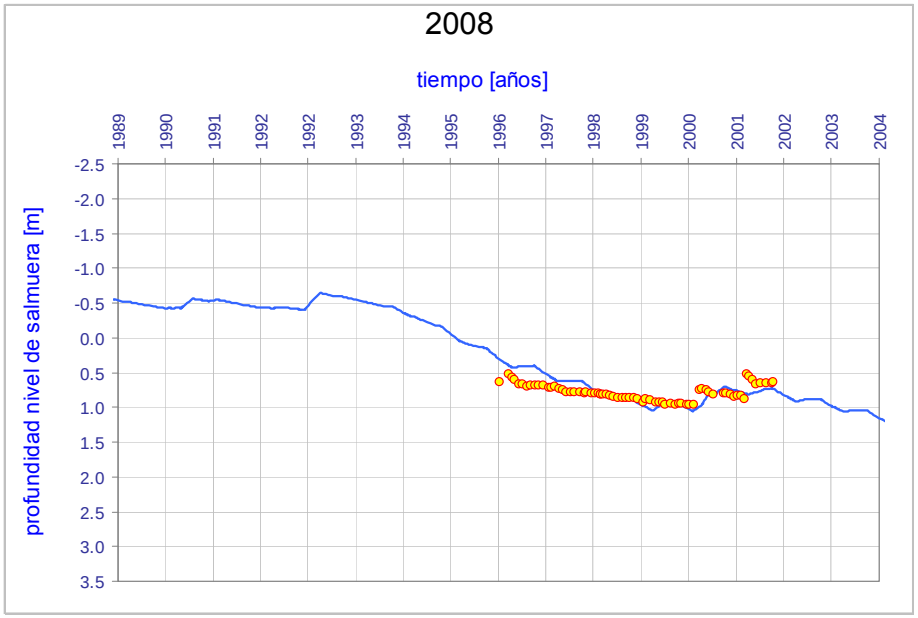


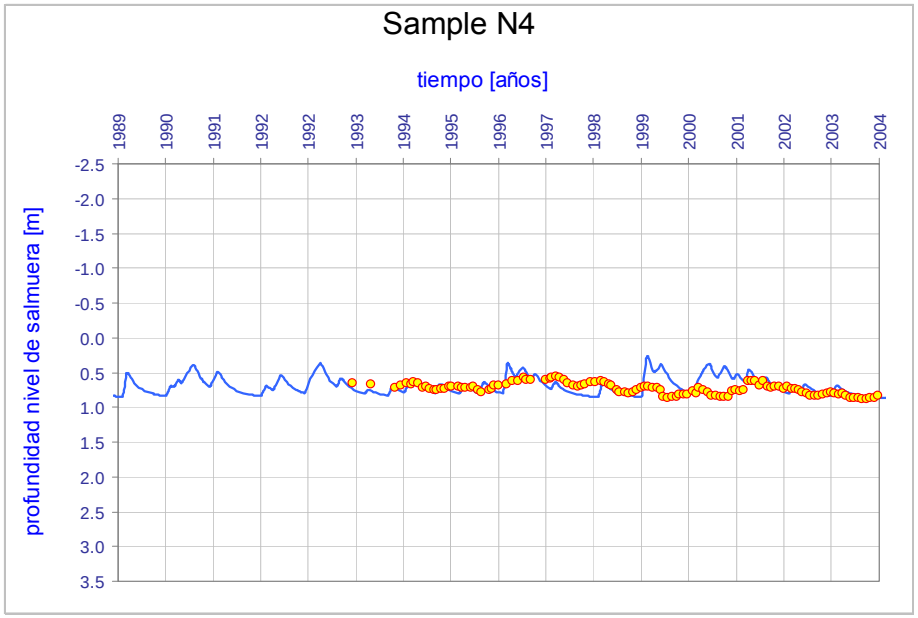


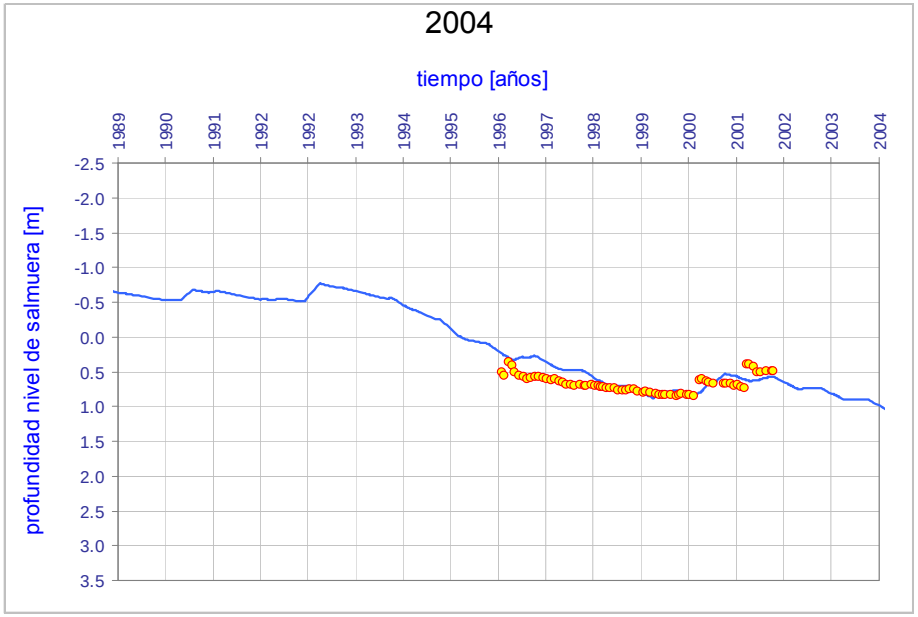


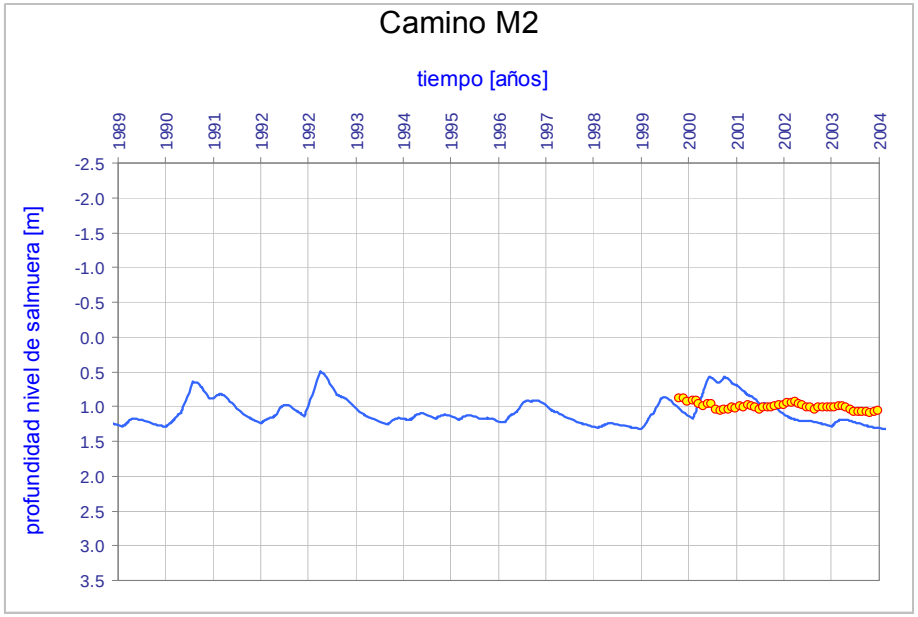


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

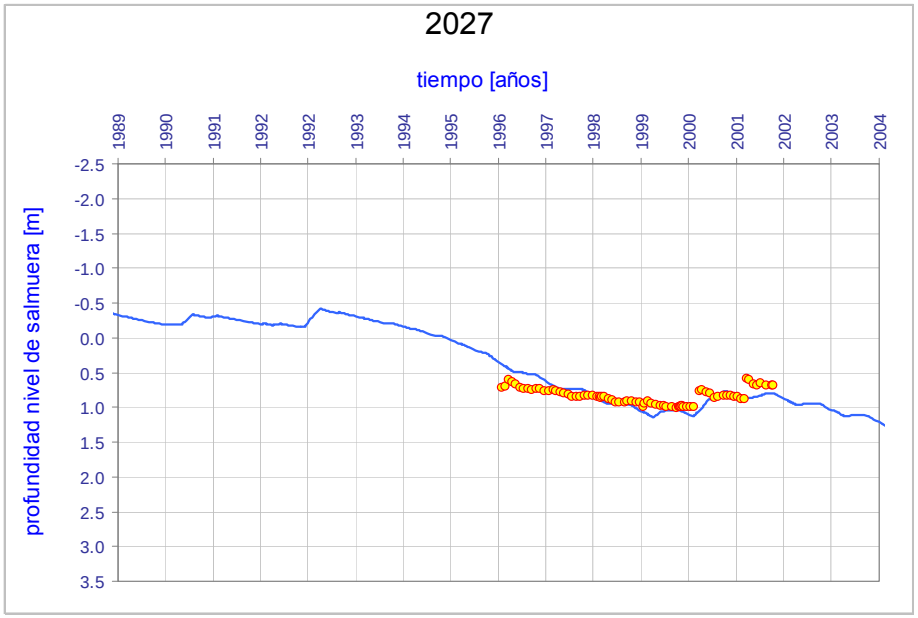


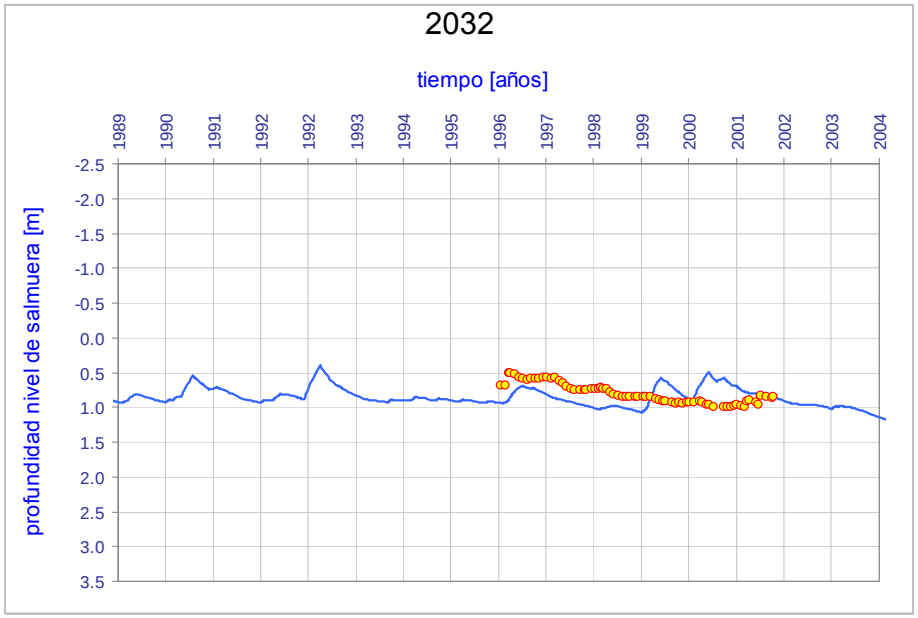


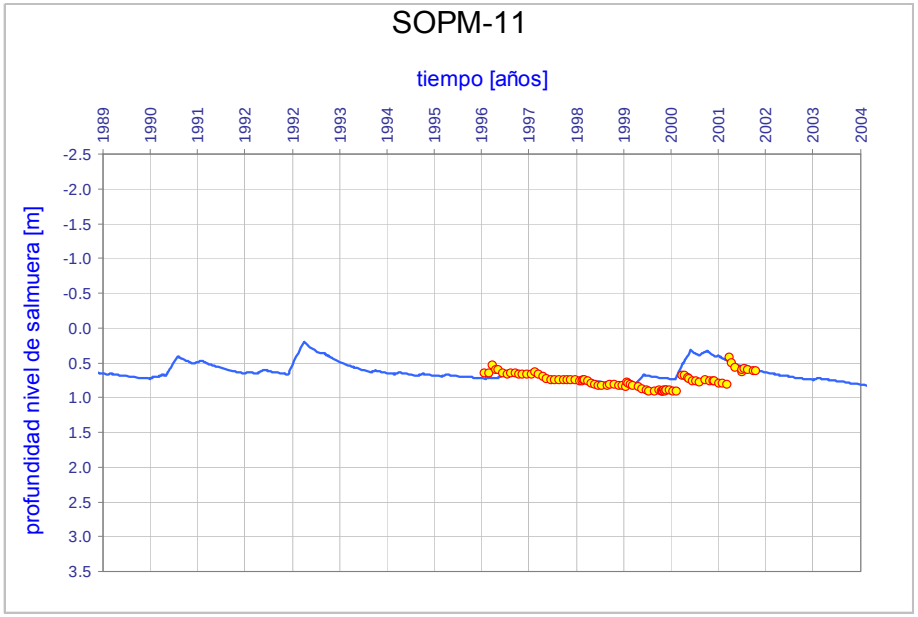


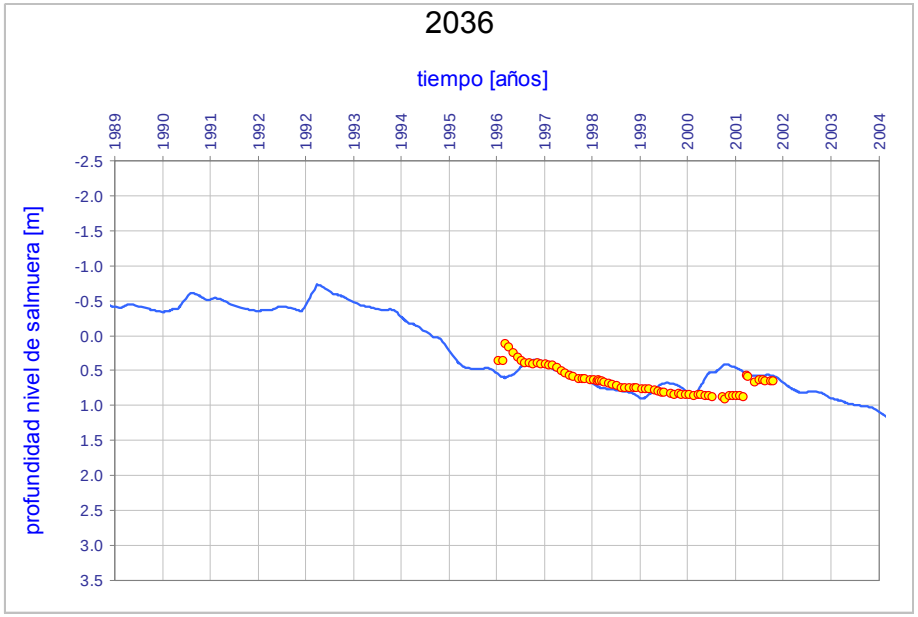


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

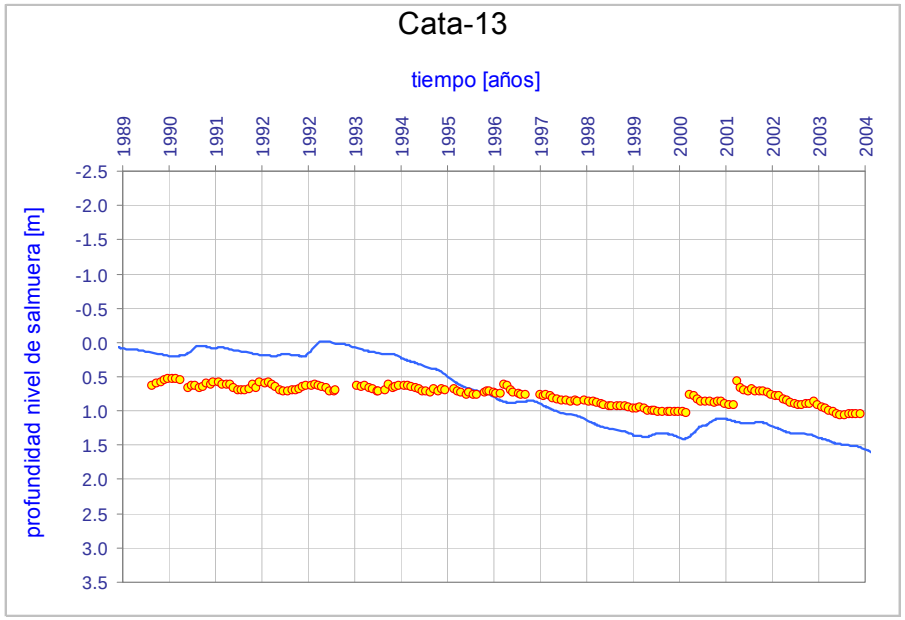


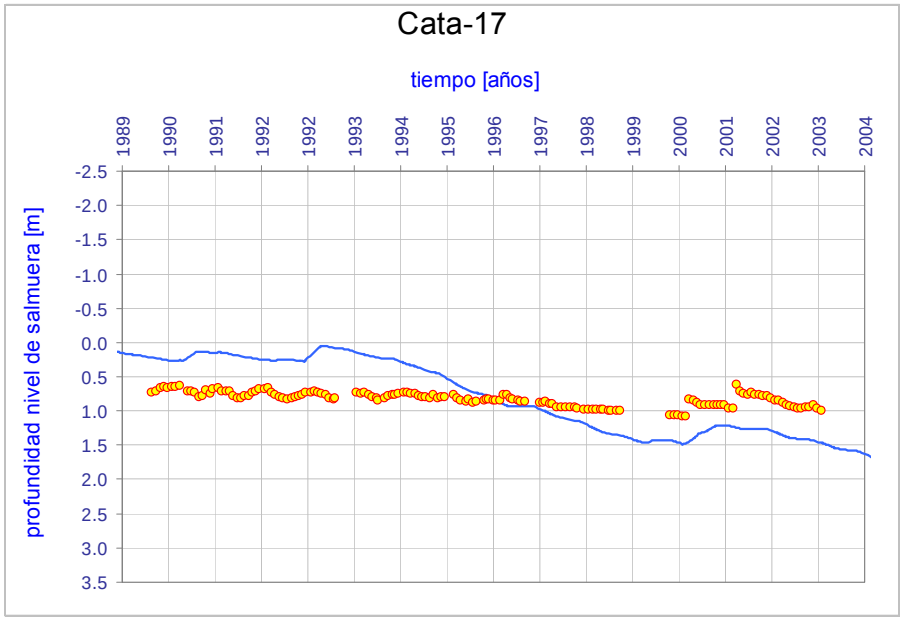


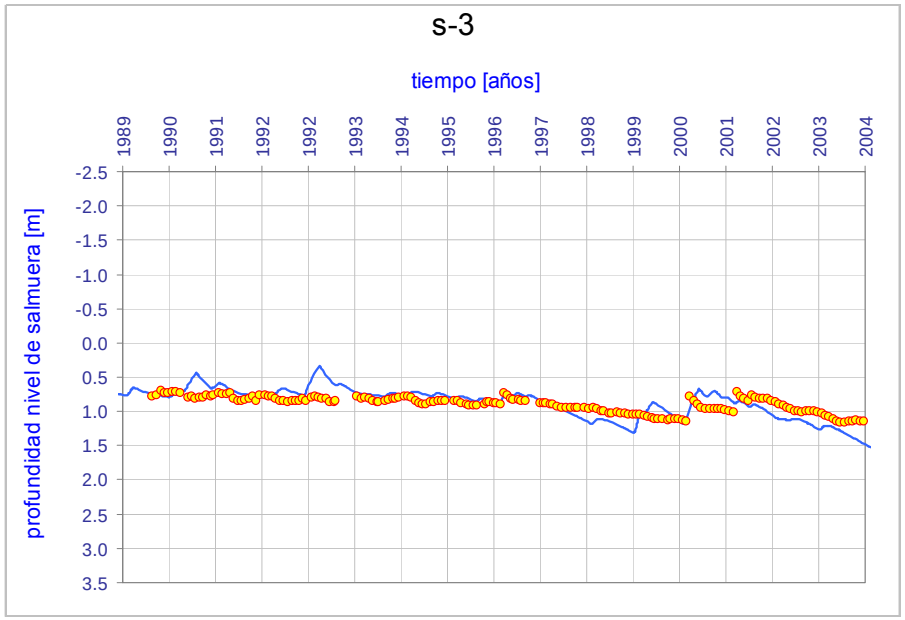


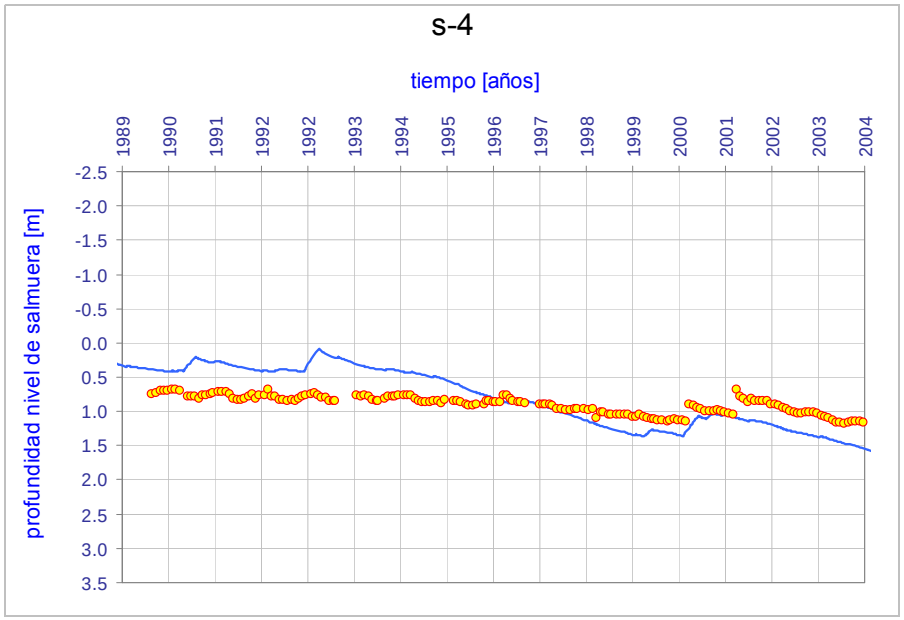


GRÁFICOS 4(CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

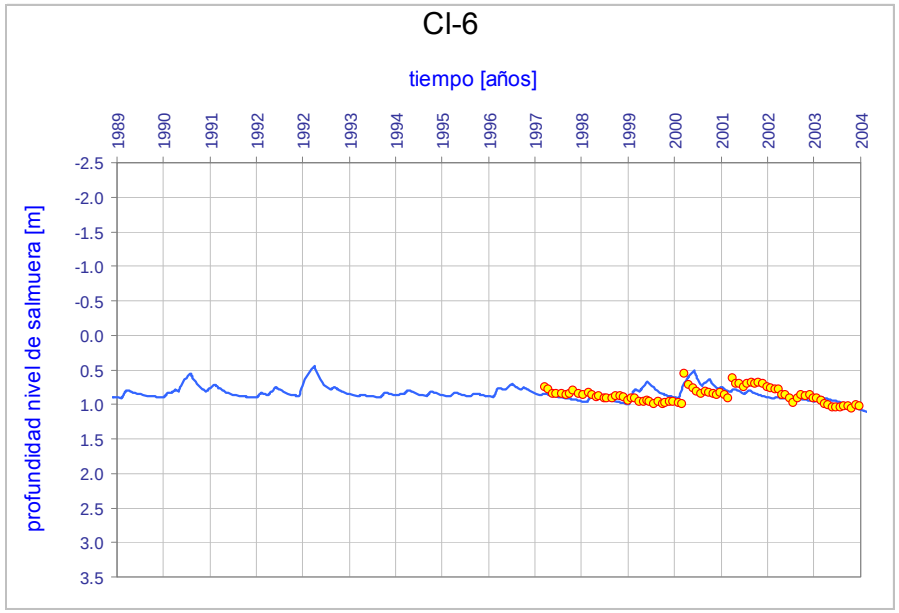


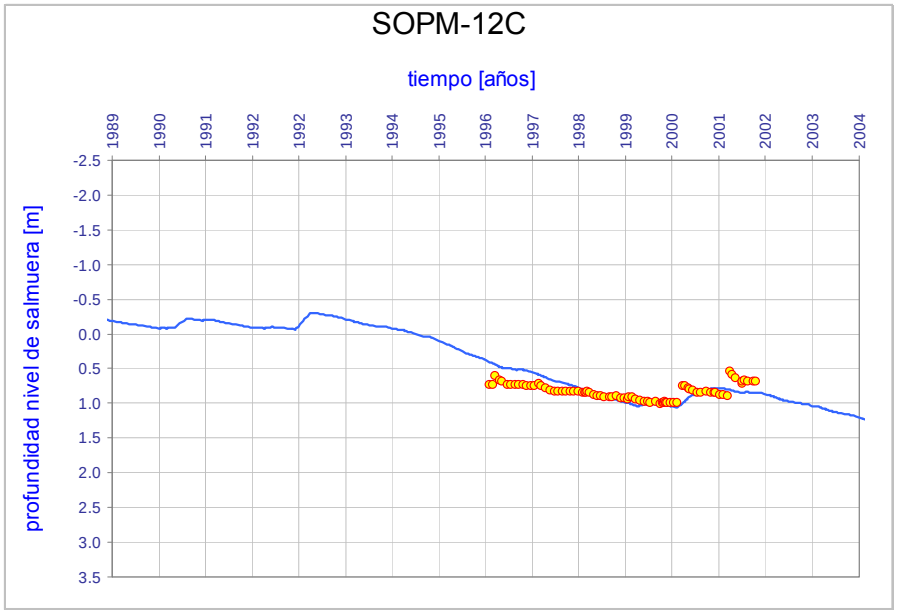


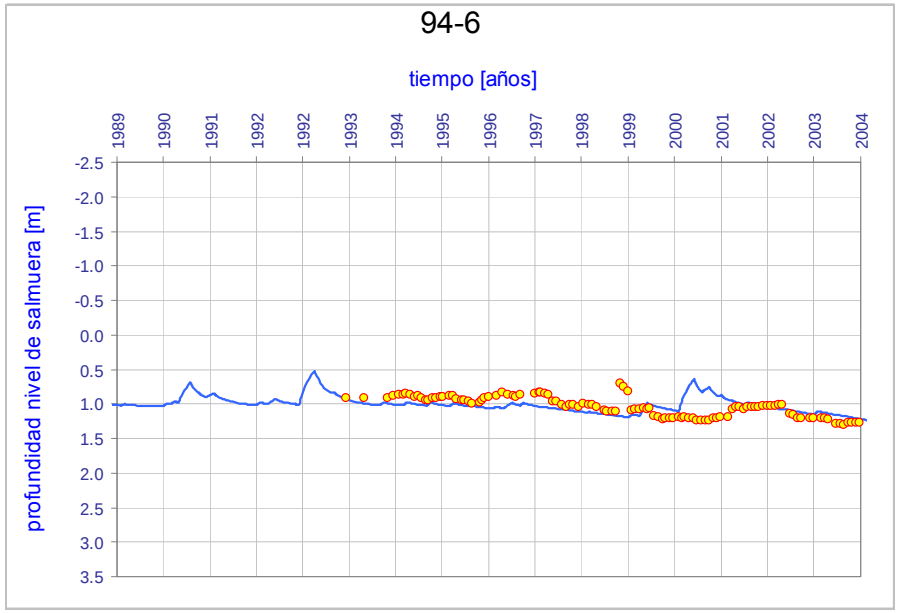


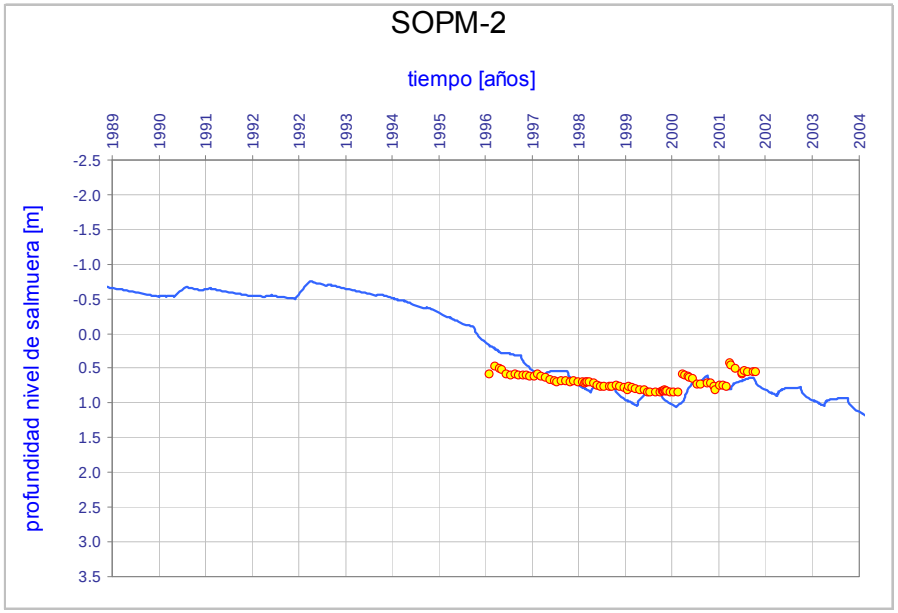


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

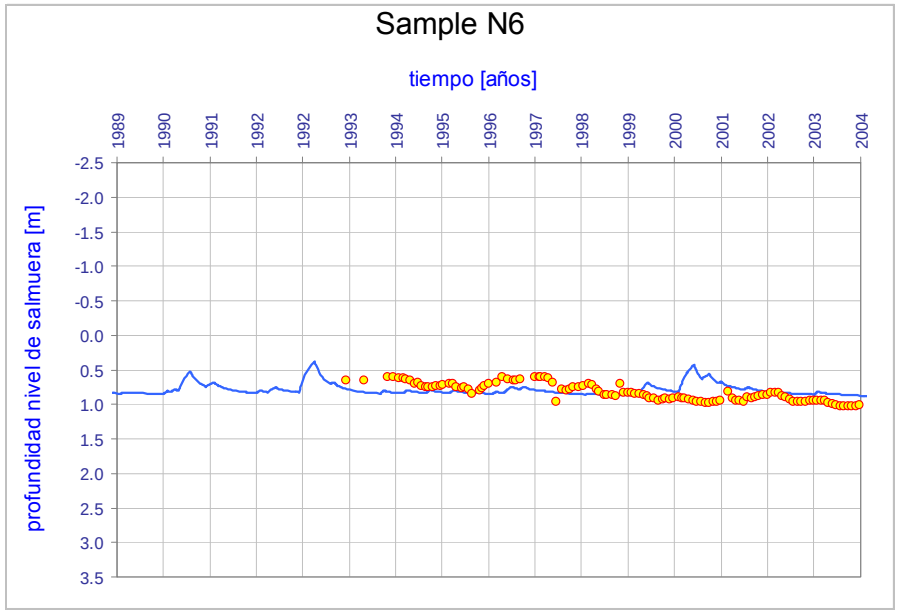


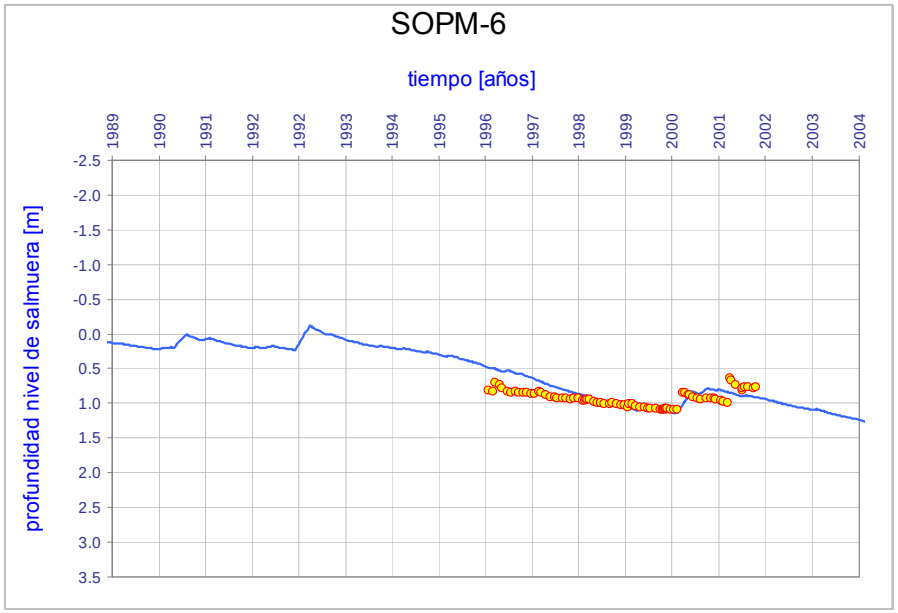


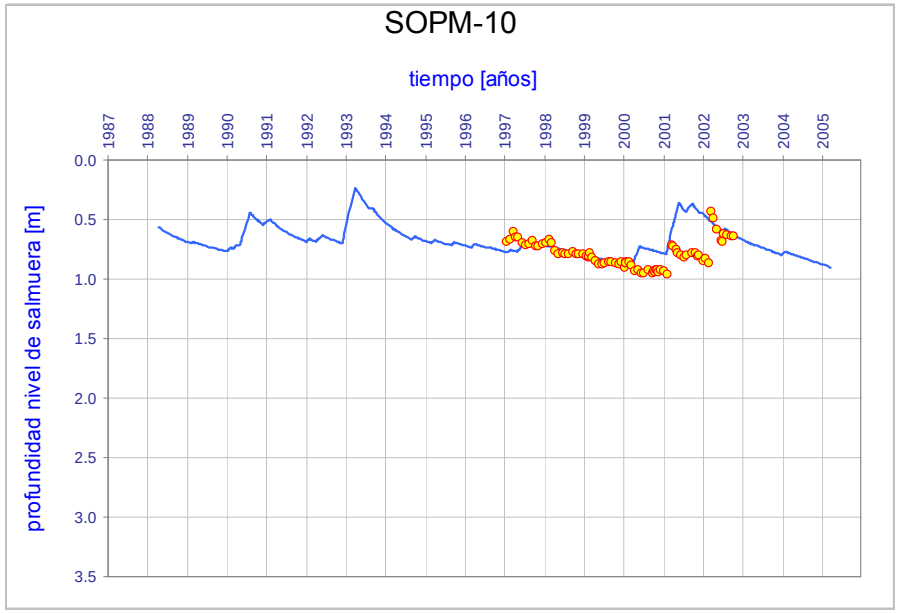


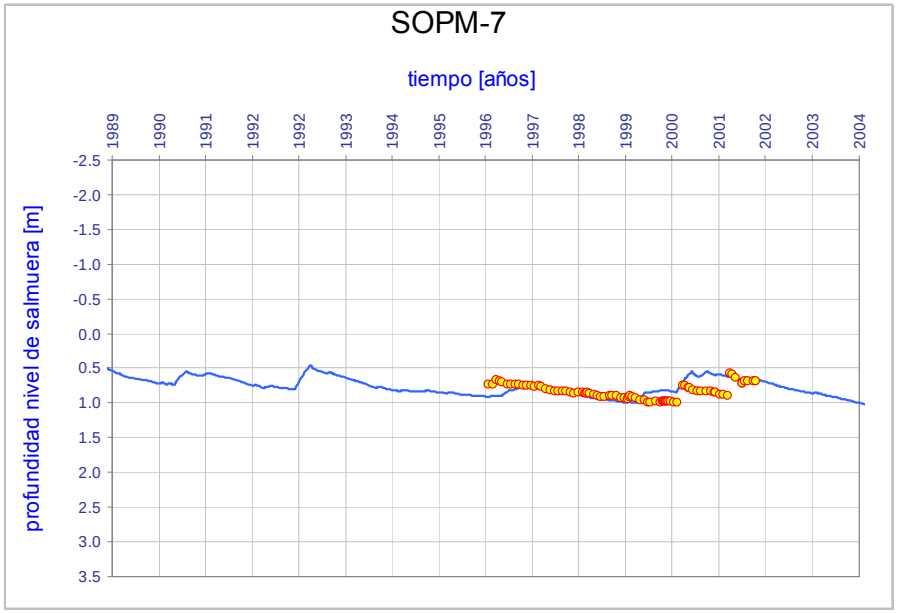


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

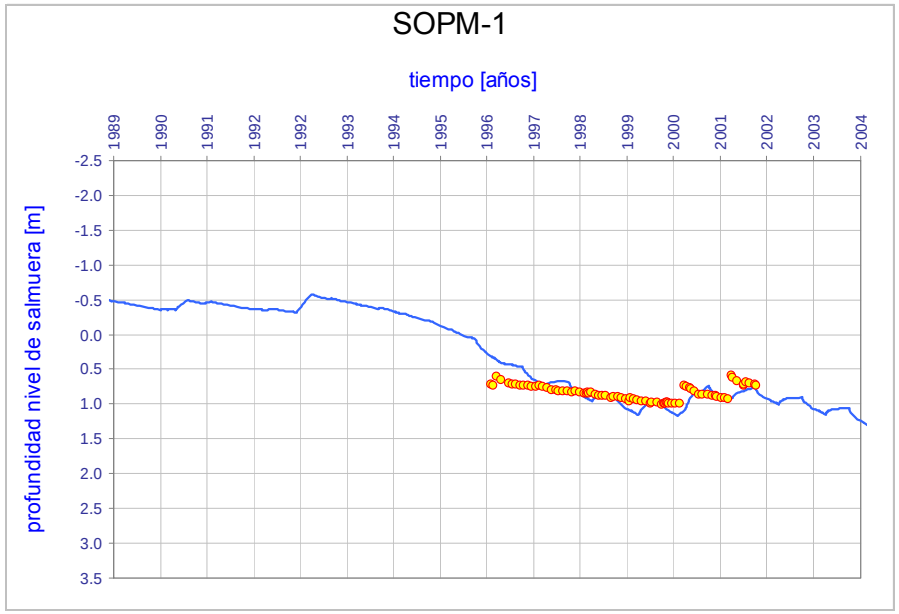


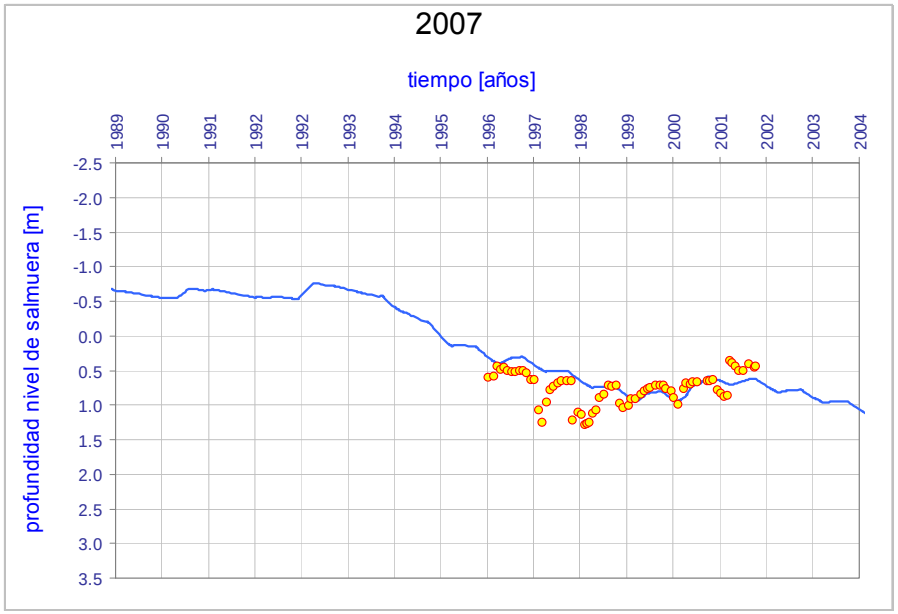


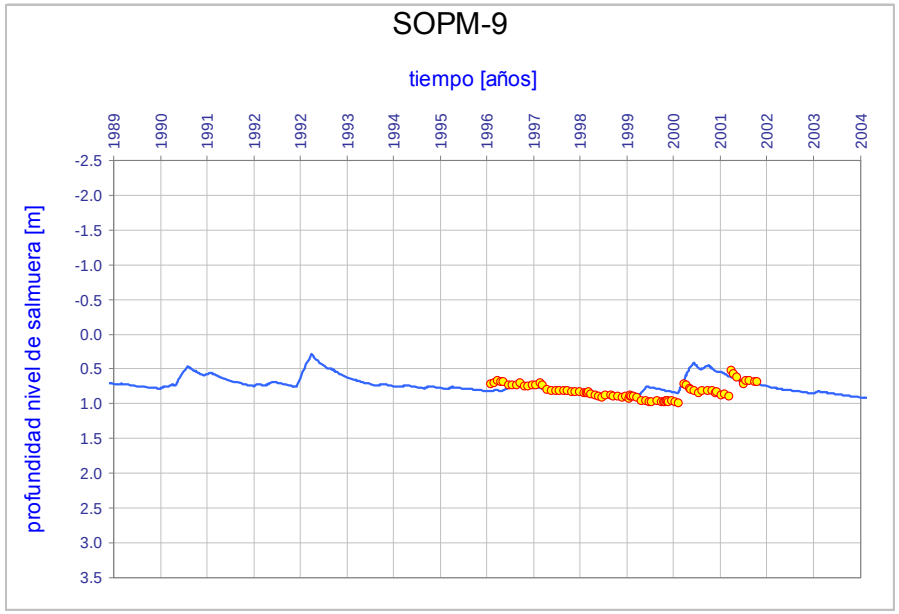


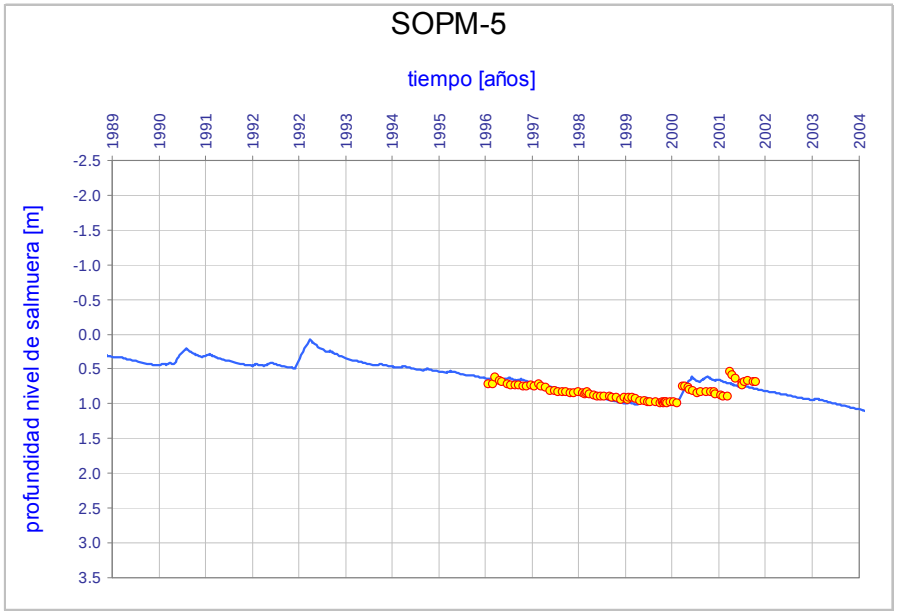


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

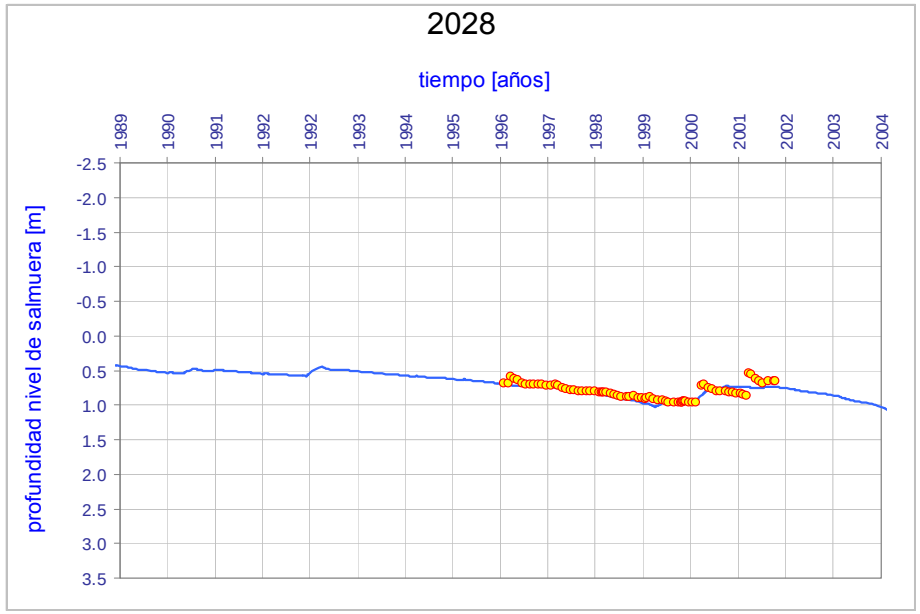


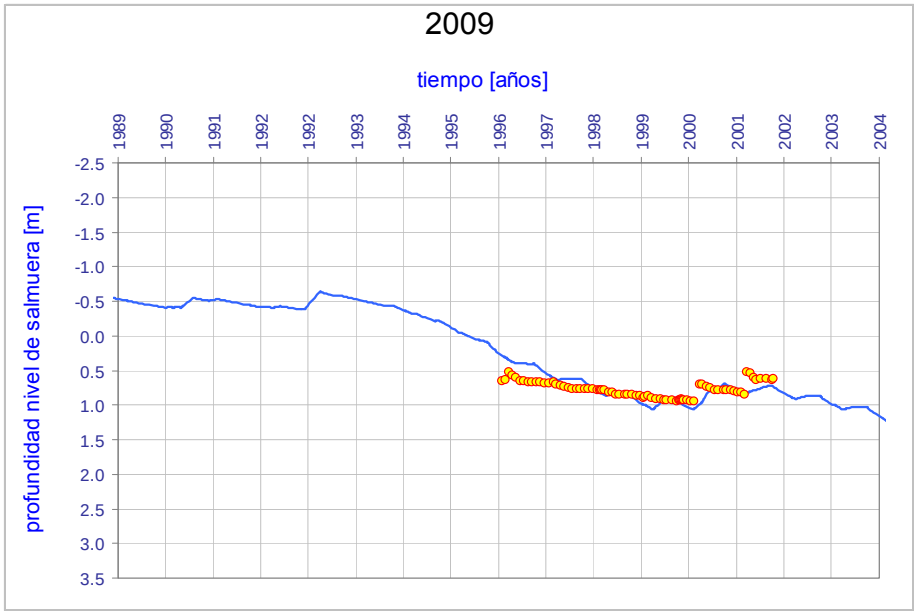


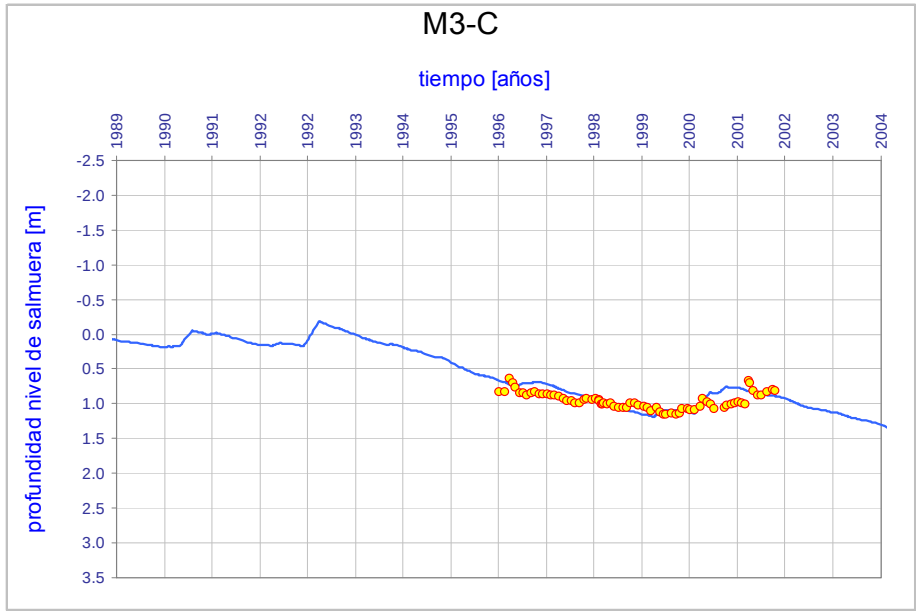


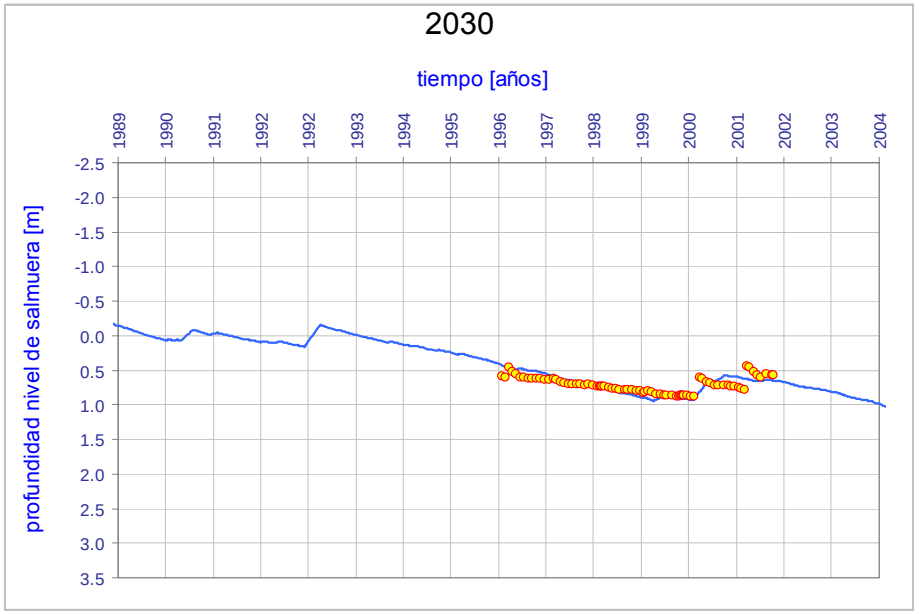


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

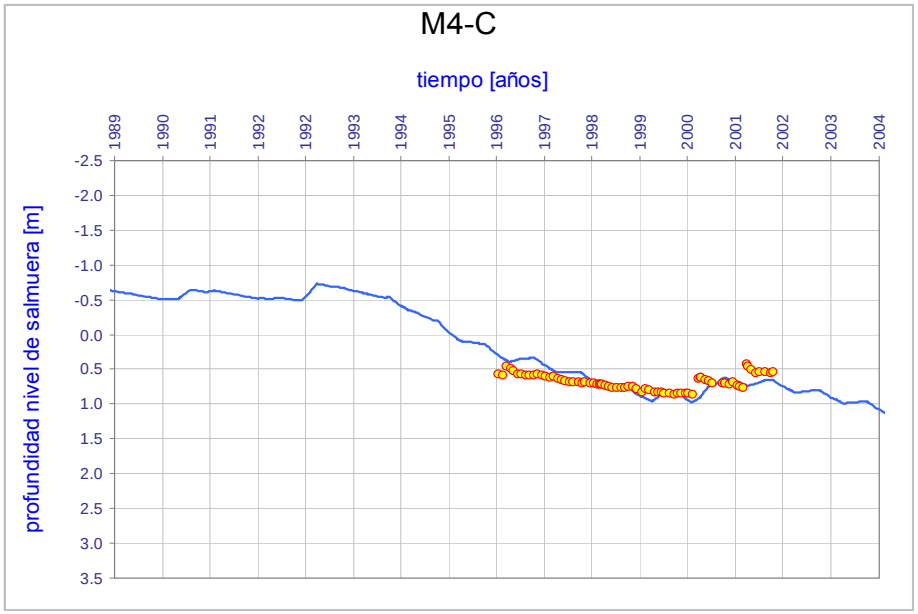


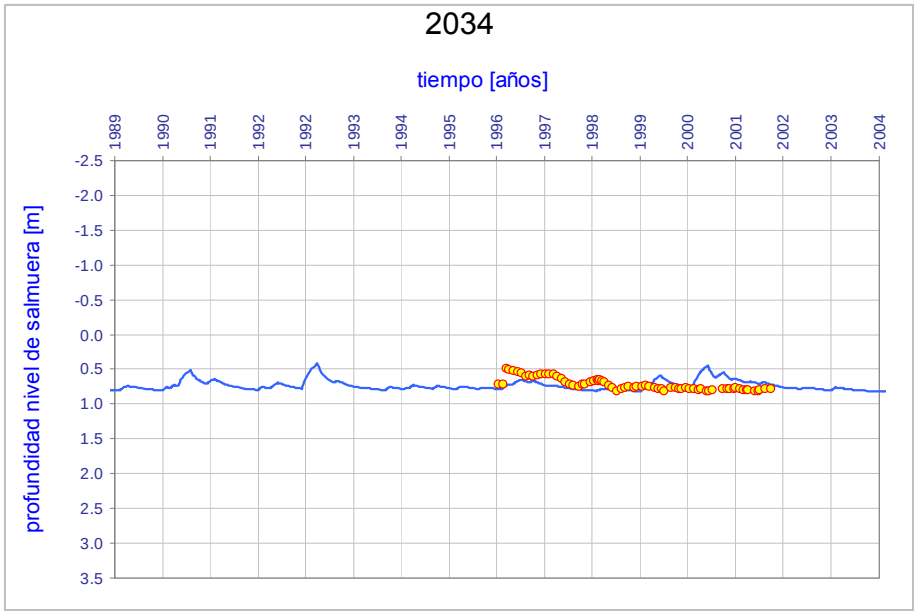


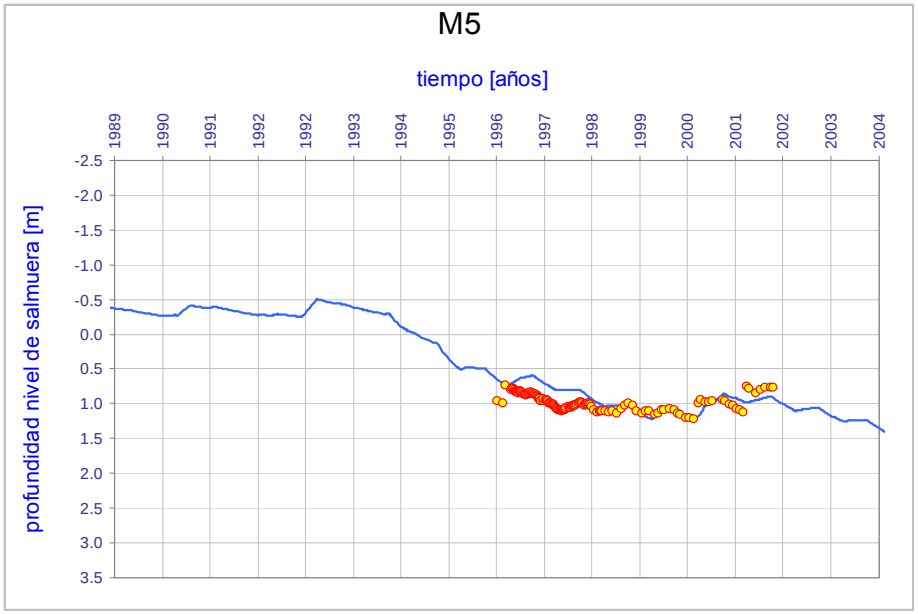


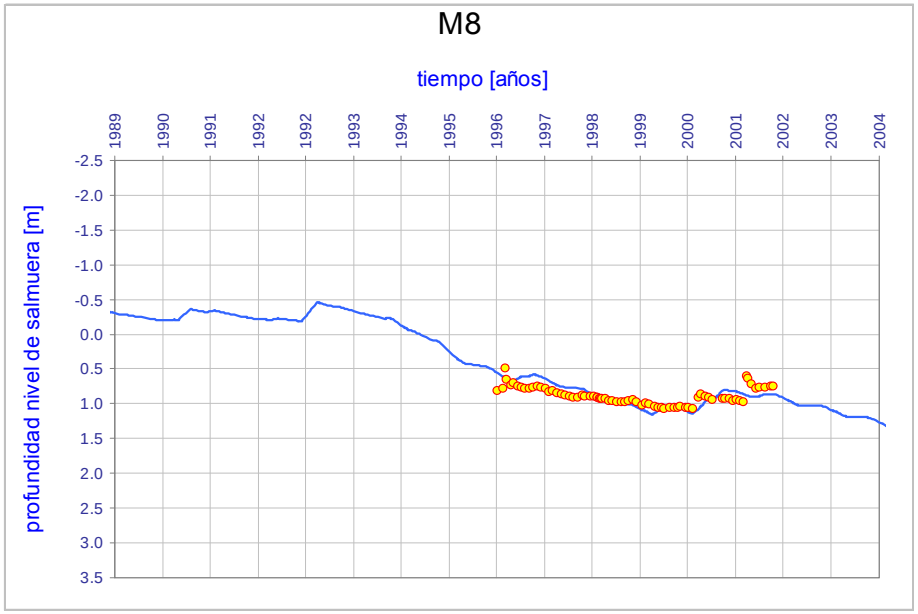


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

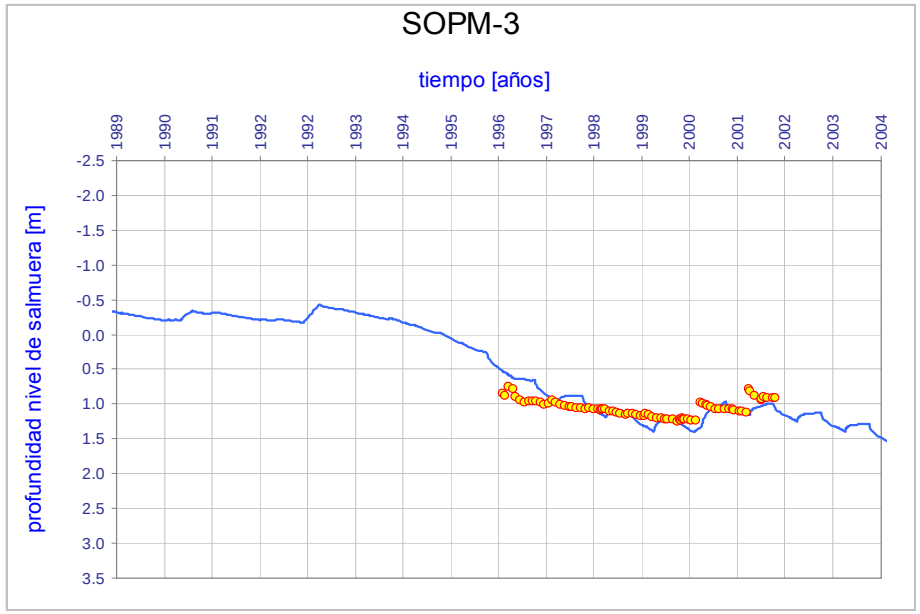


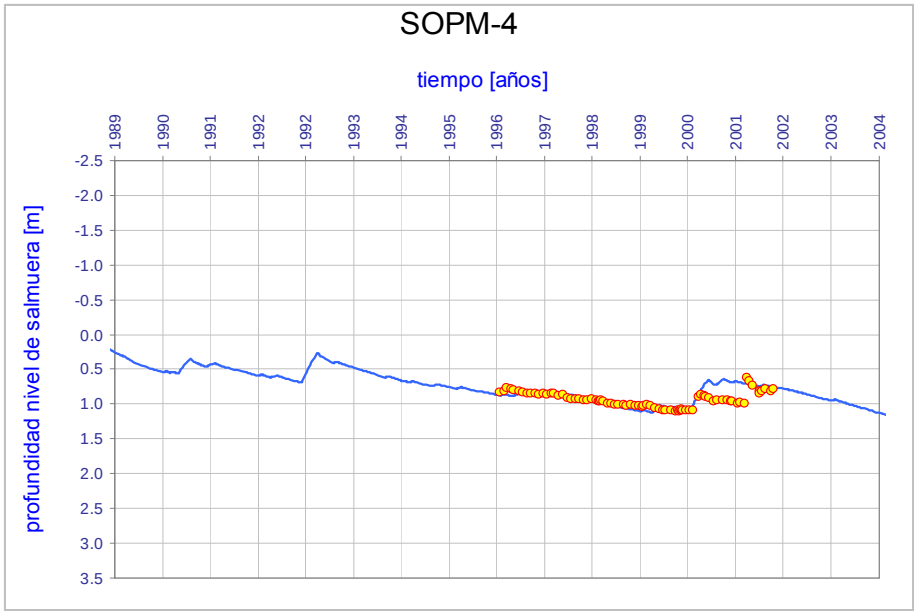


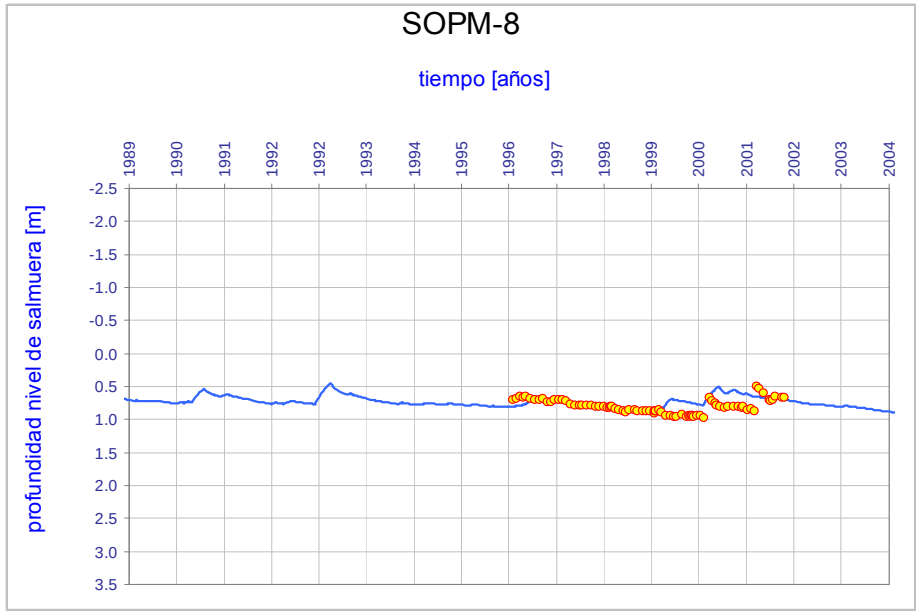


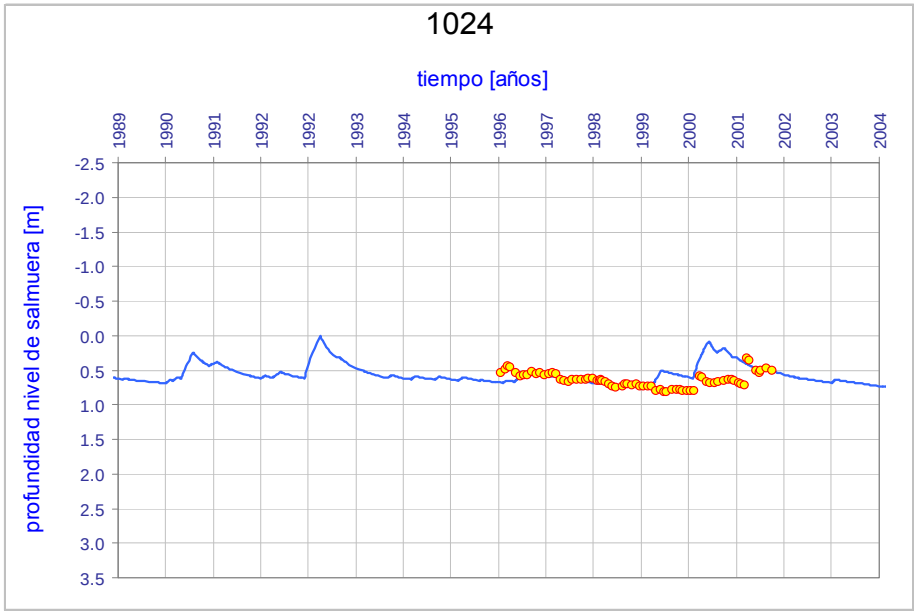


GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE

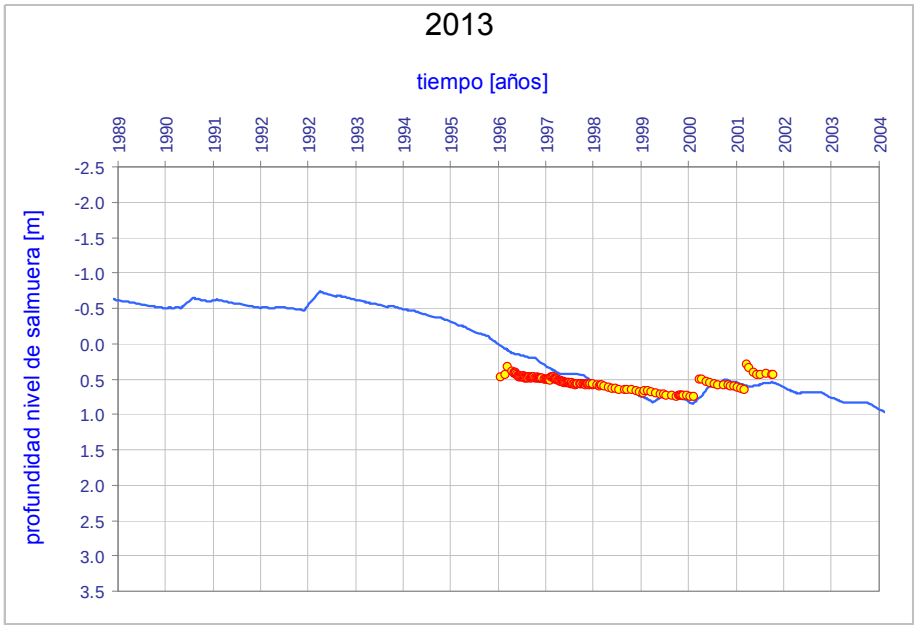








GRÁFICOS 4 (CONTINUACIÓN) NIVELES SIMULADOS (LÍNEA CONTINUA AZUL)
Y MEDIDOS (PUNTOS ROJOS) CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN IMPERMANENTE



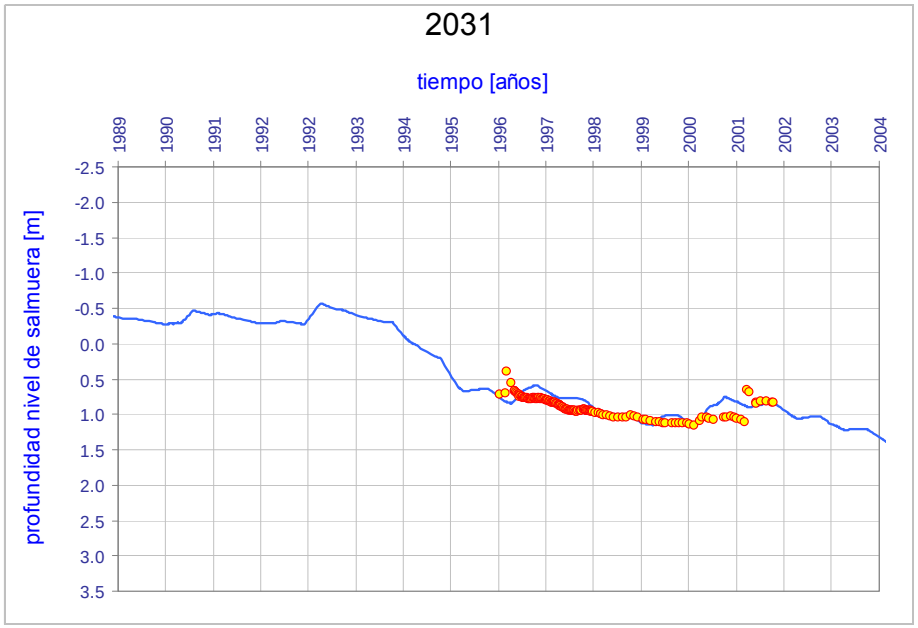


FIGURA 14

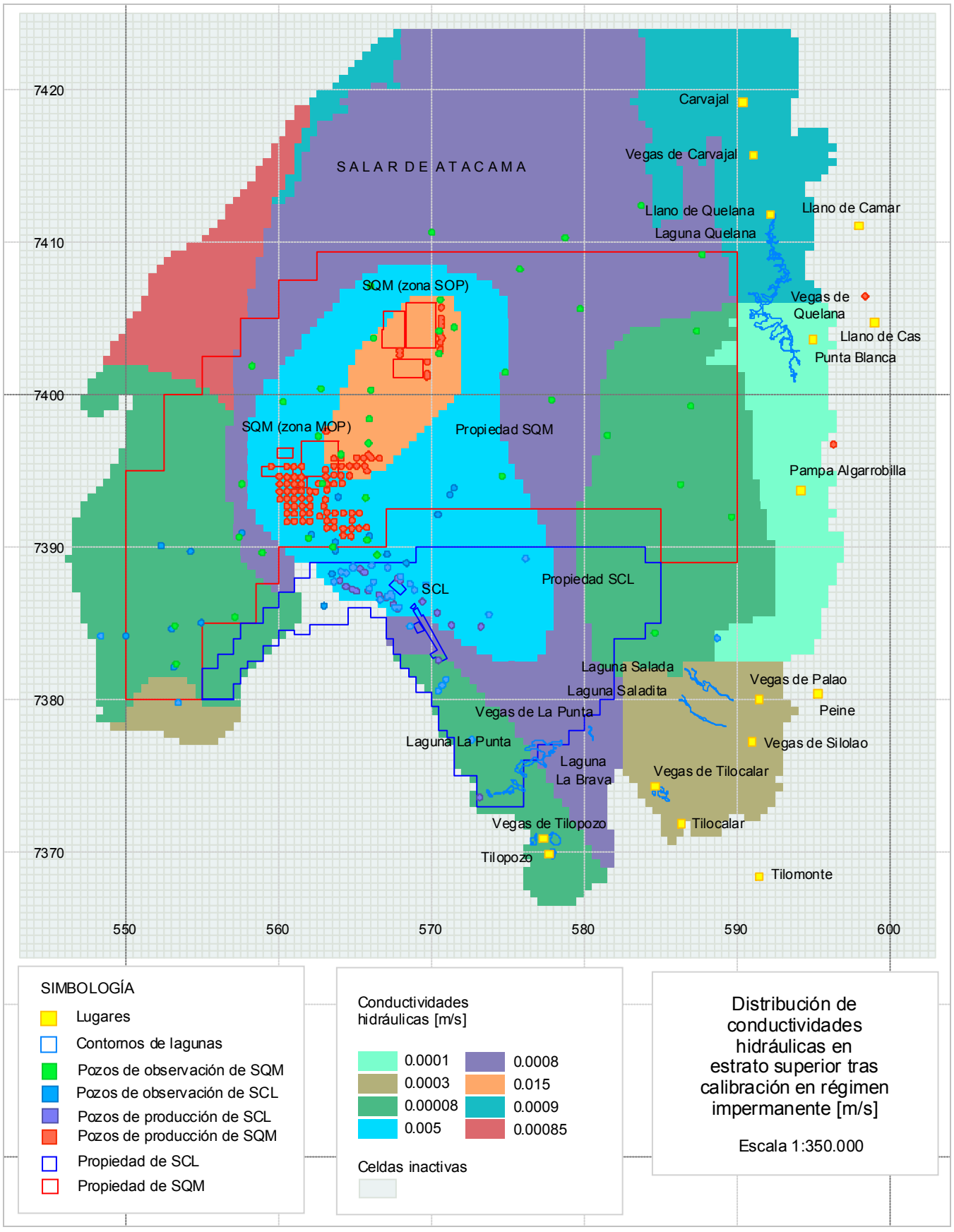

7420
7410
7400
7390
7380
7370
550
560
570
580
590
600
SALAR DE ATACAMA
Carvajal
Vegas de Carvajal
Llano de Quelana
Laguna Quelana
Llano de Camar
SQM (zona SOP)
Vegas de Quelana
Llano de Cas
Punta Blanca
SQM (zona MOP)
Propiedad SQM
Pampa Algarrobilla
SCL
Propiedad SCL
Laguna Salada
Laguna Saladita
Vegas de Palao
Peine
Vegas de La Punta
Laguna La Punta
Vegas de Silolao
Laguna La Brava
Vegas de Tilocalar
Vegas de Tilopozo
Tilocalar
Tilopozo
Tilomonte
SIMBOLOGÍA
Lugares
Contornos de lagunas
Pozos de observación de SQM
Pozos de observación de SCL
Pozos de producción de SCL
Pozos de producción de SQM
Propiedad de SCL
Propiedad de SQM
Conductividades hidráulicas [m/s]
0.0001
0.0003
0.00008
0.005
0.0008
0.015
0.0009
0.00085
Celdas inactivas
Distribución de conductividades hidráulicas en estrato superior tras calibración en régimen impermanente [m/s]
Escala 1:350.000

FIGURA 15

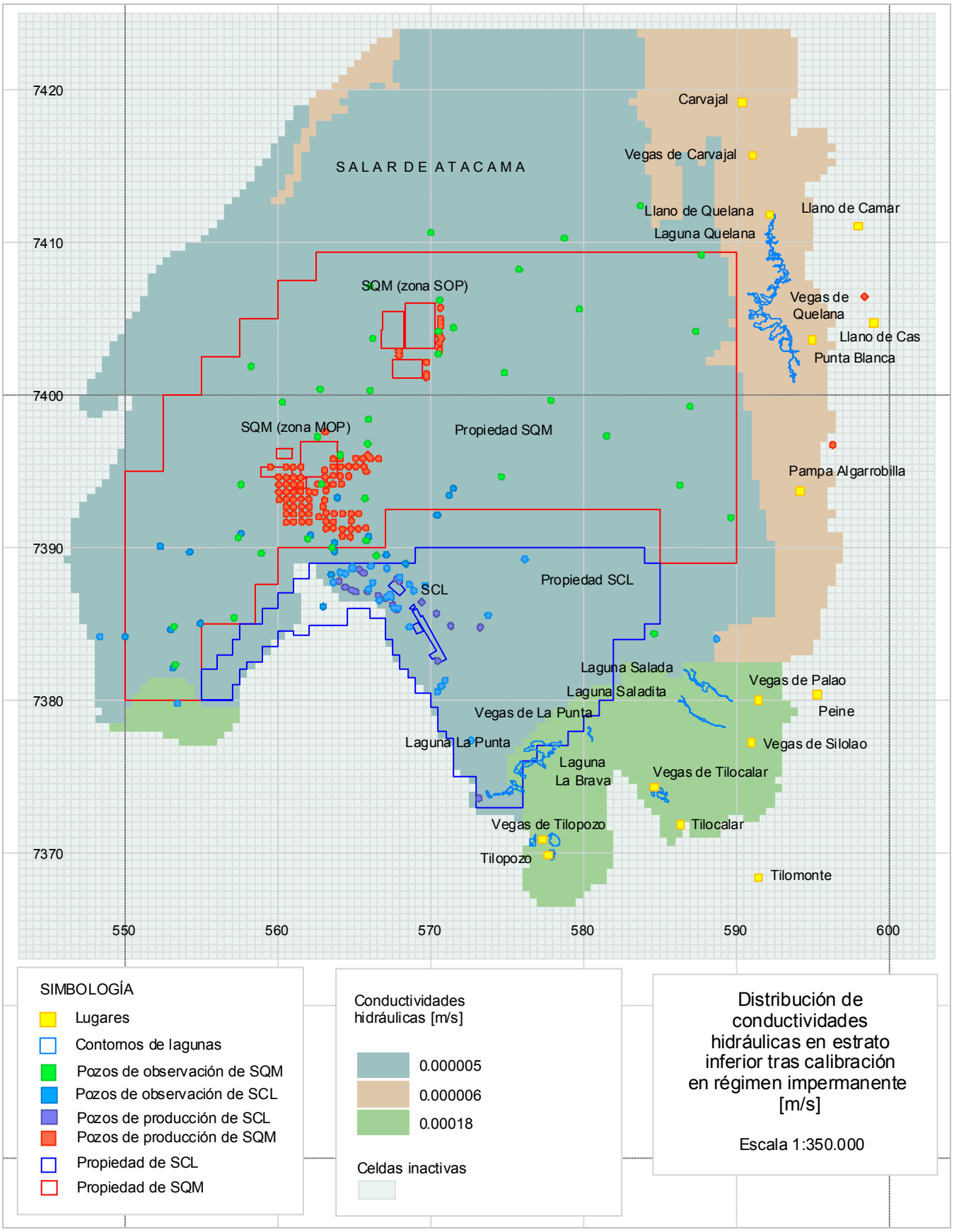
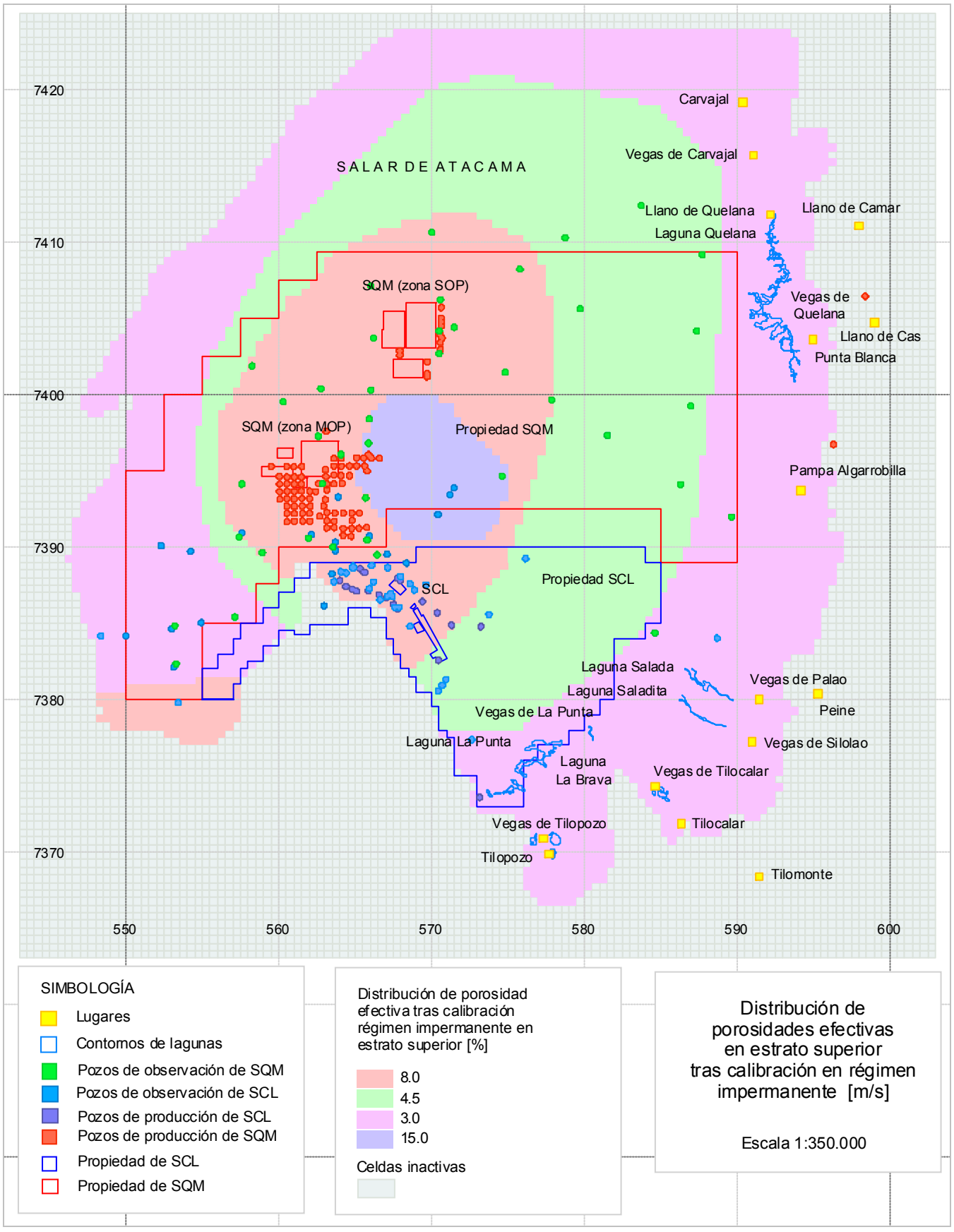

7420
7410
7400
7390
7380
7370
550
560
570
580
590
600
SALAR DE ATACAMA
Carvajal
Vegas de Carvajal
Llano de Quelana
Laguna Quelana
Llano de Camar
SQM (zona SOP)
Vegas de Quelana
Llano de Cas
Punta Blanca
SQM (zona MOP)
Propiedad SQM
Pampa Algarrobilla
Propiedad SCL
SCL
Laguna Salada
Laguna Saladita
Vegas de Palao
Peine
Vegas de La Punta
Laguna La Punta
Vegas de Silolao
Laguna
La Brava
Vegas de Tilocalar
Vegas de Tilopozo
Tilocalar
Tilopozo
Tilomonte
SIMBOLOGÍA
Lugares
Contornos de lagunas
Pozos de observación de SQM
Pozos de observación de SCL
Pozos de producción de SCL
Pozos de producción de SQM
Propiedad de SCL
Propiedad de SQM
Conductividades hidráulicas [m/s]
0.000005
0.000006
0.00018
Celdas inactivas
Distribución de conductividades hidráulicas en estrato inferior tras calibración en régimen impermanente [m/s]
Escala 1:350.000

FIGURA 16


7420
7410
7400
7390
7380
7370
550
560
570
580
590
600
SALAR DE ATACAMA
Carvajal
Vegas de Carvajal
Llano de Quelana
Laguna Quelana
Llano de Camar
Vegas de Quelana
Llano de Cas
Punta Blanca
SQM (zona SOP)
SQM (zona MOP)
Propiedad SQM
Pampa Algarrobilla
Propiedad SCL
SCL
Laguna Salada
Laguna Saladita
Vegas de Palao
Peine
Vegas de La Punta
Laguna La Punta
Vegas de Silolao
Laguna
La Brava
Vegas de Tilocalar
Vegas de Tilopozo
Tilocalar
Tilopozo
Tilomonte
SIMBOLOGÍA
Lugares
Contornos de lagunas
Pozos de observación de SQM
Pozos de observación de SCL
Pozos de producción de SCL
Pozos de producción de SQM
Propiedad de SCL
Propiedad de SQM
Distribución de porosidad efectiva tras calibración régimen impermanente en estrato superior [%]
8.0
4.5
3.0
15.0
Celdas inactivas
Distribución de porosidades efectivas en estrato superior tras calibración en régimen impermanente [m/s]
Escala 1:350.000

7 CONCLUSIONES

Como se indicó en el Capítulo 1, el objetivo del presente trabajo fue el desarrollo de una herramienta confiable de simulación y predicción de los flujos de agua dulce y salmuera en el Salar de Atacama, cuyos resultados representen la visión técnica de SCL (y este consultor) y la de la autoridad (DGA-Conama). De esa forma, se pretende que la representación elaborada sirva de apoyo a la autoridad para tomar de decisiones con relación a la gestión de los recursos hídricos y minerales del sistema Salar de Atacama, asegurando la preservación del entorno natural y las áreas de vegas, lagunas y bofedales protegidas.

La principal limitación en la validez de los resultados del modelo elaborado, se relaciona con la falta de información relacionada con los caudales de extracción de SQM. Esa información no ha sido incluida en los informes de estudios elaborados por SQM y se fundamenta en la prerrogativa de privacidad asociada a la propiedad minera (sobre la salmuera).

No se conocen con precisión las reglas históricas de extracción de SQM, de modo que las magnitudes adoptadas en el presente trabajo, corresponden a datos promedios entregados por SQM, que podrían no corresponder a los caudales efectivamente explotados.

ANEXO 1
HIDROLOGÍA

A-1.1 ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIONES MEDIDAS

En las tablas 1 a 5 se presentan las estadísticas de precipitaciones mensuales medidas en las estaciones Camar, Socaire, Peine, Talabre y Monturaqui. Esos datos fueron adquiridos en la D.G.A. En la Figura 1 se muestran las ubicaciones de las estaciones pluviométricas existentes en la zona de estudio.

TABLA 1 PRECIPITACIONES MENSUALES MEDIDAS EN LA ESTACIÓN CAMAR

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1979	8.0	0.0	7.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**17.0**
1980	0.0	4.0	9.0	0.0	2.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**20.0**
1981	0.0	94.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**96.0**
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	**10.5**
1983	0.0	4.0	0.0	0.0	5.0	65.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**74.0**
1984	93.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**125.0**
1985	0.0	15.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**35.0**
1986	29.0	12.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	2.0	0.0	0.0	7.5	0.0	**60.5**
1987	14.0	15.1	27.5	0.0	2.5	1.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	**60.9**
1988	3.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**3.1**
1989	0.0	40.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**40.5**
1990	1.0	0.0	1.0	0.0	2.0	0.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.5	**25.5**
1991	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**2.0**
1992	1.1	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	**8.1**
1993	2.0	6.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**20.1**
1994	0.0	0.0	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	**12.4**
1995	22.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**28.5**
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**16.0**
1997	1.0	51.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**60.5**
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**2.0**
1999	0.0	18.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	**25.5**
2000	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**37.9**
2001	0.0	16.0	82.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**98.5**
2002	0.0	0.1	58.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**58.8**
2003	0.0	7.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**17.0**
2004	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0								**3.0**
promedio	**8.3**	**10.9**	**9.5**	**0.1**	**0.9**	**4.5**	**0.1**	**1.0**	**0.5**	**0.0**	**0.3**	**1.0**	**36.9**

FIGURA 1 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS (ESCALA 1.150.000)

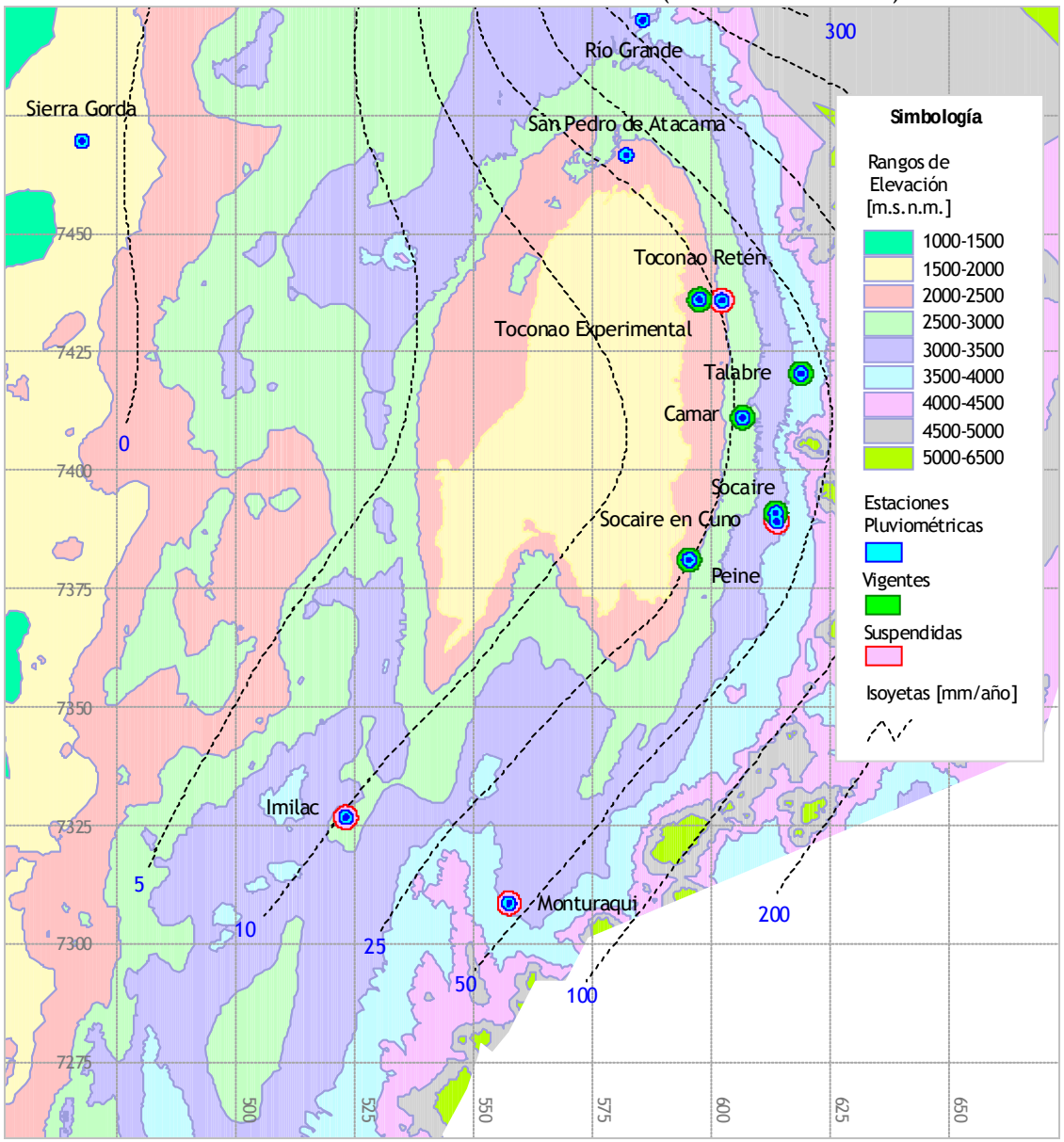


TABLA 2 PRECIPITACIONES MENSUALES MEDIDAS EN LA ESTACIÓN SOCAIRE

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1974								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
1975	55.5	12.5	29.1	0.0	21.5	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**128.1**
1976	35.9	2.0	3.0	0.0	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**45.8**
1977	13.0	51.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**71.0**
1978	3.0	36.5	1.5	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**43.5**
1979	14.0	0.0	11.5	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**40.5**
1980				2.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**3.5**
1981	0.0		8.5	12.0	0.0	0.0	0.0	5.0	4.0	0.0	0.0	0.0	**29.5**
1982	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	5.0	**19.1**
1983	0.0	1.5	0.0	4.5	14.5	28.5	8.0	0.0	3.0	0.0	0.0	2.0	**62.0**
1984	109.5	0.0	3.0	0.0	0.0	33.4	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	**155.9**
1985	0.0	40.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**48.0**
1986	21.0	7.5	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	2.4	0.0	0.0	11.7	0.0	**46.6**
1987	22.0	21.7	39.5	0.0	6.0	3.0	1.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	**97.2**
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
1989	0.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**40.0**
1990	3.0	0.0	4.5	0.0	3.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.1	**33.1**
1991	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.8**
1992	4.5	0.0	0.0	9.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	**16.5**
1993	4.0	4.5	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	**13.8**
1994	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	**10.0**
1995						0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	**2.0**
1996	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**24.5**
1997	0.0	51.5	0.0	0.0	7.0	1.5	0.0	0.0	0.5	0.0		0.0	**60.5**
1998	0.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**14.0**
1999	0.0	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**23.0**
2000	67.0	0.0	0.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**70.0**
2001	0.0	5.5	**39.5**	3.0	3.5	0.0	0.0	0.5	2.0	0.0	0.0	1.0	**55.0**
2002	0.0	0.0	29.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**34.0**
2003	0.0	8.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**24.0**
promedio	**13.1**	**12.3**	**7.2**	**1.4**	**2.9**	**3.4**	**0.5**	**1.0**	**1.0**	**0.3**	**0.4**	**1.0**	**40.4**

Nota: texto en rojo y negritas indica más de 20 días con información en el mes (**39.5**)

TABLA 3 PRECIPITACIONES MENSUALES MEDIDAS EN LA ESTACIÓN PEINE

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1974											0.0	0.0	**0.0**
1975	10.5	2.0	0.0	0.0	7.0	2.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	**24.0**
1976	13.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**14.0**
1977	0.0	5.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**5.5**
1978	0.0	39.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**39.0**
1979	1.0	0.0	8.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**21.0**
1980	0.0	0.0	19.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**21.5**
1981	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	3.0	2.5	0.0	0.0	0.0	**11.5**
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	**6.0**
1983	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	24.0	8.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	**40.5**
1984	35.5	0.0	1.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	**50.0**
1985	0.0	15.1	12.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**27.2**
1986	4.5	6.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	**15.5**
1987	6.5	26.0	36.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**69.5**
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
1989	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**12.0**
1990	3.1	0.0	1.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	**14.1**
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						**0.0**
1992	0.0	0.0	0.0	3.0	7.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**11.0**
1993	4.0	4.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**10.5**
1994	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**1.5**
1995	10.5	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**17.5**
1996	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	**11.5**
1997	1.0	20.0	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**26.5**
1998	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	**9.0**
1999	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	**18.5**
2000	3.5	**0.0**	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**5.5**
2001	0.0	2.0	35.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**37.5**
2002	0.0	0.0	69.5	0.0	1.0	0.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**79.0**
2003	0.0	40.5	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**48.0**
2004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0								**0.0**
promedio	**3.1**	**6.6**	**6.6**	**0.4**	**1.3**	**1.9**	**0.6**	**0.4**	**0.4**	**0.1**	**0.0**	**0.3**	**20.9**

Nota: texto en rojo y negritas indica más de 20 días con información en el mes (**0.0**)

TABLA 4 PRECIPITACIONES MENSUALES MEDIDAS EN LA ESTACIÓN TALABRE

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1995								0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	**4.0**
1996	0.0	1.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	42.0	0.5	0.0	0.0	0.0	**48.0**
1997	0.0	55.0	19.0	0.0	4.5	0.0	0.0	1.5	2.0	0.0	0.0	0.0	**82.0**
1998	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**9.0**
1999	0.0	8.0	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	**38.0**
2000	91.5	0.0	3.0	6.0	10.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**112.5**
2001	7.5	53.5	96.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**161.0**
2002	0.0	6.0	79.0	0.0	3.0	1.0	9.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	**99.0**
2003		30.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**48.0**
2004	18.0	22.0	0.0	0.0	0.0								**40.0**
promedio	**14.6**	**20.2**	**25.5**	**0.7**	**4.4**	**0.8**	**1.1**	**4.8**	**0.7**	**0.1**	**0.0**	**0.2**	**64.2**

TABLA 5 PRECIPITACIONES MENSUALES MEDIDAS EN LA ESTACIÓN MONTURAQUI

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1974											0.0	0.0	**0.0**
1975	83.0	7.5	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**100.5**
1976	103.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**103.0**
1977	6.0	20.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**35.0**
1978	0.0	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**33.0**
1979	11.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**21.0**
promedio	**40.6**	**12.1**	**4.0**	**1.8**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**48.8**

A-1.2 RELLENO DE ESTADÍSTICAS

Se correlacionaron todas las estadísticas entre sí, para obtener relaciones que permitiesen completarlas. En los Gráficos 1 se muestran los resultados del proceso y en las Tablas 6 y 7 se han resumido los parámetros de las ecuaciones obtenidas.

TABLA 6 FACTORES DE CORRELACIÓN

Estación 1	Estación 2	a	b	R^2
Monturaqui	Peine	1.672	1.927	0.30
Monturaqui	Socaire	1.093	-1.081	0.59
Monturaqui	Camar	1.380	-0.205	0.96
Peine	Talabre	0.349	0.109	0.47
Socaire	Talabre	0.497	0.083	0.74
Camar	Talabre	0.616	-0.722	0.83
Socaire	Peine	1.082	1.650	0.43
Camar	Peine	1.188	0.960	0.46
Camar	Socaire	0.899	-0.037	0.77

TABLA 7 FACTORES DE CORRELACIÓN (A LA INVERSA DE LA TABLA 6)

Estación 1	Estación 2	a	b	R^2
Peine	Monturaqui	0.178	0.830	0.30
Socaire	Monturaqui	0.540	2.758	0.59
Camar	Monturaqui	0.696	0.199	0.96
Talabre	Peine	1.335	3.145	0.47
Talabre	Socaire	1.496	1.436	0.74
Talabre	Camar	1.345	2.022	0.83
Peine	Socaire	0.401	0.374	0.43
Peine	Camar	0.383	0.661	0.46
Socaire	Camar	0.851	0.779	0.77

$$PP_{[estación\ 1]} = a \cdot PP_{[estación\ 2]} + b$$

R^2: índice de la calidad de la correlación

$R^2 = 1 - [\ \Sigma\ (Y_k - \hat{Y}_k)^2\ ] / [\ (\Sigma\ Y_k^2\ ) - (\Sigma\ Y_k\ )^2 / n\ ]$, con Y = valor medido en mes k (; $\hat{Y}_k$ = valor obtenido de la recta de correlación en mes k ($PP_{[estación\ 1]}$)

Las expresiones lineales usadas para rellenar, fueron seleccionadas según los siguientes criterios:

a) Camar: rellenada en función de Socaire (segunda mejor correlación, R^2=0.77).

b) Socaire: rellenada en función de Camar (segunda mejor correlación, R^2=0.77).

c) Peine: rellenada en función de Socaire. Mala correlación, pero faltan pocos datos y coinciden con precipitaciones nulas en Socaire, que se encuentra a una elevación superior.

d) Talabre: rellenada en función de Camar (mejor correlación, R^2=0.83)

e) Monturaqui: presenta la mejor correlación con Camar, pero son pocos datos. Se correlacionó el periodo medido de Monturaqui con las demás estadísticas previamente

rellenadas y corregidas (ver punto A-1.3). De esa forma, las mejores correlaciones resultaron con Socaire y Camar (R^2=0.59 y R^2=0.60, respectivamente). Se rellenó en función de las rectas de correlación promedio entre ambas, dado que las calidades de los ajustes fueron similares. En la Tabla 8 se presentan los parámetros de correlación y en los Gráficos 2, las correlaciones correspondientes.

TABLA 8 FACTORES DE CORRELACIÓN ENTRE MONTURAQUI (DATOS MEDIDOS) Y CAMAR-SOCAIRE (DATOS RELLENADOS Y CORREGIDOS)

Estación 1	Estación 2	a	b	R^2
Monturaqui	Socaire (rellenada y corregida)	1.093	-1.081	0.59
Monturaqui	Camar (rellenada y corregida)	2.084	-0.997	0.60

A-1.3 CORRECCIÓN DE ESTADÍSTICAS

Tras haber rellenado los datos faltantes, se corrigió los valores rellenados para que el promedio anual de los datos medidos se mantuviese en la estadística rellenada. En la Tabla 9 se presentan esos factores.

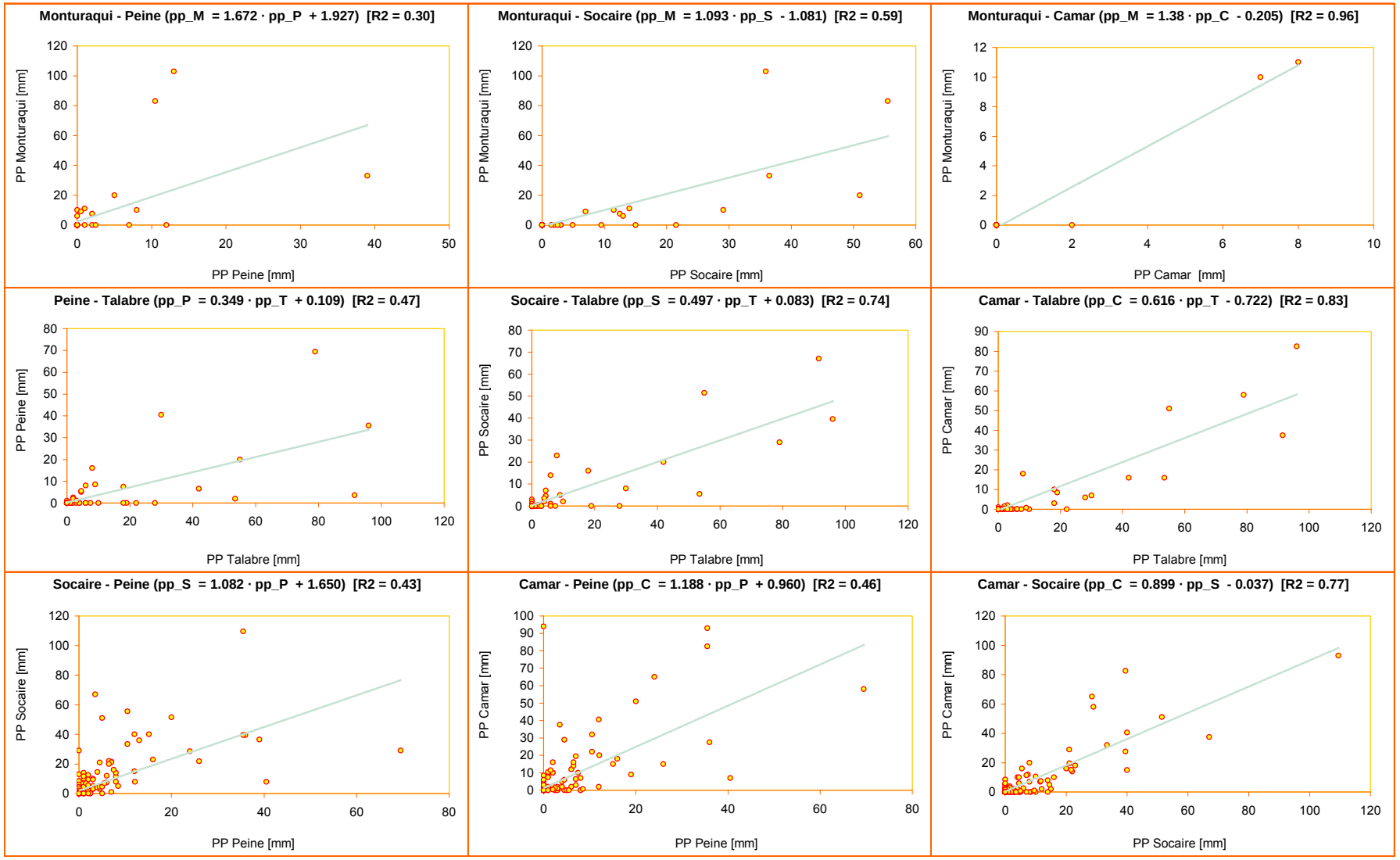
TABLA 9 FACTORES DE CORRECCIÓN

Estación	Factor de Corrección
Camar	0.591
Socaire	0.705
Peine	1.000
Talabre	1.247
Monturaqui	0.978

A-1.4 ESTADÍSTICAS RELLENADAS Y CORREGIDAS

Los resultados finales del proceso realizado se presentan en las Tablas 10 a 14. Los valores rellenados se presentan con color de fuente rojo.

GRÁFICOS 1 CORRELACIONES ENTRE ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIONES MENSUALES



GRÁFICOS 2 CORRELACIONES ENTRE ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIONES MENSUALES MEDIDAS EN ESTACIÓN MONTURAQUI Y ESTADÍSTICAS RELLENADAS Y CORREGIDAS DE ESTACIONES SOCAIRE Y CAMAR

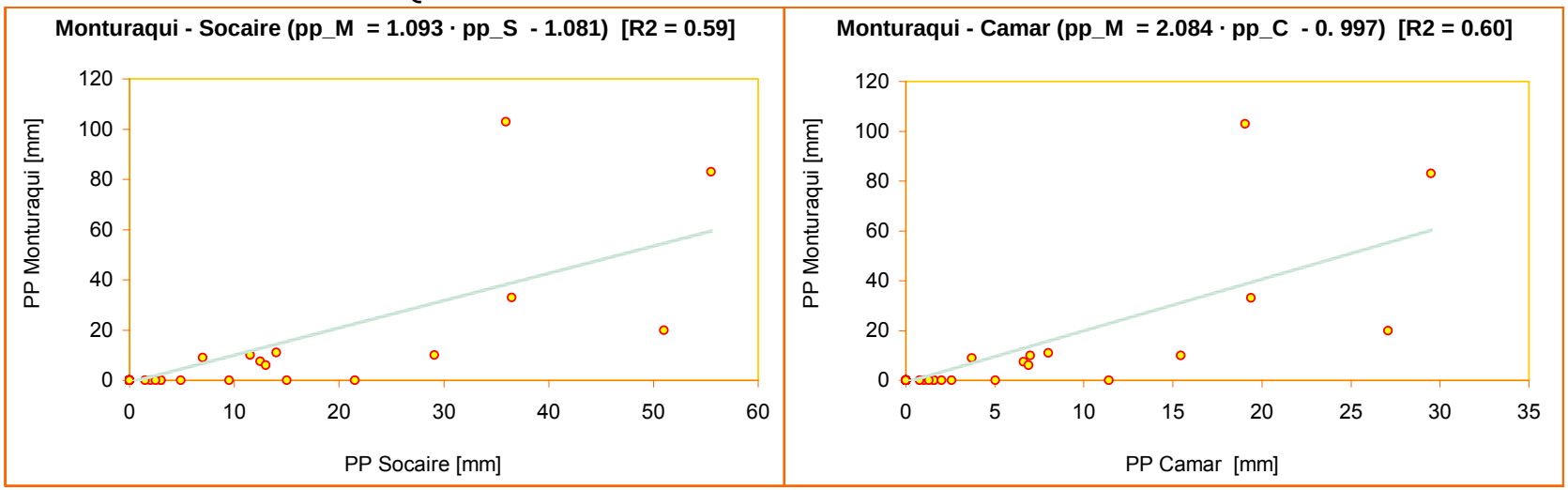


TABLA 10 PRECIPITACIONES MENSUALES RELLENADAS Y CORREGIDAS ESTACIÓN CAMAR

año/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	prom
1974								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1975	29.5	6.6	15.5	0.0	11.4	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	68.0
1976	19.1	1.0	1.6	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.3
1977	6.9	27.1	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.7
1978	1.6	19.4	0.8	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.0
1979	8.0	0.0	7.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0
1980	0.0	4.0	9.0	0.0	2.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0
1981	0.0	94.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	10.5
1983	0.0	4.0	0.0	0.0	5.0	65.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.0
1984	93.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	125.0
1985	0.0	15.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.0
1986	29.0	12.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	2.0	0.0	0.0	7.5	0.0	60.5
1987	14.0	15.1	27.5	0.0	2.5	1.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	60.9
1988	3.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1
1989	0.0	40.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.5
1990	1.0	0.0	1.0	0.0	2.0	0.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.5	25.5
1991	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
1992	1.1	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	8.1
1993	2.0	6.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.1
1994	0.0	0.0	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	12.4
1995	22.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.5
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0
1997	1.0	51.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.5
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
1999	0.0	18.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	25.5
2000	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.9
2001	0.0	16.0	82.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.5
2002	0.0	0.1	58.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.8
2003	0.0	7.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0
2004	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0								
prom	9.1	11.3	8.8	0.2	1.3	4.1	0.1	0.8	0.4	0.0	0.3	0.8	**38.2**

TABLA 11 PRECIPITACIONES MENSUALES RELLENADAS Y CORREGIDAS ESTACIÓN SOCAIRE

año/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	prom
1974								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1975	55.5	12.5	29.1	0.0	21.5	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	128.1
1976	35.9	2.0	3.0	0.0	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.8
1977	13.0	51.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.0
1978	3.0	36.5	1.5	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.5
1979	14.0	0.0	11.5	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.5
1980	0.0	2.9	5.9	2.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.4
1981	0.0	56.9	8.5	12.0	0.0	0.0	0.0	5.0	4.0	0.0	0.0	0.0	86.4
1982	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	5.0	19.1
1983	0.0	1.5	0.0	4.5	14.5	28.5	8.0	0.0	3.0	0.0	0.0	2.0	62.0
1984	109.5	0.0	3.0	0.0	0.0	33.4	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	155.9
1985	0.0	40.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0
1986	21.0	7.5	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	2.4	0.0	0.0	11.7	0.0	46.6
1987	22.0	21.7	39.5	0.0	6.0	3.0	1.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	97.2
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	0.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0
1990	3.0	0.0	4.5	0.0	3.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.1	33.1
1991	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
1992	4.5	0.0	0.0	9.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	16.5
1993	4.0	4.5	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8
1994	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	10.0
1995	13.7	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	20.2
1996	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.5
1997	0.0	51.5	0.0	0.0	7.0	1.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	60.5
1998	0.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0
1999	0.0	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.0
2000	67.0	0.0	0.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.0
2001	0.0	5.5	39.5	3.0	3.5	0.0	0.0	0.5	2.0	0.0	0.0	1.0	55.0
2002	0.0	0.0	29.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.0
2003	0.0	8.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0
2004	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0								
prom	12.3	12.6	6.9	1.3	2.7	3.4	0.5	1.0	1.0	0.3	0.4	1.0	**44.7**

TABLA 12 PRECIPITACIONES MENSUALES RELLENADAS Y CORREGIDAS ESTACIÓN PEINE

año/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	prom
1974								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1975	10.5	2.0	0.0	0.0	7.0	2.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	24.0
1976	13.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0
1977	0.0	5.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5
1978	0.0	39.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0
1979	1.0	0.0	8.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0
1980	0.0	0.0	19.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.5
1981	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	3.0	2.5	0.0	0.0	0.0	11.5
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	6.0
1983	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	24.0	8.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	40.5
1984	35.5	0.0	1.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	50.0
1985	0.0	15.1	12.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.2
1986	4.5	6.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	15.5
1987	6.5	26.0	36.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	69.5
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0
1990	3.1	0.0	1.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	14.1
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1992	0.0	0.0	0.0	3.0	7.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0
1993	4.0	4.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5
1994	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
1995	10.5	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.5
1996	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5
1997	1.0	20.0	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.5
1998	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0
1999	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	18.5
2000	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5
2001	0.0	2.0	35.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5
2002	0.0	0.0	69.5	0.0	1.0	0.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.0
2003	0.0	40.5	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0
2004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0								
prom	3.1	6.6	6.6	0.4	1.3	1.9	0.6	0.4	0.4	0.1	0.0	0.3	**22.3**

TABLA 13 PRECIPITACIONES MENSUALES RELLENADAS Y CORREGIDAS ESTACIÓN TALABRE

año/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	prom
1974								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1975	86.2	21.3	46.3	0.0	34.9	16.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	205.5
1976	56.6	5.5	7.0	0.0	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	78.9
1977	22.1	79.4	0.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	114.4
1978	7.0	57.5	4.7	0.0	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.4
1979	15.9	0.0	14.3	0.0	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.1
1980	0.0	9.2	17.6	0.0	5.9	0.0	0.0	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	43.6
1981	0.0	160.2	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	166.1
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.1	0.0	0.0	0.0	20.1
1983	0.0	9.2	0.0	0.0	10.9	111.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	131.7
1984	158.5	0.0	0.0	0.0	0.0	56.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	214.7
1985	0.0	27.7	36.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.8
1986	51.2	22.7	0.0	0.0	0.0	19.3	0.0	5.9	0.0	0.0	15.1	0.0	114.1
1987	26.0	27.8	48.6	0.0	6.7	5.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	117.3
1988	7.6	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.2
1989	0.0	70.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.5
1990	4.2	0.0	4.2	0.0	5.9	3.4	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.2	57.9
1991	4.2	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4
1992	4.4	0.0	0.0	4.2	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	23.7
1993	5.9	12.6	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	43.8
1994	0.0	0.0	21.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	25.8
1995	39.4	0.0	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	56.8
1996	0.0	1.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	42.0	0.5	0.0	0.0	0.0	48.0
1997	0.0	55.0	19.0	0.0	4.5	0.0	0.0	1.5	2.0	0.0	0.0	0.0	82.0
1998	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0
1999	0.0	8.0	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	38.0
2000	91.5	0.0	3.0	6.0	10.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	112.5
2001	7.5	53.5	96.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	161.0
2002	0.0	6.0	79.0	0.0	3.0	1.0	9.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	99.0
2003	0.0	30.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0
2004	18.0	22.0	0.0	0.0	0.0								
prom	20.2	23.0	15.5	1.0	4.0	7.9	0.5	2.2	1.1	0.0	0.5	1.5	**78.5**

TABLA 14 PRECIPITACIONES MENSUALES RELLENADAS Y CORREGIDAS ESTACIÓN MONTURAQUI

año/mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	prom
1974								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1975	83.0	7.5	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.5
1976	103.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	103.0
1977	6.0	20.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.0
1978	0.0	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.0
1979	11.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0
1980	0.0	5.3	12.7	0.1	1.6	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	23.6
1981	0.0	137.9	3.5	7.4	0.0	0.0	0.0	1.7	1.1	0.0	0.0	0.0	151.7
1982	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	1.7	17.0
1983	0.0	3.9	0.0	1.4	11.8	80.5	3.3	0.0	0.6	0.0	0.0	0.1	101.4
1984	152.3	0.0	0.6	0.0	0.0	49.4	0.0	0.0	0.0	4.3	0.0	0.0	206.6
1985	0.0	35.6	23.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.3
1986	39.8	15.2	0.0	0.0	0.0	11.3	0.0	2.3	0.0	0.0	12.9	0.0	81.5
1987	25.0	26.0	48.1	0.0	4.7	2.1	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	107.4
1988	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
1989	0.0	61.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	61.6
1990	1.6	0.0	2.4	0.0	2.6	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.1	37.8
1991	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
1992	2.5	0.0	0.0	5.1	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	13.0
1993	3.2	7.5	11.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	23.8
1994	0.0	0.0	14.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	15.9
1995	31.8	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	40.9
1996	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	26.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.4
1997	0.0	78.5	7.6	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88.9
1998	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5
1999	0.0	29.6	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	35.2
2000	73.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73.1
2001	0.0	18.2	104.2	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	123.9
2002	0.0	0.0	73.6	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0
2003	0.0	10.4	0.0	0.0	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.1
2004	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0								
prom	17.9	16.6	11.3	0.8	1.5	5.0	0.2	1.2	0.7	0.1	0.4	1.2	**58.5**

Con el proceso de relleno y corrección realizado, se generó 5 estadísticas con precipitaciones mensuales para el período comprendido entre agosto de 1974 y mayo de 2004, es decir, se cubrió un intervalo de tiempo de 29 años.

A-1.5 ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIONES REPRESENTATIVAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de interés corresponde a la cuenca de aporte superficial al Salar de Atacama y el objetivo final del análisis hidrológico es la definición de una distribución de caudales de recarga efectiva que permita definir los flujos de agua dulce que ingresan al salar por sus bordes.

Se eligió la estación Socaire como estación base, dado que es la más completa y se ubica en una elevación intermedia (3251 m.s.n.m.).

Para generar una distribución de lluvia histórica sobre el área de interés, se analizaron algunos valores extremos de precipitaciones mensuales registrados en las 5 estaciones elegidas; se eligieron tres meses en los que se registró una precipitación creciente, con relación a la altitud de cada estación. Con esos valores, se construyeron funciones de precipitación mensual en función de la elevación, en el Gráfico 3 se muestran las curvas asociadas a las funciones.

Las funciones incluyen 3 tramos: el primero es exponencial (z ~< 2300 m.s.n.m.), el segundo polinómico (de tercer grado) y el último es logarítmico (z ~> 3600 m.s.n.m.).

En el Gráfico 3 se puede apreciar que las curvas de enero-1984 y enero -2000 se ubican por debajo de los puntos, debido a que se corrigió los valores resultantes para obtener una coincidencia en las precipitaciones medias anuales calculadas a través de las curvas y las registradas en las estaciones (ver Gráfico 4).

En el Gráfico 4 se presentan las precipitaciones anuales de las 5 estaciones pluviométricas y las lluvias anuales, calculadas para el sistema Salar de Atacama, en función de las curvas del Gráfico 3. Se puede observar que la distribución de precipitaciones generada para el sistema Salar de Atacama se ubica entre los puntos, que corresponden a las mediciones de lluvias anuales registradas en las estaciones.

Para calcular la precipitación mensual en una elevación z de la cuenca de aporte superficial al Salar de Atacama, en el mes k ($P^k_{CSA}(z)$), se compara la precipitación del mes k en la estación Socaire (P_S^k) con $C_1(z)$, $C_2(z)$ y $C_3(z)$, y se estima la precipitación en función de las curvas más cercanas, es decir:

si $P_S^k > C_1(z) \rightarrow P^k_{CSA}(z) = C_1(z)$

si $C_1(z) > P_S^k > C_2(z) \rightarrow P^k_{CSA}(z) = a \cdot C_1(z) + b \cdot C_2(z)$, con $a = [P_S^k - C_2(z)] / [C_1(z) + C_2(z)]$ y $b = [C_1(z) - P_S^k]) / [C_1(z) + C_2(z)]$

si $C_2(z) > P_S^k > C_3(z) \rightarrow P^k_{CSA}(z) = a \cdot C_2(z) + b \cdot C_3(z)$, con $a = [\ P_S^k - C_3(z)\ ] / [C_2(z) + C_3(z)]$ y $b = [\ C_2(z) - P_S^k\ ] / [\ C_2(z) + C_3(z)\ ]$

si $P_S^k < C_3(z) \rightarrow P^k_{CSA}(z) = C_3(z)$

De esa forma, se incorporó, en la distribución de precipitaciones para la cuenca de aporte superficial al Salar de Atacama, la variación espacial ligada a la cuantía de las precipitaciones mensuales.

GRÁFICO 3 CURVAS C(z)

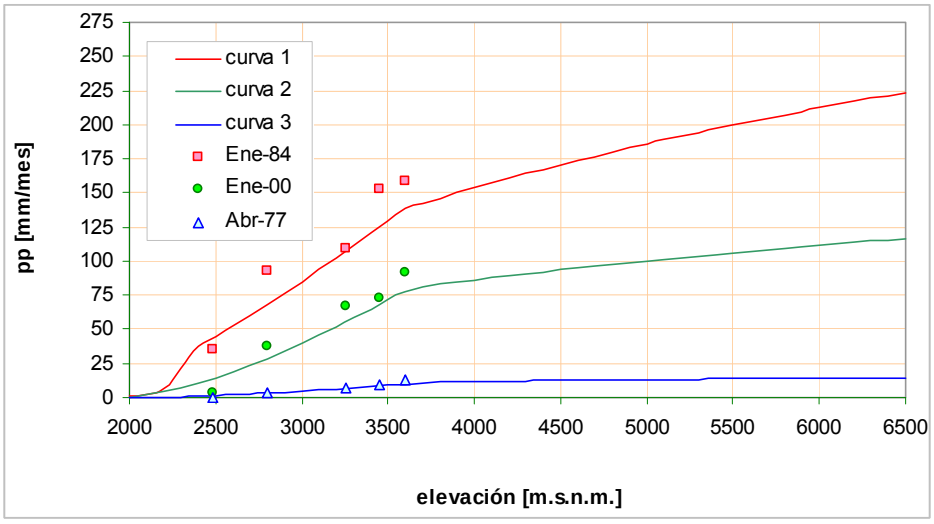
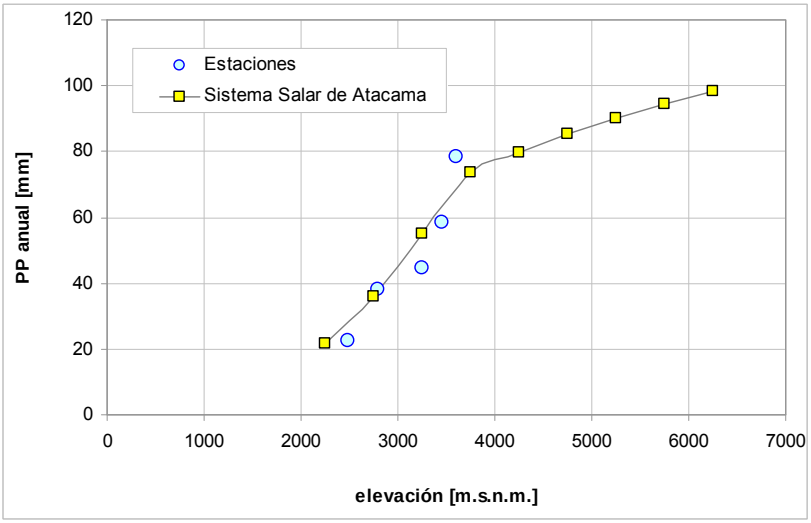


GRÁFICO 4 PRECIPITACIONES ANUALES EN ESTACIONES Y EN SISTEMA SALAR DE ATACAMA



A-1.6 DISTRIBUCIÓN DE RECARGA EFECTIVA

En el área de estudio gran parte de la precipitación se evapora, otra parte escurre superficialmente y el resto infiltra. La componente que es absorbida por el terreno y que logra llegar hasta los acuíferos corresponde a la recarga efectiva del sistema acuífero. A los bordes del salar llegan los flujos subterráneos de los acuíferos y parte de la escorrentía superficial que se genera en la cuenca.

Para el salar se cumple:

$$Q_{sub}+Q_{sup}+Q_{ppes} = Q_{evl}+Q_{evn} \quad (1)$$

Q_{sub}: flujo subterráneo de entrada hacia el volumen de control (VC)
Q_{sup}: flujo superficial de entrada al VC
Q_{ppes}: precipitación efectiva sobre la superficie del VC (salar). Este caudal corresponde a la parte de la precipitación que infiltra, recargando al volumen de salmuera.
Q_{evl}: evaporación desde las áreas de vegas y lagunas
Q_{evn}: evaporación desde el núcleo

Si se define como caudal de recarga efectiva al sistema, la parte de la escorrentía total que llega al flujo subterráneo (de agua dulce y salmuera), éste sería:

$$Q_{ref} = Q_{sub} + Q_{sup} + Q_{ppes} = Q_{evl} + Q_{evn}$$

Este caudal se incorpora al sistema en toda la extensión de la cuenca de aporte efectivo. Dado que no se conoce la extensión de la cuenca de aporte efectivo, es razonable adoptar la hipsometría de la cuenca hidrológica, como criterio para establecer su distribución espacial.

En la Figura 4 (ver figura en informe) se muestran los rangos de elevación de la cuenca hidrológica y los caudales de aporte efectivo asociados a 13 zonas. Las zonas o subcuencas se definieron según criterios geográficos e hidrogeológicos y de acuerdo a la zona que se representará con el modelo de flujo.

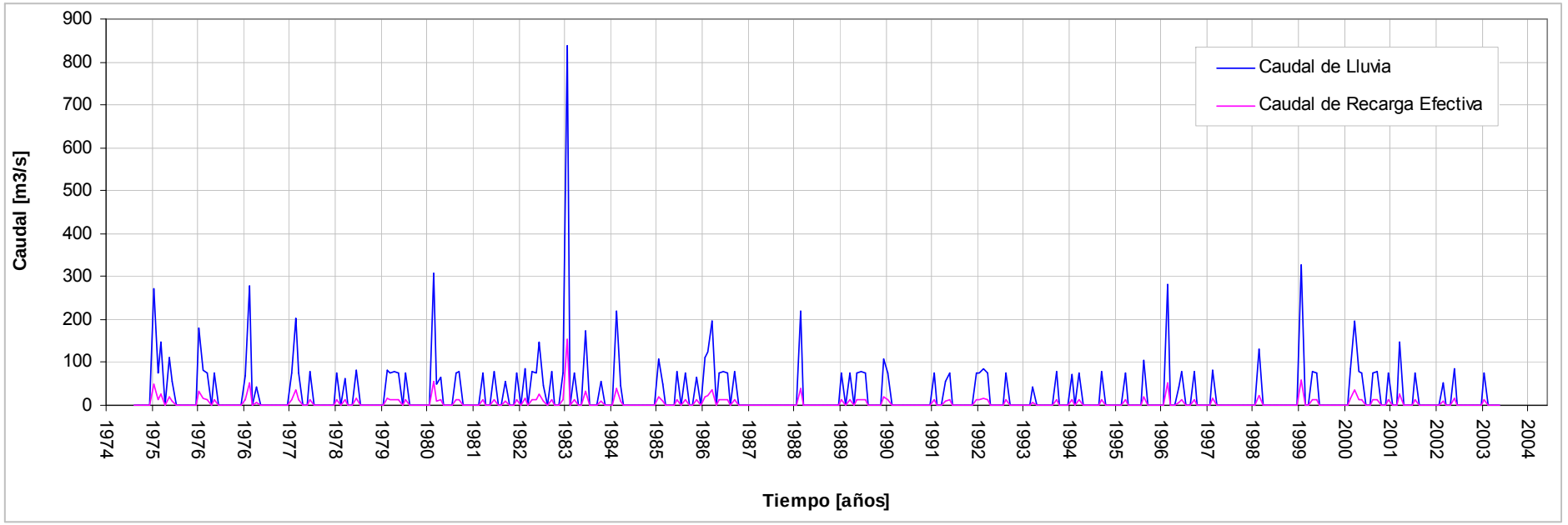
La zona de flujo del modelo corresponde a la subárea sur de la Figura 5 (ver figura en informe). Si se resta a la recarga efectiva que llega a la zona norte (2273 l/s) el caudal evaporado (1887 l/s), se obtiene el flujo pasante desde la zona norte hacia la zona sur (386 l/s, ver Figura 6 del informe).

Los restantes flujos pasantes coinciden con las recargas efectivas estimadas las subcuencas asociadas a la zona modelada (zona sur, ver Figuras 4 y 6 del informe).

La distribuciones de recarga efectiva y de caudales pasantes hacia la zona sur del salar (zona modelada), permitirán ajustar algunas variables del modelo operado en régimen permanente.

En el Gráfico 5 se presentan los resultados obtenidos, comparando los caudales de lluvia con los caudales de recarga total para toda la cuenca de aporte superficial al Salar de Atacama.

GRÁFICO 5
CAUDALES DE LLUVIA Y RECARGA TOTAL CUENCA DE APORTE SUPERFICIAL AL SALAR DE ATACAMA



ANEXO 2
PROPIEDADES FÍSICAS DE LA COSTRA SALINA: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (k) Y POROSIDAD EFECTIVA (S_Y)

ANEXO II

PROPIEDADES FÍSICAS DE LA COSTRA SALINA: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K) Y POROSIDAD EFECTIVA (SY)

En el presente anexo, se ha incluido los resultados de pruebas de bombeo realizadas por este consultor en los años 1985 y 2001.

A-2.1 PRUEBAS 1985

Durante el año 1985 se efectuaron pruebas de bombeo en pozos con profundidades entre 3 y 5 m para estimar los parámetros físicos de la costra salina[***]. Los resultados obtenidos, se resumen en la Tabla 1 y la ubicación de los puntos de control se muestra en la Figura 1.

TABLA 1 RESULTADOS OBTENIDOS EN PRUEBAS DE 1985

Pozo	Profundidad perforada [m]	Conductividad hidráulica [m/s]	Porosidad efectiva [%]
21.5	5	$27.5 \cdot 10^{-3}$	0.64
20	3	$30.0 \cdot 10^{-3}$	12.0
17.5	3	$5.5 \cdot 10^{-3}$	18.0
15	16.5	$1.3 \cdot 10^{-3}$	5.5
13.5	5	$0.5 \cdot 10^{-3}$	6.0
9.5	5	$1.3 \cdot 10^{-3}$	2.0
4.5	5	$0.8 \cdot 10^{-3}$	4.0

A-2.2 PRUEBAS 2001

Con el objetivo de analizar la variación de los parámetros del suelo en función de la profundidad, en el año 2001 se realizaron pruebas de bombeo en el sector sur del núcleo del salar.

Se utilizó un procedimiento que consistió en perforar los pozos hasta 10 m de profundidad y luego realizar las pruebas de bombeo. Posteriormente, se continuó la perforación hasta los 20 m y se efectuó una segunda serie de pruebas. Finalmente, se alcanzó la profundidad de 30 m y se realizó la última serie de pruebas.

[***] Salar de Atacama - Northern Clay Area Experiment on Movement of Pond Leakage, Ayala y Cabrera Ltda., March 1985.

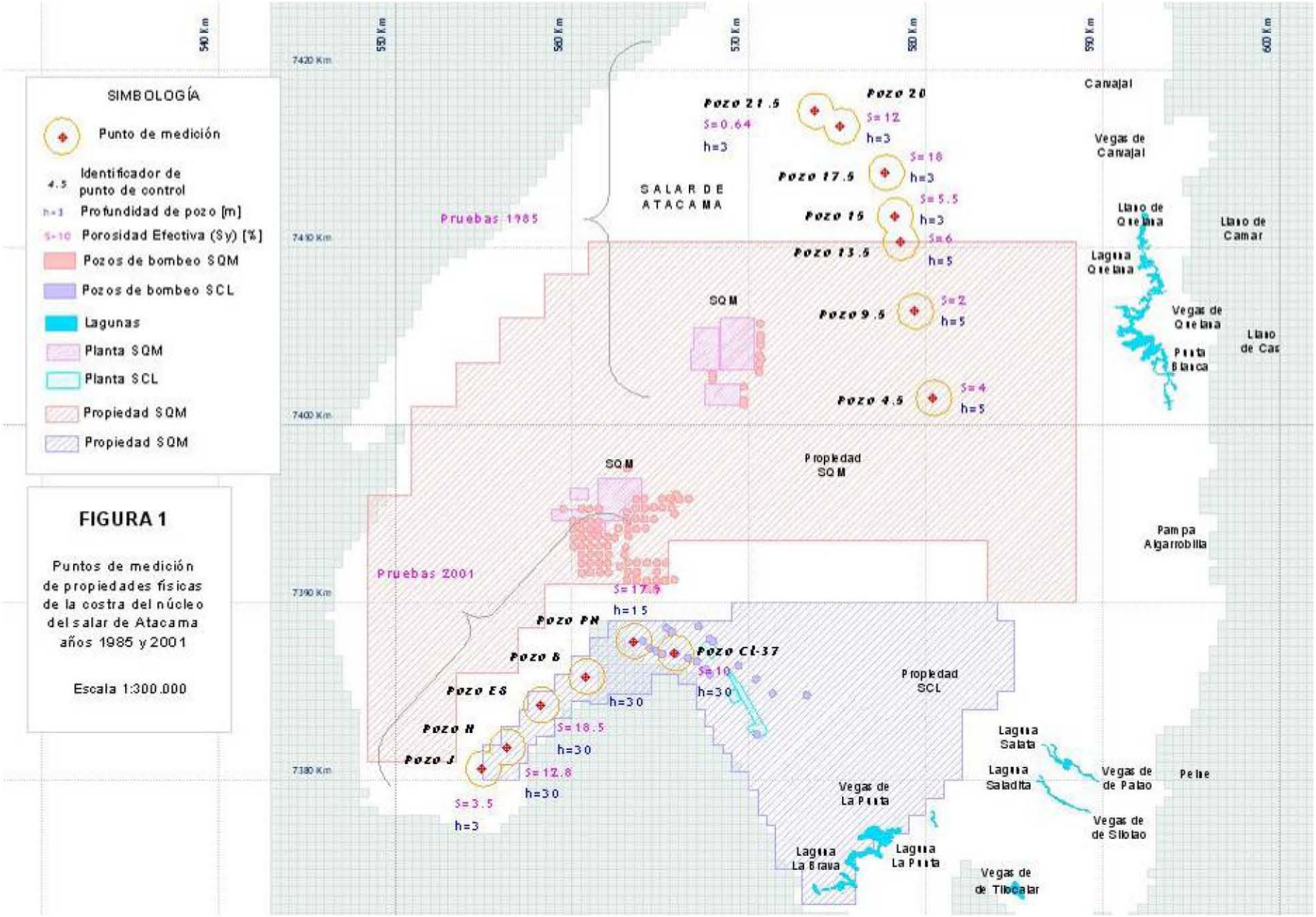


FIGURA 1

Puntos de medición de propiedades físicas de la costra del núcleo del salar de Atacama años 1985 y 2001

Escala 1:300.000

Como puntos de observación se construyeron 2 piezómetros de 15 m de profundidad a distancias entre 5 y 8 m de cada pozo construido. Además, se construyeron 4 piezómetros de 3 m de profundidad ubicados entre 15 y 30 m de cada punto de bombeo. De esa forma, cada prueba fue controlada a través de dos líneas constituidas por tres piezómetros cada una. En la Figura 2 se muestra la configuración de control para uno de los pozos de bombeo. Los resultados obtenidos se han resumido en la Tabla 2

Según pruebas realizadas por SQM[†††], la conductividad hidráulica del núcleo en los primeros 10 m de profundidad es 10 veces superior a la asociada a los siguientes 40 m y 50 veces mayor a la registrada entre 50 y 100 m de profundidad (ver Figura 3).

De los resultados incluidos en la Tabla 2, se puede inferir que al menos en los puntos controlados en 2001, la porosidad efectiva no presenta una tendencia definida en función de la profundidad (ver datos pozos E8 y H). Por otro lado, se confirmó que la conductividad hidráulica es decreciente con relación a la profundidad, pero con tasas de variación menores a las indicadas por SQM.

TABLA 2
RESULTADOS PRUEBAS AÑO 2001

Pozo	Profundidad perforada [m]	Conductividad hidráulica [m/s]	Porosidad efectiva [%]
Cl-37	30	0.1·10-3	10.0
PN	15	1.6·10-3	17.9
B	20	5.2·10-3	-
	30	3.7·10-3	-
E8	10	$4.3 \cdot 10^{-3}$	-
	20	$2.8 \cdot 10^{-3}$	10-17
	30	$1.6 \cdot 10^{-3}$	13-24
H	10	$3.1 \cdot 10^{-3}$	12.8
	20	$1.4 \cdot 10^{-3}$	16.5
	30	$0.9 \cdot 10^{-3}$	12.8
J	3	$3.5 \cdot 10^{-3}$	3.5

[†††]Proyecto de estudio y monitoreo del recurso hídrico del Salar de Atacama, Dictuc, 2004.

FIGURA 2
DISTRIBUCIÓN DE POZOS DE OBSERVACIÓN EN
TORNO AL POZO DE BOMBEO H (MEDICIONES 2001)

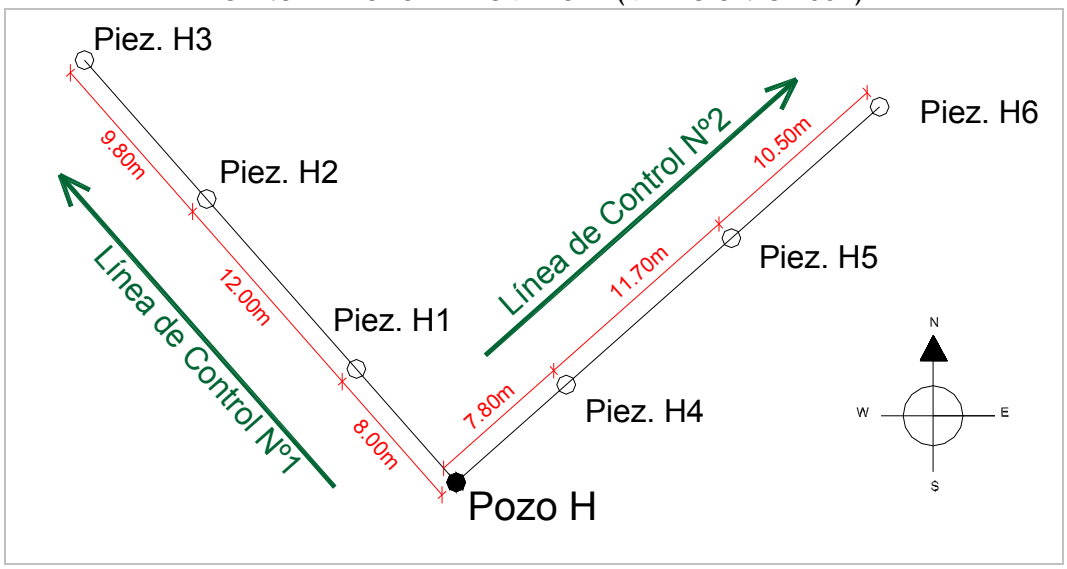
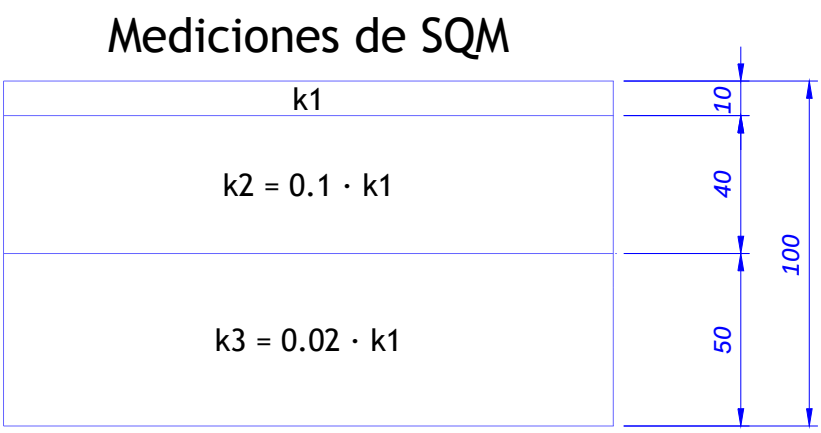


FIGURA 3
RANGOS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SEGÚN SQM



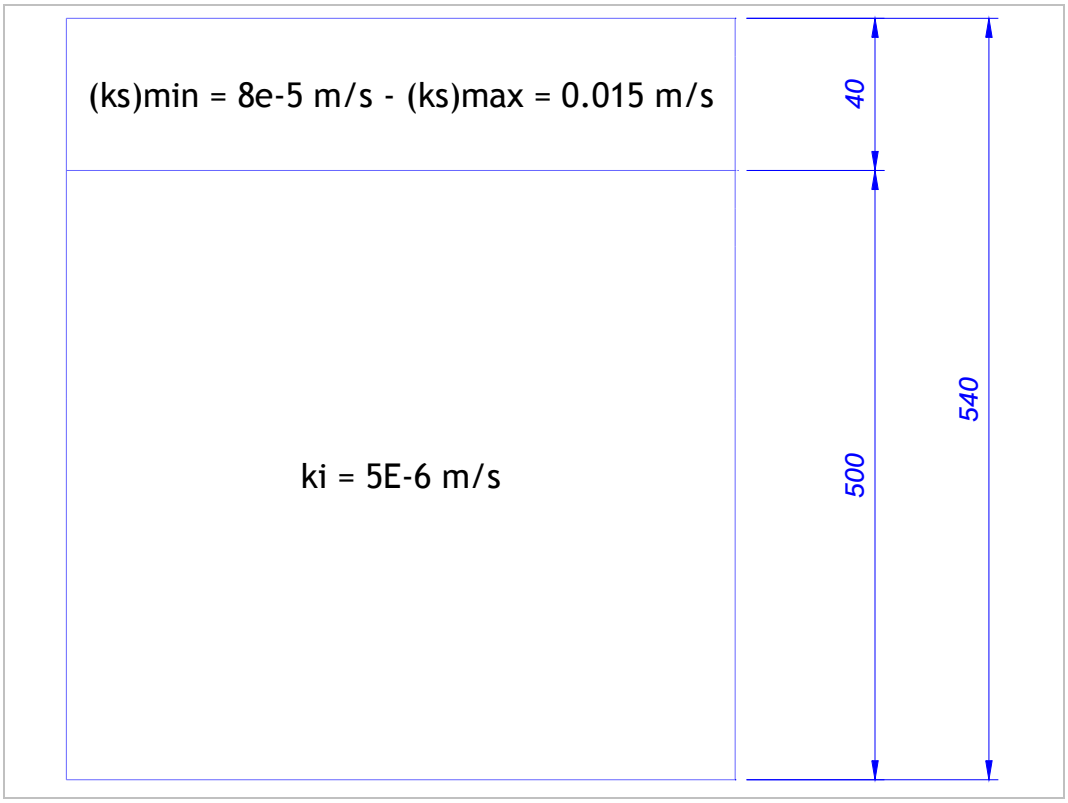
kmax = 0.06 m/s - kmin = 6E-10 m/s

TABLA 3
RANGOS MEDIDOS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y POROSIDAD EFECTIVA

área	prof. [m]	k_{min} [m/s]	km_{ax} [m/s]	S_{min} [%]	S_{max} [%]
zona norte	3.0	0.0055	0.0300	12.00	18.00
	5.0	0.0005	0.0275	0.64 [†]	6.00
	16.5	0.0013		5.50	
zona sur	3.0	0.0035		3.50	
	15.0	0.0016		17.90	
	30.0	0.0001	0.0037	12.80	18.50
área	prof. [m]	k_{min} [m/s]	km_{ax} [m/s]	S_{min} [%]	S_{max} [%]
SALAR	entre 3 y 30	**0.0001**	**0.03**	**3.5**	**18.5**

[†]: Valor probablemente correspondiente a un estado semiconfinado de la costra, en área conocida como "Zona de Arcillas".

FIGURA 4
RANGOS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA REPRESENTADOS EN EL MODELO



ANEXO 3
BOMBEO PROYECTADO POR SQM

Incremento de extracción proyectado por SQM

En el resumen ejecutivo del estudio de impacto ambiental del proyecto SQM de la referencia[10], se incluyó la Tabla 1.

TABLA 1 CRONOGRAMA PROYECTO SQM

zona / período	2005-2006	2007-2010	2011-2016	2017-2023	2024-2030	Total
Zona de extracción de salmuera MOP [Km^2]					152.0	
Zona de extracción de salmuera SOP [Km^2]					58.0	
Áreas de pozas de evaporación solar MOP [Km^2]	3.6	11.6	3.0	1.5	1.5	21.2
Áreas de pozas de evaporación solar SOP [Km^2]		2.6				2.6
Áreas de acopio de sales de descarte MOP [Km^2]					26.0	
Áreas de acopio de sales de descarte SOP [Km^2]					11.7	

Analizando los caudales promedios de extracción proyectados y las áreas evaporantes de la Tabla 1, se puede definir un cronograma para la extracción futura de SQM, según las magnitudes incluidas en la Tabla 2.

TABLA 1 CAUDALES DE EXTRACCIÓN DE SQM

	Caudal de extracción de salmuera actual [l/s]	Caudal de extracción de salmuera futuro [l/s]	Incremento en el caudal de extracción de salmuera [l/s]
MOP	276	1000	724
SOP	302	700	398
	Incremento total del caudal de extracción de salmuera [l/s]	Superficie evaporante total [Km^2]	Caudal de extracción unitaria [$l/s/Km^2$]
Total	1122	23.8	47.14

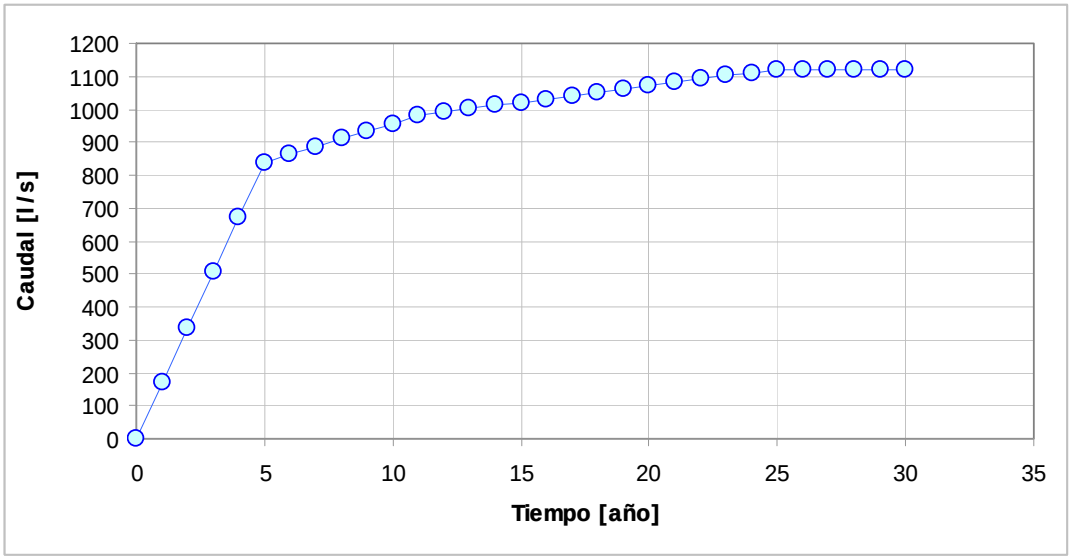
Suponiendo incrementos lineales en los períodos establecidos en la Tabla 1, se estimó la probable regla de extracción para el proyecto de SQM, la que se presenta en la Tabla 3 y en el Gráfico 1.

[10] "Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama", Igsa Consultores para SQM

TABLA 3 REGLA DE EXPLOTACIÓN PROYECTADA DE SQM

año N°	año	Incremento acumulado del caudal de extracción de salmuera [l/s]	Caudal de bombeo promedio anual total [l/s]	Porcentaje de incremento con respecto al caudal total actual [%]
0	2005	0	578	100
1	2006	170	748	129
2	2007	337	915	158
3	2008	504	1082	187
4	2009	672	1250	216
5	2010	839	1417	245
6	2011	863	1441	249
7	2012	886	1464	253
8	2013	910	1488	257
9	2014	933	1511	261
10	2015	957	1535	266
11	2016	981	1559	270
12	2017	991	1569	271
13	2018	1001	1579	273
14	2019	1011	1589	275
15	2020	1021	1599	277
16	2021	1031	1609	278
17	2022	1041	1619	280
18	2023	1051	1629	282
19	2024	1061	1639	284
20	2025	1071	1649	285
21	2026	1082	1660	287
22	2027	1092	1670	289
23	2028	1102	1680	291
24	2029	1112	1690	292
25	2030	1122	1700	294
26	2031	1122	1700	294
27	2032	1122	1700	294
28	2033	1122	1700	294
29	2034	1122	1700	294
30	2035	1122	1700	294

GRÁFICO 1 REGLA DE EXPLOTACIÓN PROYECTADA DE SQM



El incremento de extracción proyectado por SQM (escenario c), se representó aumentando uniformemente los caudales de bombeo de los pozos de SQM hasta completar los caudales proyectados en los sectores MOP y SOP, según la cronología de la Tabla 2.

De acuerdo a lo expresado en EIA de SQM, los procesos productivos asociados a SQM, generan un excedente de salmuera. En el estudio citado, se indicó que durante la vida útil del proyecto se reinyectará en forma directa a lo más un caudal de 270 l/s como promedio anual desde el conjunto de áreas MOP y SOP.

En la estimación del incremento futuro de extracción de salmuera proyectado por SQM (EIA), se aclaró que dicho incremento corresponde a un caudal neto de bombeo, dependiente de las reinyecciones. Por consiguiente, el caudal de reinyección máximo indicado en el párrafo anterior, debería estar implícito en el incremento de la extracción de salmuera proyectado por SQM.

Anexo 5.3

Hidrología e Hidrogeología

Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

Preparado por:

GCF Consultores

ÍNDICE

1. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DEL SALAR DE ATACAMA 1

1.1. Generalidades 1
1.2. Precipitaciones 1
1.3. Evaporación 5
1.3.1 Evaporación en el núcleo 6
1.4. Hidrogeología del núcleo 6
1.4.1 Medios permeables 6
1.4.2 Niveles de salmuera 7
1.4.3 Solicitaciones externas 9
1.4.4 Recarga y descarga 11
1.5. Hidráulica de las lagunas 11
1.5.1 Modelo conceptual del núcleo y bordes 11
1.6. Cálculo de volumen de agua de lagunas 15
1.6.1 Superficie cubierta por lagunas 15
1.6.2 Volúmenes almacenados en las lagunas 19
1.6.3 Volúmenes de las lagunas en función del tiempo 24

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Rangos medidos de conductividad hidráulica y porosidad efectiva 7

Tabla 2. Rangos conductividad hidráulica y porosidad efectiva en núcleo y borde 7

Tabla 3. Imágenes Landsat y superficies de lagunas [Ha] 15

Tabla 4. Resumen de datos 15

ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 1. Lluvia mensual estación Peine 4

Gráfico 2. Lluvia mensual en estación Peine 4

Gráfico 3. Evaporación promedio mensual estación Planta Peine 5

Gráfico 4. Nivel de salmuera en pozo de monitoreo S-3 9

Gráfico 5. Extracción de salmuera histórica y proyectada en el núcleo 10

Gráfico 6 17

Gráfico 7 18

Gráfico 8 19

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Gráfico 9. Áreas de espejos de agua de lagunas La Punta y Brava 23
Gráfico 10. Volúmenes de agua de lagunas La Punta y Brava 23
Gráfico 11. Volúmenes de agua almacenados en lagunas calculados en función de la lluvia ... 25

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DEL SALAR DE ATACAMA

1.1. Generalidades

El salar de Atacama y su entorno poseen una gran importancia desde los puntos de vista ecológico y económico. En los bordes del salar existen zonas de vegas y lagunas que albergan especies animales y vegetales. Por otro lado, la salmuera del núcleo, considerada como un recurso minero, y el agua dulce, que fluye a través de los acuíferos que circundan el salar, tienen gran relevancia en los procesos productivos que se desarrollan en el área.

En la zona marginal del salar, rodeando al núcleo, existen cuerpos de agua superficial, donde se desarrollan los sistemas biológicos mencionados; éstos se ubican en un área límite donde confluyen el agua dulce de los acuíferos de la cuenca de aporte al salar y la salmuera del núcleo. Por consiguiente, la preservación de esos sistemas, depende de la evolución dinámica de ambos fluidos y de su interrelación.

Es por ello que la planificación en la explotación de los recursos hídricos (tanto salmuera como agua dulce) y el monitoreo de sus efectos, resultan fundamentales para preservar aquellos ambientes.

En los puntos que se presentan a continuación se describen y analizan los componentes que intervienen en la dinámica del sistema estudiado, así como también las magnitudes que permiten describir su estado temporal; entre dichas componentes y magnitudes se cuentan: la escorrentía (superficial y subterránea), evaporación, calidad físico-química del agua, niveles (de salmuera, agua dulce y lagunas) y las solicitaciones externas (bombeos).

1.2. Precipitaciones

En el área de estudio, gran parte de la precipitación se evapora, otra parte escurre superficialmente y el resto infiltra. En las cuencas de aporte superficial al salar, la componente que es absorbida por el terreno y que logra llegar hasta los acuíferos, corresponde a la recarga efectiva del sistema acuífero. Ocasionalmente, en el salar mismo, lluvias de cierta magnitud, han generado un recarga directa sobre éste, produciendo un ascenso temporal en los niveles de salmuera del núcleo.

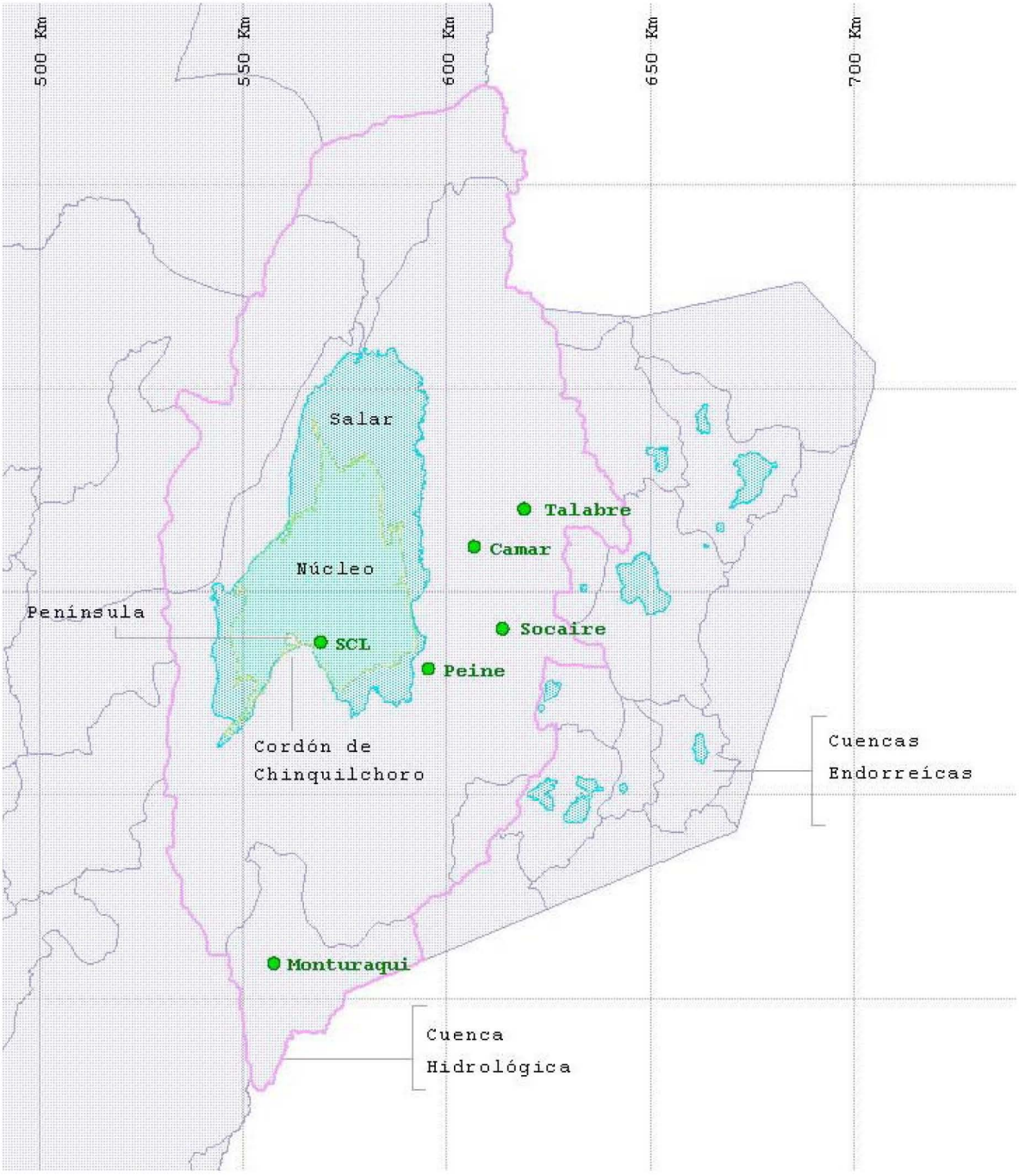
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Se cuenta con datos de lluvias mensuales en 6 estaciones ubicadas en la zona de interés, éstas son: Camar, Socaire, Peine, Talabre, Monturaqui y Planta SCL. En el ANEXO 1 se incluyen los registros de lluvias mensuales medidos en cada una de las estaciones mencionadas y en la Figura 1 se pueden visualizar sus ubicaciones.

En el Gráfico 1 se muestran los registros mensuales de la estación Peine, que tiene por objeto visualizar la variación temporal de las lluvias en las cercanías del salar mismo. Se puede apreciar que el año 2002 fue el más lluvioso (79 mm/año), seguido por 1987 (69.5 mm/año). Más adelante se podrá apreciar que la precipitación del año 2002 originó ascensos en los niveles de salmuera en algunos puntos del núcleo.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 1. Estaciones pluviométricas

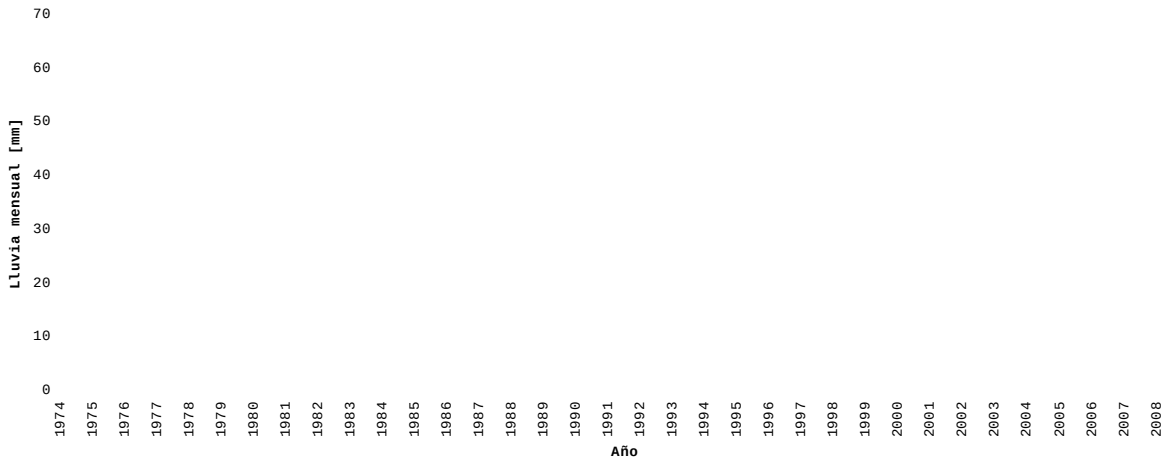


Fuente: GCF Consultores

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

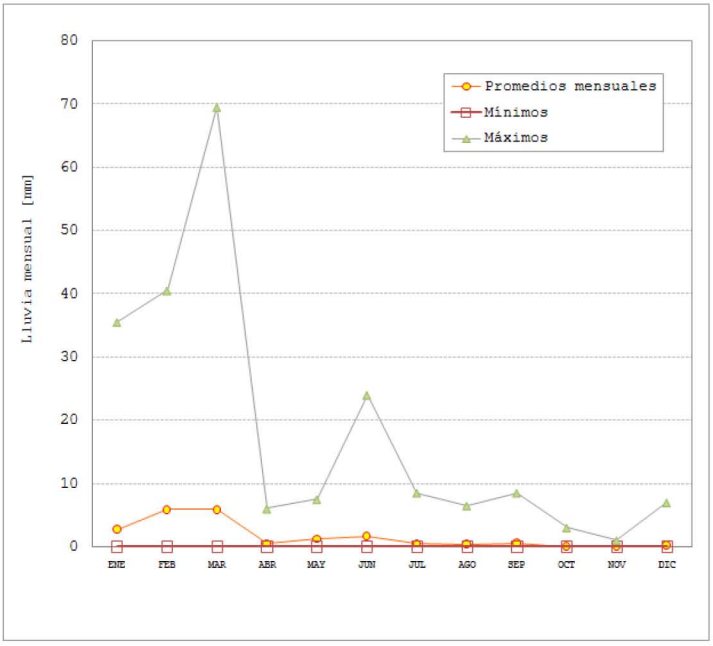
También se puede apreciar que los años húmedos han sido ocasionales, separados por períodos relativamente secos, como el comprendido entre los años 1988 y 1999.

Gráfico 1. Lluvia mensual estación Peine



Fuente: GCF Consultores

Gráfico 2. Lluvia mensual en estación Peine



Fuente: GCF Consultores

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1.3. Evaporación

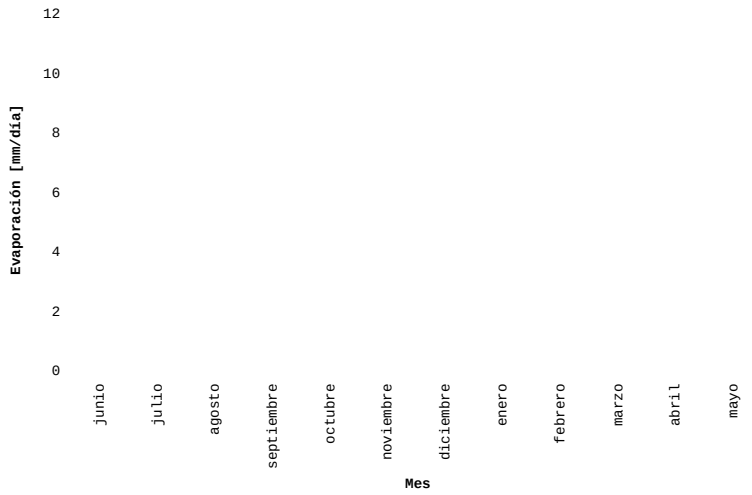
En 1986, Leonardo Mardones realizó mediciones de evaporación en varios puntos del salar de Atacama y caracterizando los tipos de suelos o las superficies desde las cuales se evapora el agua (dulce o salmuera) en el núcleo del salar y su entorno.

Mardones sectorizó el salar según la geología de superficie de éste y la profundidad del nivel de agua o salmuera. La zonificación integró además, las medidas de evaporación, lo que le permitió establecer áreas de propiedades evaporativas a las que asoció tasas promedio de evaporación.

Según los cálculos de Mardones, la evaporación total promedio desde el Salar de Atacama sería aproximadamente 5.6 m^3/s[1]. Esta estimación es muy importante, porque revela la cuantía de la recarga efectiva al sistema; esa estimación de recarga incluye la precipitación que infiltra en el salar mismo.

En el Gráfico 3 se muestra la variación a través de los promedios mensuales de evaporación en superficie de agua libre, registrados en la estación Planta SCL. Se puede observar un claro peak en el mes de diciembre.

Gráfico 3. Evaporación promedio mensual estación Planta Peine



Fuente: GCF Consultores. * Promedios de datos medidos entre 1989 y 2004.

[1] Estimación efectuada en función de los datos de Mardones en: "Modelo de simulación de flujo sistema salar de Atacama", GCF Ingenieros para SCL, 2005.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1.3.1 Evaporación en el núcleo

La evaporación depende de la profundidad del nivel de salmuera, a menor profundidad, mayor evaporación. Si se analiza el comportamiento del núcleo antes de que comenzara la extracción de salmuera, se puede deducir que en ese instante, se encontraba en equilibrio, saturado hasta una profundidad de aproximadamente 0.8 m.

Ese equilibrio, se debe haber mantenido a través del tiempo. Según Mardones, la tasa de evaporación promedio desde el núcleo sería de aproximadamente 0.005 mm/día (~1.8 mm/año). Dicha tasa debería ser mayor tras los eventos de lluvia importantes, puesto que en esos períodos el nivel de salmuera se encuentra más superficial.

1.4. Hidrogeología del núcleo

1.4.1 Medios permeables

El núcleo del salar presenta una estratigrafía variable. A nivel global se pueden diferenciar algunas zonas de características transmisivas y de almacenamiento semejantes. En los bordes del núcleo se han detectado estratos de muy baja permeabilidad, cuya existencia es consistente con la génesis geológica del núcleo. Se estima que la permeabilidad de esa zona debería tener valores entre $1 \cdot 10^{-6}$ y $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

En el núcleo mismo (ver Figura 1), el medio presenta en los primeros 30 a 40 m de profundidad, una permeabilidad no tan reducida. Ésa área constituye la reserva mineralógica de salmuera del salar. Sin embargo, la distribución irregular de zonas de baja permeabilidad del núcleo, genera una heterogeneidad en las propiedades hidrogeológicas del mismo. En la Tabla 1 se presentan algunos valores obtenidos de pruebas de bombeo realizadas por SCL. En la Tabla 2 se han integrado los valores de la Tabla 1 y se han incluido los valores que probablemente son representativos del borde del núcleo.

Bajo los 40 m de profundidad, se han detectado predominantemente capas arcillosas y cementadas.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Tabla 1. Rangos medidos de conductividad hidráulica y porosidad efectiva

Área	prof. [m], hasta	k_{min} [m/s]	km_{ax} [m/s]	S_{Ymin} [%]	S_{Ymax} [%]
zona norte	3.0	0.0055	0.0300	12.00	18.00
	5.0	0.0005	0.0275	0.64 [†]	6.00
	16.5	0.0013		5.50	
zona sur	3.0	0.0035		3.50	
	15.0	0.0016		17.90	
	30.0	0.0001	0.0037	12.80	18.50

[†]: Valor probablemente correspondiente a un estado semiconfinado de la costra.

Tabla 2. Rangos conductividad hidráulica y porosidad efectiva en núcleo y borde

área	prof. [m]	k_{min} [m/s]	k_{max} [m/s]	S_{Ymin} [%]	S_{Ymax} [%]
Borde núcleo	------	$1{\cdot}10^{-8}$	$1{\cdot}10^{-6}$	------	------
Núcleo salar	entre 0 y 40	$1{\cdot}10^{-4}$	$3{\cdot}10^{-2}$	3.5	18.5

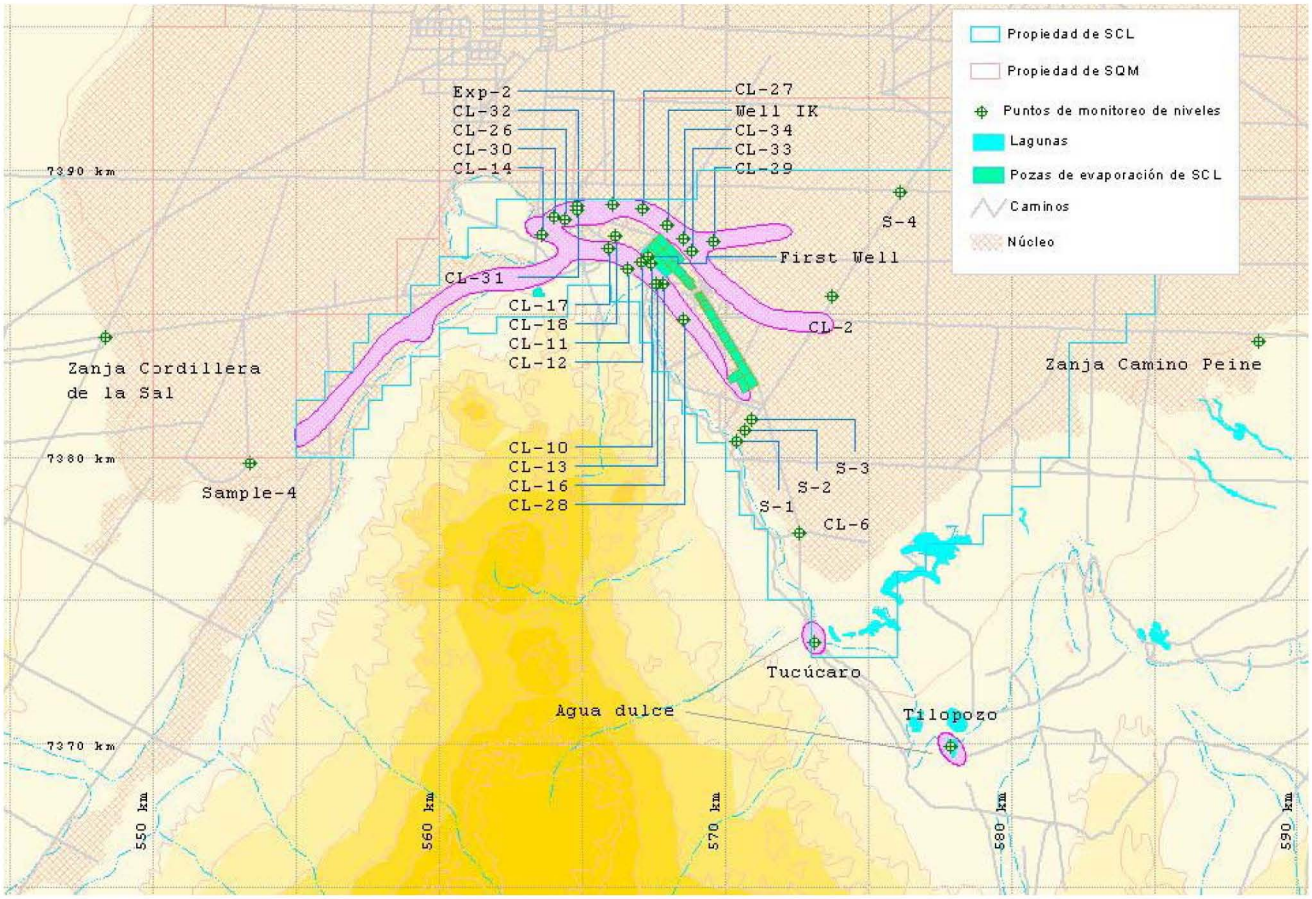
1.4.2 Niveles de salmuera

SCL ha monitoreado los niveles de salmuera en el núcleo desde agosto de 1989 a la fecha. Se cuenta con 29 puntos de control de salmuera en el núcleo y con 2 puntos de monitoreo de agua dulce; estos últimos ubicados en las áreas de Tilopozo y Tucúcaro (ver Figura 2). En la Figura 2 se pueden observar las ubicaciones de los 31 puntos de control de niveles, monitoreados mensualmente por SCL. En el ANEXO 2 se han incluido los gráficos de niveles en función del tiempo para todos los pozos monitoreados.

En el Gráfico 4 se muestra uno de los puntos de control; en él se pueden apreciar los ascensos en el nivel de salmuera, debido a las lluvias de 2001 y 2002. También es posible observar que la recarga por lluvia no es capaz de reestablecer la tendencia descendente que precede al evento.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

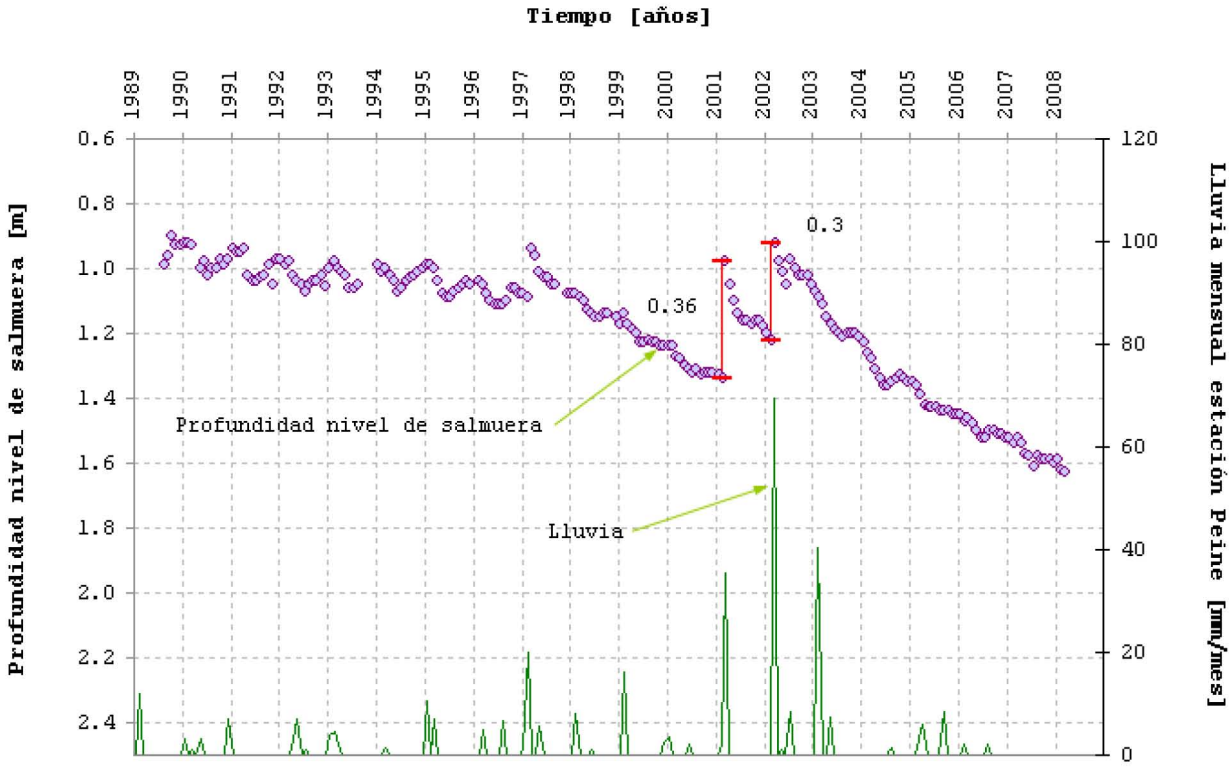
Figura 2. Ubicación de pozos de monitoreo de niveles de salmuera y de agua dulce



Fuente: GCF Consultores

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Gráfico 4. Nivel de salmuera en pozo de monitoreo S-3



1.4.3 Solicitaciones externas

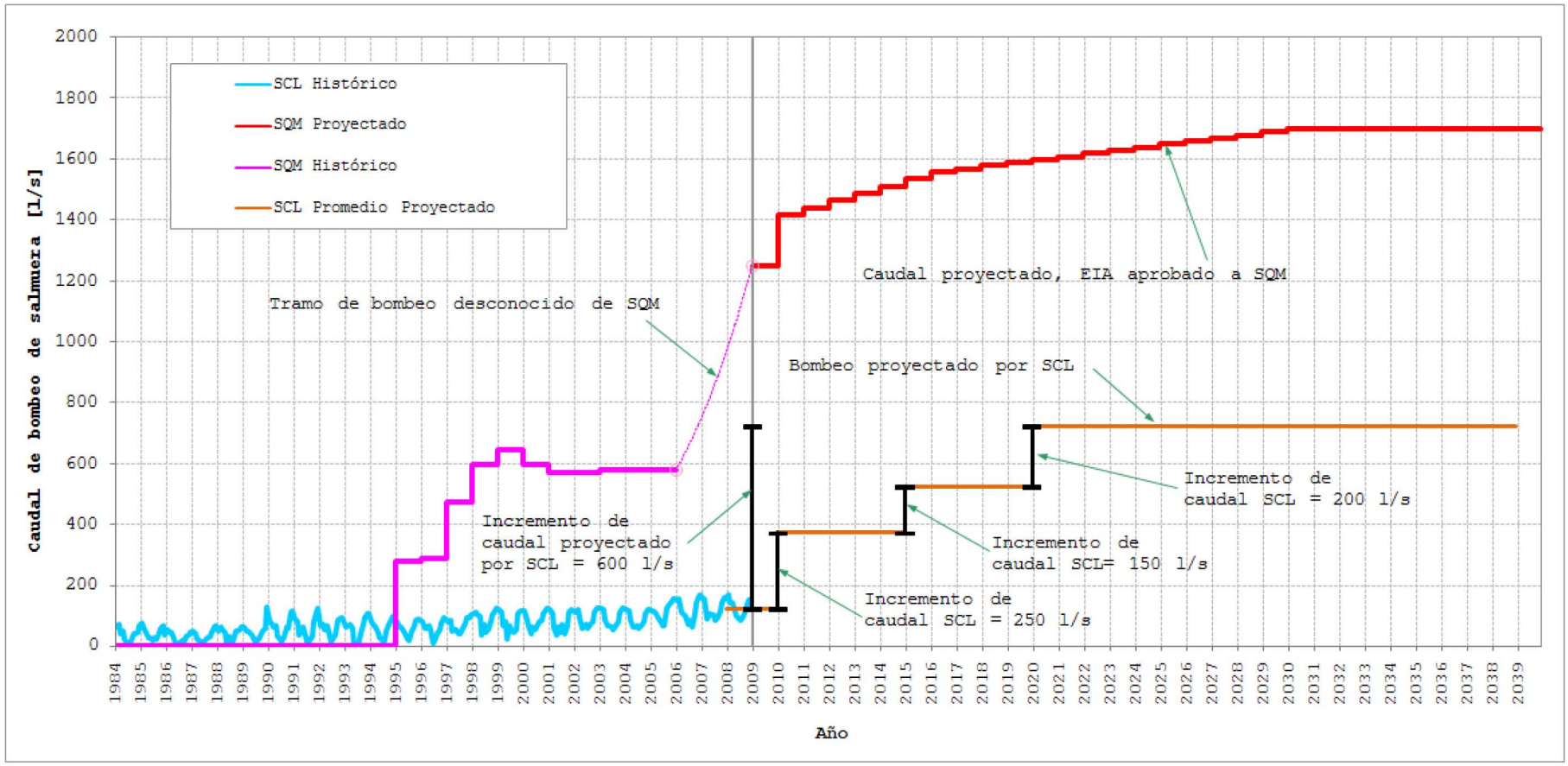
La componente exógena del sistema está asociada principalmente al bombeo de salmuera por parte de SCL y SQM.

SCL extrae salmuera desde 1984 a la fecha, con caudales promedios anuales de 142 l/s (ver Gráfico 5). El proyecto contemplado en el presente informe, incluye un incremento de 600 l/s que se aplicará escalonadamente durante los próximos 30 años.

Por otro lado, SQM comenzó a explotar el salar en 1995 y se la ha autorizado un caudal total de explotación máximo futuro de 1700 l/s.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Gráfico 5. Extracción de salmuera histórica y proyectada en el núcleo



Fuente: GCF Consultores

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Las curvas de extracción de SQM incluidas en los gráficos, fueron obtenidas de los EIA de SQM.

El aumento proyectado en la extracción de salmuera por parte de SCL, es de aproximadamente 415 l/s promedio del proyecto, los que se sumarían al promedio actual de 142 l/s.

1.4.4 Recarga y descarga

Como se analizó en los puntos anteriores, las descargas del núcleo son la evaporación y el bombeo de salmuera. La primera es, según las estimaciones de Mardones, del orden de 100 l/s. La extracción ha sido creciente en el tiempo y se proyectan incrementos en el futuro.

Por otro lado, la recarga proviene de la infiltración de la lluvia que cae sobre el salar y los flujos subterráneos que entran al núcleo desde los bordes. La recarga por lluvia promedio más el flujo subterráneo pasante, deberían ser del mismo orden de la evaporación promedio, es decir, 100 l/s. Lo anterior obedece a un balance simple y al hecho de que el equilibrio del sistema se mantuvo a través del tiempo, antes que comenzara la explotación de salmuera.

Como se deduce del presente punto y del anterior, la descarga supera en dos órdenes de magnitud a la recarga, por lo que es posible concluir que la explotación del sistema se sustenta y sustentará en el futuro casi exclusivamente de la reserva de salmuera almacenada.

1.5. Hidráulica de las lagunas

En los puntos anteriores se analizó el funcionamiento del núcleo como reserva hídrica y mineralógica, describiendo sus principales propiedades físicas y las magnitudes de las que depende su estado a través del tiempo. En el presente punto se analizan los sistemas ubicados en las áreas marginales del núcleo, cuyo estado depende en alguna medida de lo que ocurra en el núcleo y en las cuencas aportantes.

1.5.1 Modelo conceptual del núcleo y bordes

Para poder estudiar y representar matemáticamente un sistema, es necesario construir un esquema conceptual de su funcionamiento, para luego confirmar o descartar las hipótesis planteadas.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

En la Figura 3 se presenta un modelo conceptual del funcionamiento hídrico del sistema, a nivel de cuenca; se ha esquematizado un corte vertical del flujo, válido, por ejemplo, para una sección sur-norte en el borde oriente del salar.

En la Figura 4 se han esquematizado los principales elementos de las zonas de lagunas y su relación con el núcleo y los acuíferos. También se puede apreciar la existencia de una cuña salina que separa al agua dulce de los acuíferos de la salmuera del núcleo. Las lagunas reciben su alimentación de la escorrentía superficial que llega a éstas a través de cauces superficiales ocasionales y quebradas; además del afloramiento del agua subterránea.

El flujo subterráneo aflora debido a que en esa zona existen estratos de baja permeabilidad que impiden que el agua dulce entre de manera directa al núcleo. Si no fuese así, no existiría salmuera en el núcleo, si no, agua dulce.

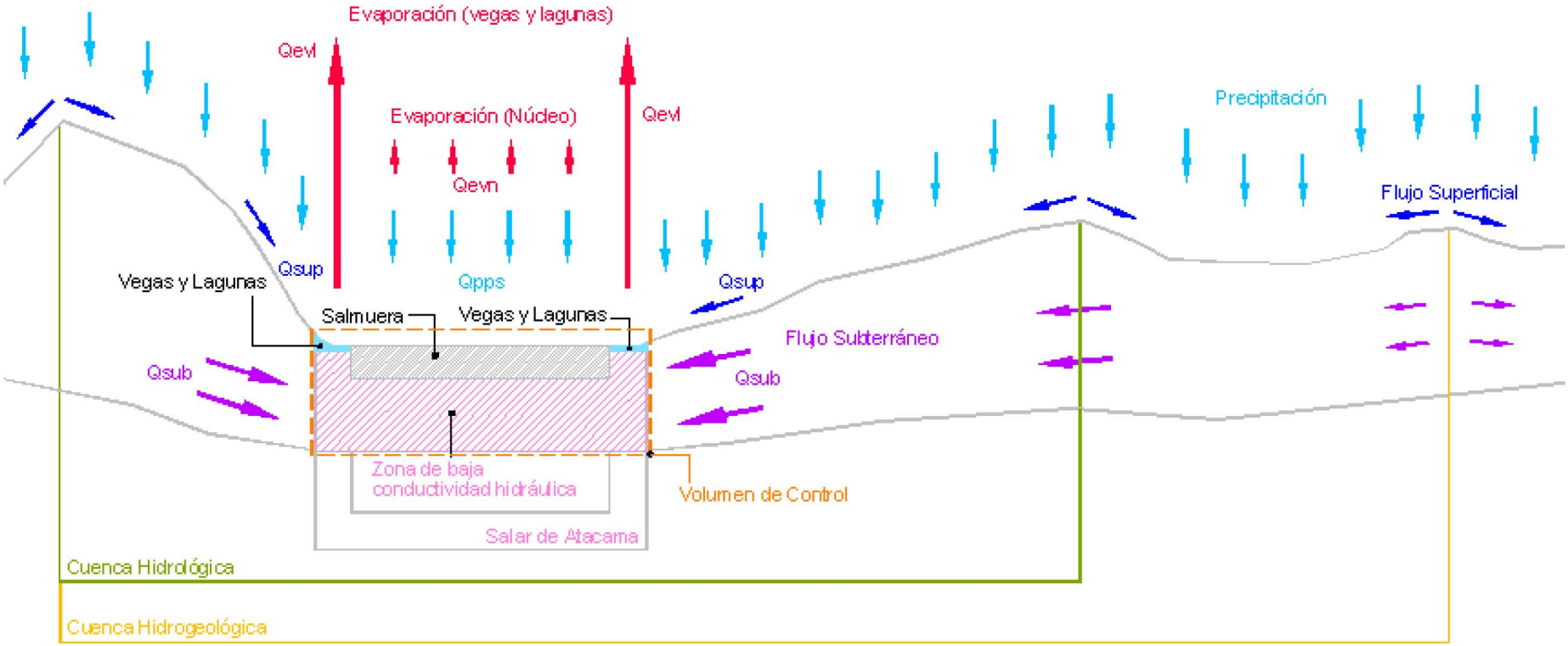
La calidad físico-química del agua de las lagunas depende de la cantidad de agua que llega a éstas desde la cuenca, tanto superficial como subterráneamente, pero además, depende de la posición de la cuña salina. Mientras más hacia el núcleo se encuentra la cuña, más dulce es el agua en las lagunas y vice versa.

El efecto de la explotación de salmuera en el núcleo, se traduce en el largo plazo en un cono de depresiones que eventualmente podría llegar cerca del borde de baja permeabilidad. Esa depresión podría inducir un flujo de las lagunas hacia el núcleo, pero considerando la baja permeabilidad del sector, éste no debería ser de magnitud importante. Otro efecto que podría producir la extracción en el núcleo es el movimiento de la cuña salina, lo que tendería a variar el nivel de salinidad en el agua de las lagunas.

Por otro lado, las extracciones de agua dulce en la cuenca de aporte también generan un cono de depresiones que se propaga hacia agua abajo. Si dicho cono llegase a las cercanías de las lagunas, se produciría una reducción del caudal subterráneo pasante y en consecuencia, del flujo que alimenta a las lagunas. La reducción de esa recarga, podría generar un efecto inverso al de la explotación de salmuera, es decir, con menos agua dulce entrando y con las tasas evaporativas estables, en el agua de las lagunas iría progresivamente aumentando la salinidad.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

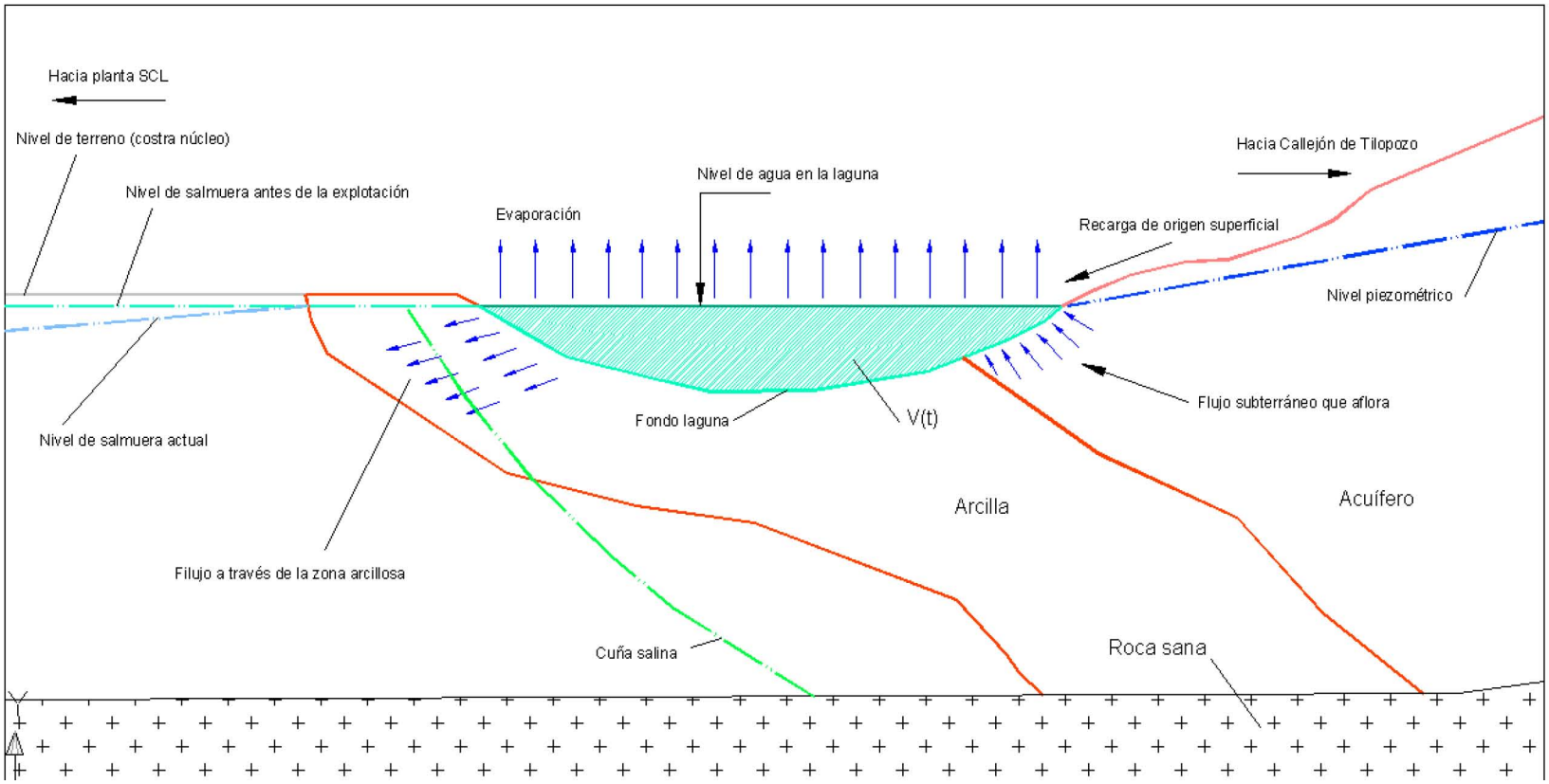
Figura 3. Modelo hídrico a nivel de cuenca



Fuente: GCF Consultores

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 4. Modelo hídrico de lagunas



Fuente: GCF Consultores

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1.6. Cálculo de volumen de agua de lagunas

1.6.1 Superficie cubierta por lagunas

Se cuenta con 6 imágenes Landstat (Landsat 5 TM y Landsat 7 + ETM), correspondientes a 6 fechas distintas, entre 1985 y 2008. Todas tienen resolución 30 m y cubren el área de las Lagunas La Punta y Brava. En la Tabla 3 se detallan las fechas y las superficies de agua medidas en cada imagen.

Tabla 3. Imágenes Landsat y superficies de lagunas [Ha][§]

Fecha	La Punta y La Brava	Imagen
30-03-1985	156.65	Landsat 5 TM
24-02-1990	76.60	Landsat 5 TM
02-05-1997	455.64	Landsat 5 TM
31-03-2000	95.37	Landsat 7 +ETM
21-03-2002	148.50	Landsat 7 +ETM
14-04-2008	99.87	Landsat 7 +ETM

En los Gráfico 1 se muestran las lluvias mensuales (eje vertical izquierda) de las estaciones Peine, Socaire y Planta SCL (disponibles sólo de 1997 en adelante), con las áreas de lagunas medidas (eje vertical derecha).

Comparando las lluvias y las superficies de lagunas, se aprecia que en mayo de 1997 se registró una enorme área húmeda. Esa área es el triple de la correspondiente a 2002; sin embargo, las lluvias previas son semejantes. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los datos para comparar ambos escenarios.

Tabla 4. Resumen de datos

Lluvias mensuales [mm]	1997 Ene-Abr	2002 Ene-Abr
Planta SCL	29.0	23.0
Peine	21.0	69.5
Socaire	51.5	29.0
Áreas de lagunas [Ha]	02/05/1997	21/03/2002

[§] La identificación de los cuerpos de agua fue realizada por G. Fuenzalida de GAC, según la metodología descrita por Frazier y Page (Frazier, P. S. and Page, K. J. 2000. Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 66(12): 1461-1467). Se seleccionaron los pixeles dentro del rango 2 a 47 de la Banda 5 Infrarrojo Medio. Para el análisis de imágenes se usó el programa ArcGIS 9.2.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Área laguna La Punta y Brava	455.64	148.50

Lo anterior se podría explicar por dos probables causas. La primera es la fecha de cada imagen, la de 1997 es aproximadamente 45 días posterior a la última lluvia de ese período; en cambio la de 2002, fue tomada una par de días, finalizadas las precipitaciones. Ese desfase pudo posibilitar flujos de recarga desde puntos más lejanos de la cuenca, incrementando las áreas inundadas.

El segundo factor, relacionado con el primero, es la posibilidad de que haya llovido más a una mayor altura el año 1997, con respecto al año 2002, lo que es confirmado por los 51.5 mm registrados en Socaire, frente a 29 mm de Peine. En 2002, ocurrió a la inversa, es decir, llovió más en Peine que en Socaire, que está a mayor elevación (791 m por sobre Peine). La mayor cantidad de lluvia, a elevaciones superiores, pudo originar incrementos en las recargas, pero desfasados en el tiempo.

La interpretación anterior podría confirmarse, en cierta medida, si se contara con imágenes satelitales más seguidas, pero lamentablemente sólo existen unas pocas fechas por año.

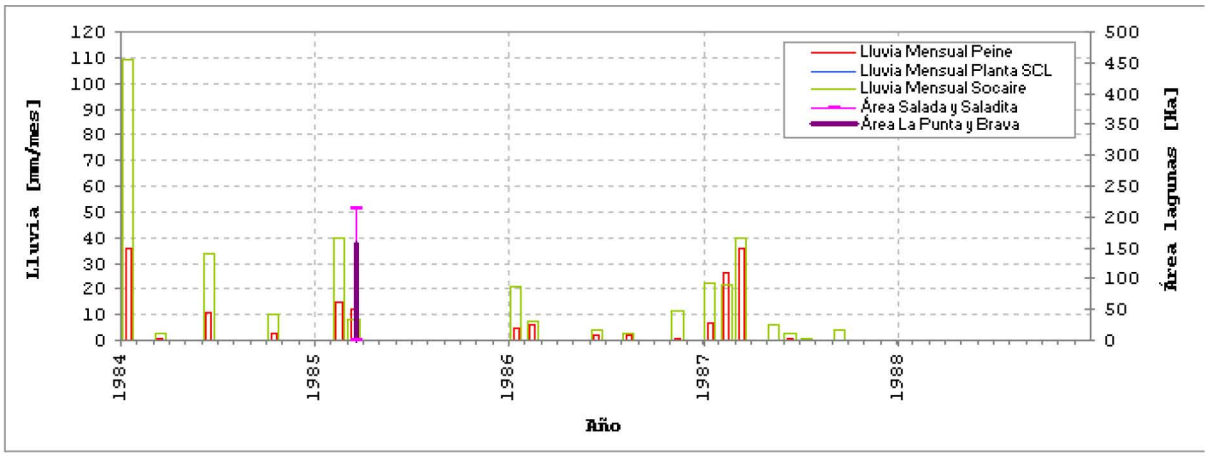
Se cuenta con datos de profundidad de las lagunas a través del tiempo, medidos en 6 puntos. Esos registros se obtuvieron en la Corema y son proporcionados anualmente por la empresa Barrick, como parte de sus labores de monitoreo. Son aproximadamente 160 meses de mediciones desde 1997 a la fecha y la mayor desviación estándar de los datos es de 3 cm (ver Gráfico 8).

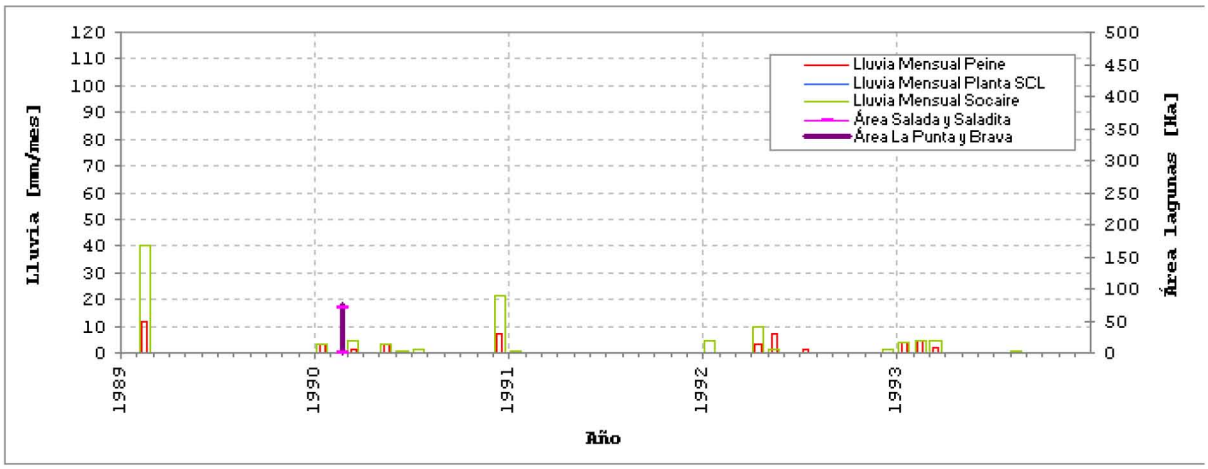
Lo reducido del rango en el que varían las mediciones mensuales de las profundidades de las lagunas, estaría indicando que los aumentos de superficie se materializarían a través de láminas de agua muy someras (de algunos centímetros). Probablemente, las lagunas con mayor profundidad y que almacenan más agua, permanecen relativamente estables y las áreas periféricas a éstas, se humedecen, si las condiciones hidrológicas de un período en particular, lo permiten.

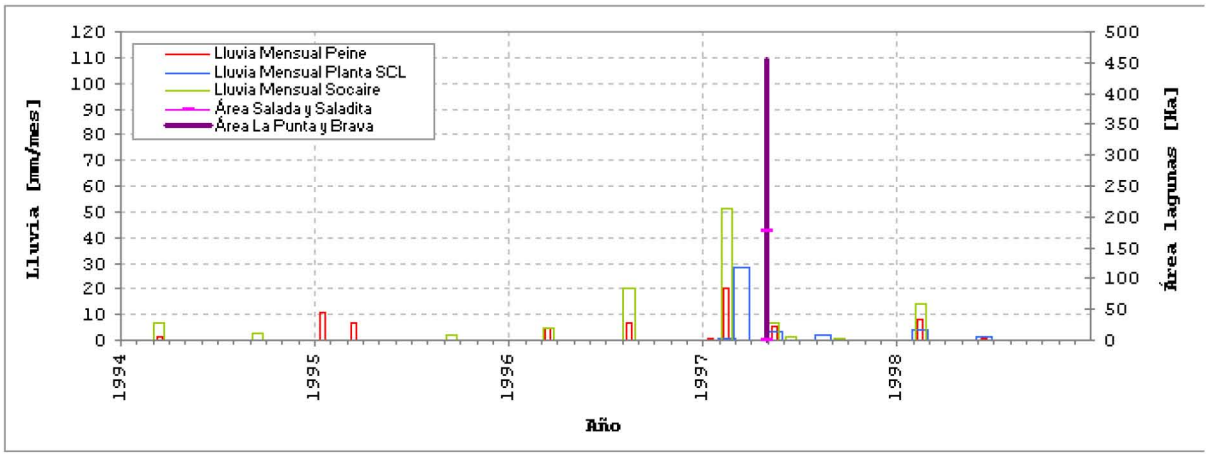
Comparando los datos de profundidades y las áreas mojadas de las imágenes Landsat, no se advierte una correspondencia directa entre profundidad y superficie, lo que se podría interpretar de manera semejante a lo expuesto en el párrafo anterior, es decir, en los períodos húmedos aumenta la cobertura somera de lagunas, más que la cantidad de agua en las lagunas más profundas y estables.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Gráfico 6

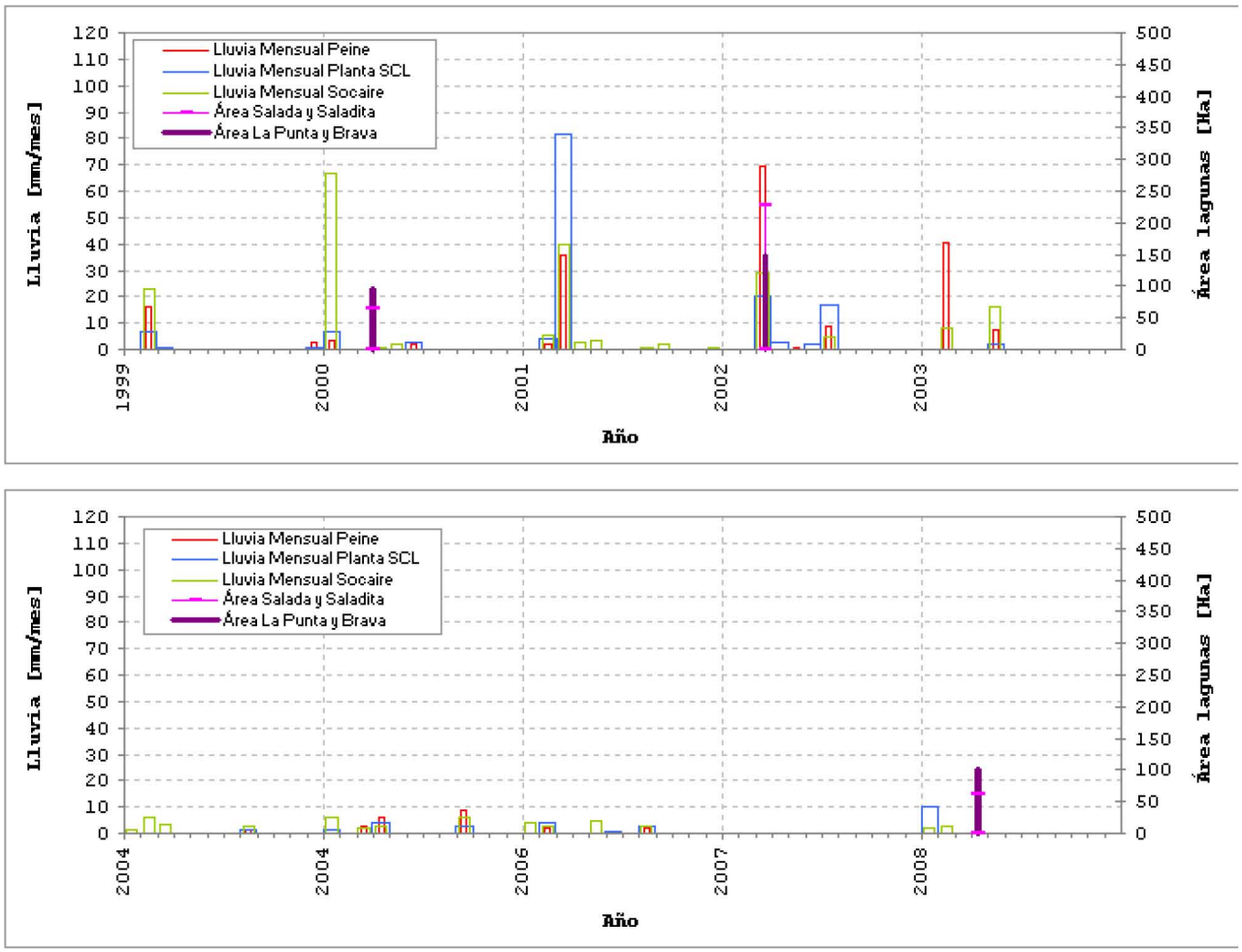






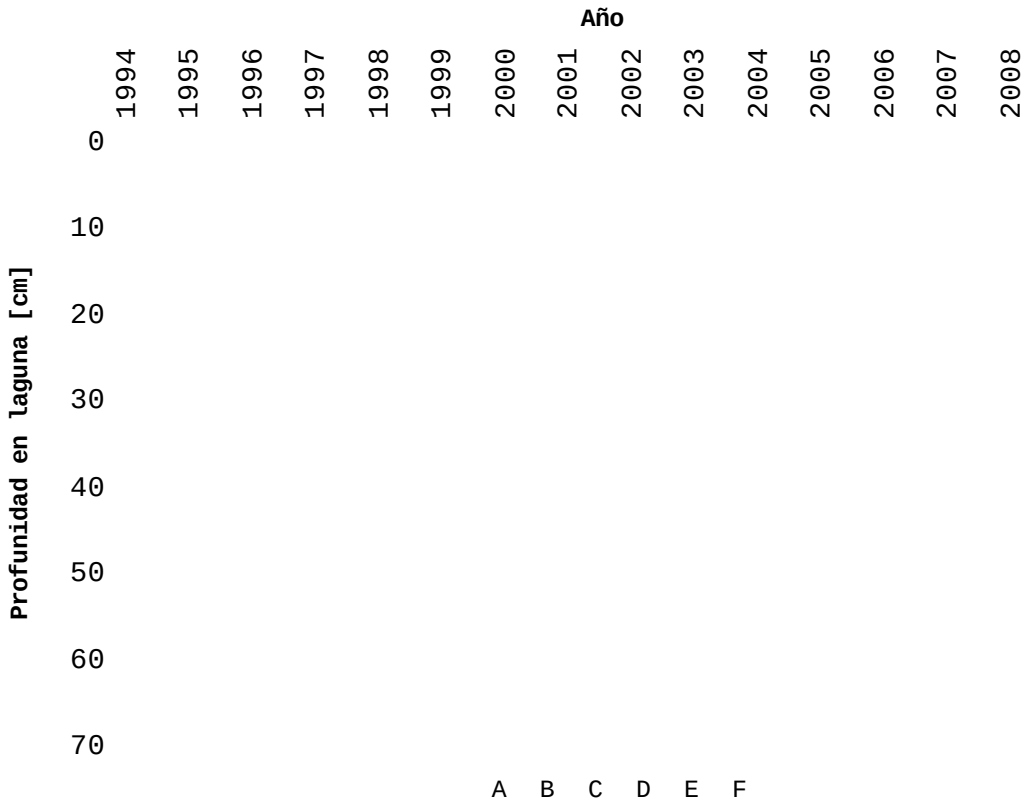
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Gráfico 7



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Gráfico 8



1.6.2 Volúmenes almacenados en las lagunas

Combinando las áreas y los contornos de las lagunas, obtenidas de las imágenes Landsat, y los datos de profundidades del Gráfico 7, se realizó un cálculo muy aproximado de los volúmenes almacenados en las lagunas La Punta y La Brava.

Se debe tener en cuenta que el cálculo sólo pretende fijar órdenes de magnitud de la relación superficie-volumen de las lagunas; de ninguna forma se busca obtener un resultado concluyente, lo que no sería posible, considerando que se está calculando un volumen de una zona irregular con un contorno y con las profundidades en tan sólo 6 puntos.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

No obstante, se procuró utilizar toda la información cualitativa disponible para realizar la mejor estimación posible, con los datos con los que se cuenta.

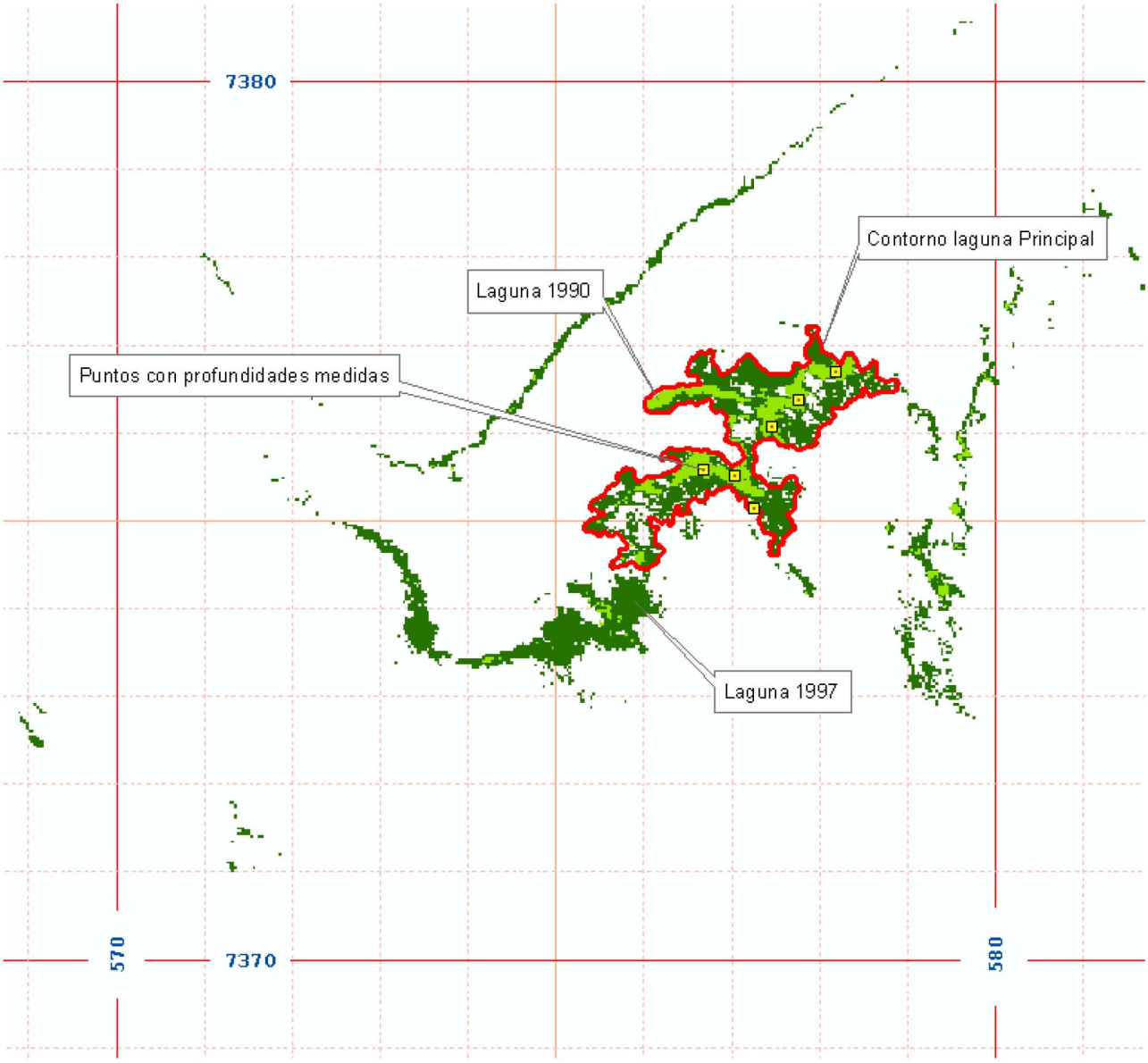
El procedimiento empleado fue el siguiente:

Se definió una envolvente para la laguna principal (ver figura), se dibujaron algunas curvas de isoprofundidad para las imágenes de 1990 y 1997 (mínima y máxima superficie, respectivamente) dentro de ese contorno. Con los límites de las lagunas identificadas en las imágenes satelitales (isoprofundidad=0 m) y las profundidades registradas en los puntos del Gráfico 7,Gráfico 8 se trazaron curvas de isoprofundidad dentro de la envolvente adoptada y denominada "laguna principal".

Para el año 1990 se adoptaron valores de alturas mínimos; puesto que las alturas no presentan una dispersión muy baja, esta aproximación es razonable.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

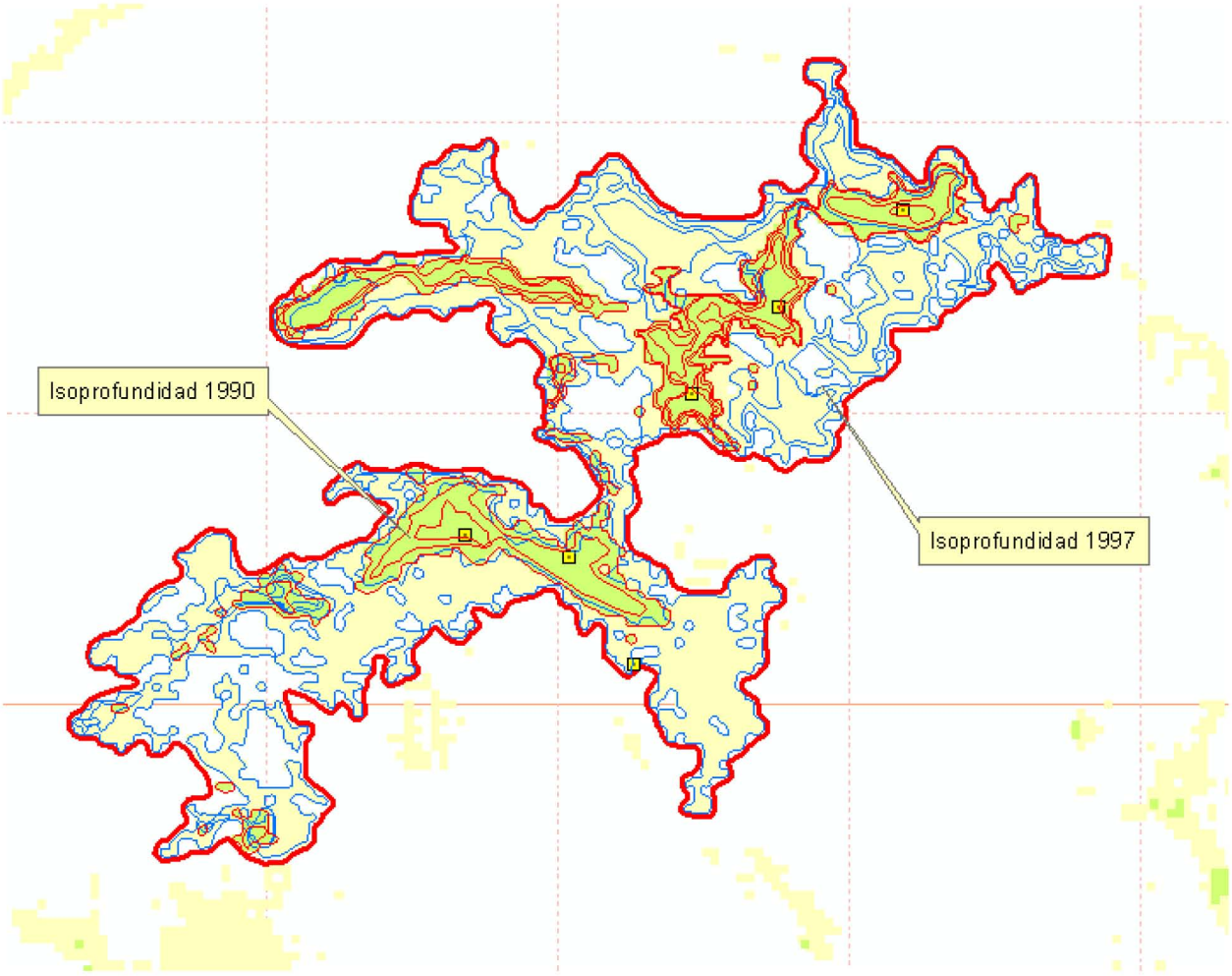
Figura 5. Laguna principal y zonas húmedas en 1990 y 1997



Con las curvas de isoprofundidad trazadas, se calcularon los volúmenes de agua en ambos instantes (1990 y 1997) y con esos valores se interpolaron el resto de las fechas analizadas con las imágenes satelitales. En los Gráficos Gráfico **1** yGráfico **2** se muestran los resultados; las áreas fueron ordenadas de manera creciente (no por fecha).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 6. Curvas de isoprofundidad



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Gráfico 9. Áreas de espejos de agua de lagunas La Punta y Brava

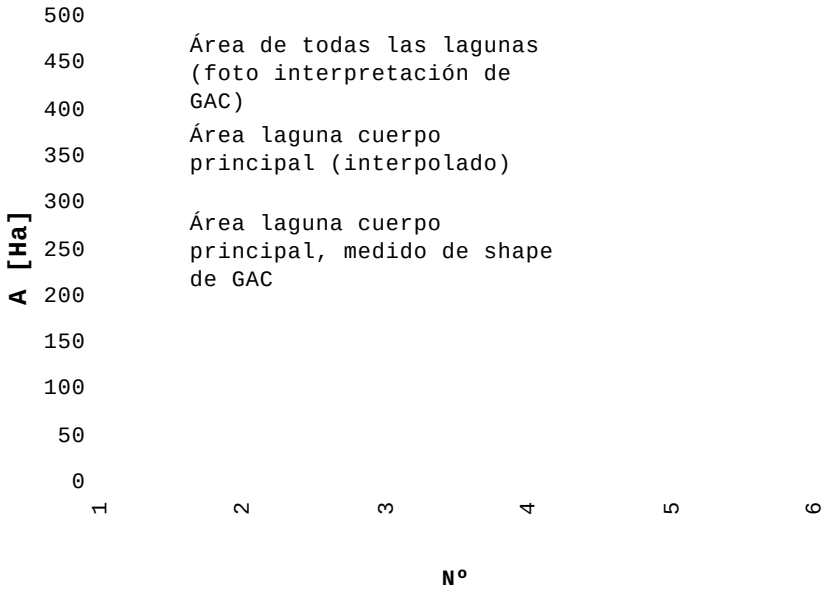
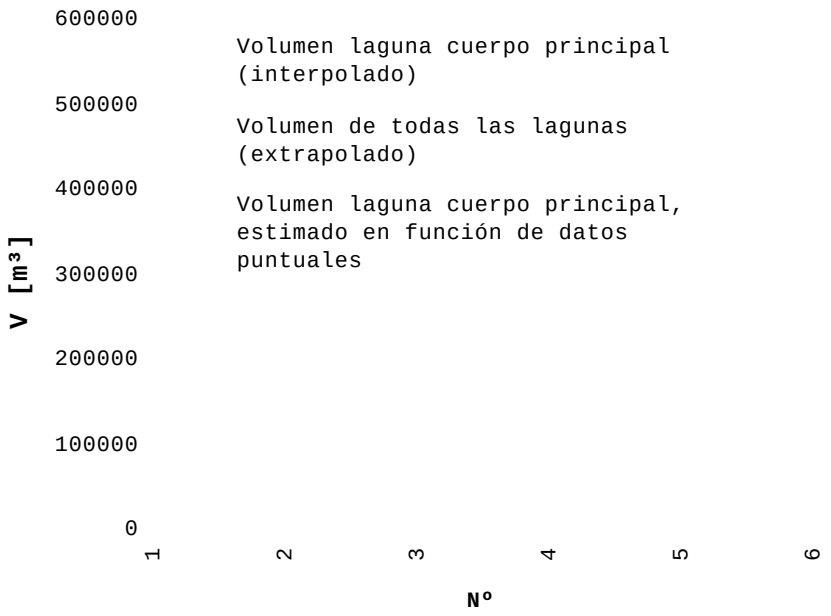


Gráfico 10. Volúmenes de agua de lagunas La Punta y Brava



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Como se puede apreciar en los gráficos, la relación entre superficie máxima y mínima de todos los cuerpos de agua es aproximadamente 6. En cambio, al obtener los volúmenes del cuerpo de agua principal, esa relación se reduce a 3.5.

1.6.3 Volúmenes de las lagunas en función del tiempo

Se intentó obtener una dependencia funcional sencilla entre los volúmenes de agua almacenados en las lagunas y las lluvias. La relación es la siguiente:

$$V(t)=a\cdot u^2+b\cdot u+c$$

$$u(t)=d\cdot PS_{1j}+e\cdot PS_{2j}+f\cdot PS_{3j}+g\cdot D(t)$$

Donde:

a, b, c, d, e, f, y g son coeficientes experimentales

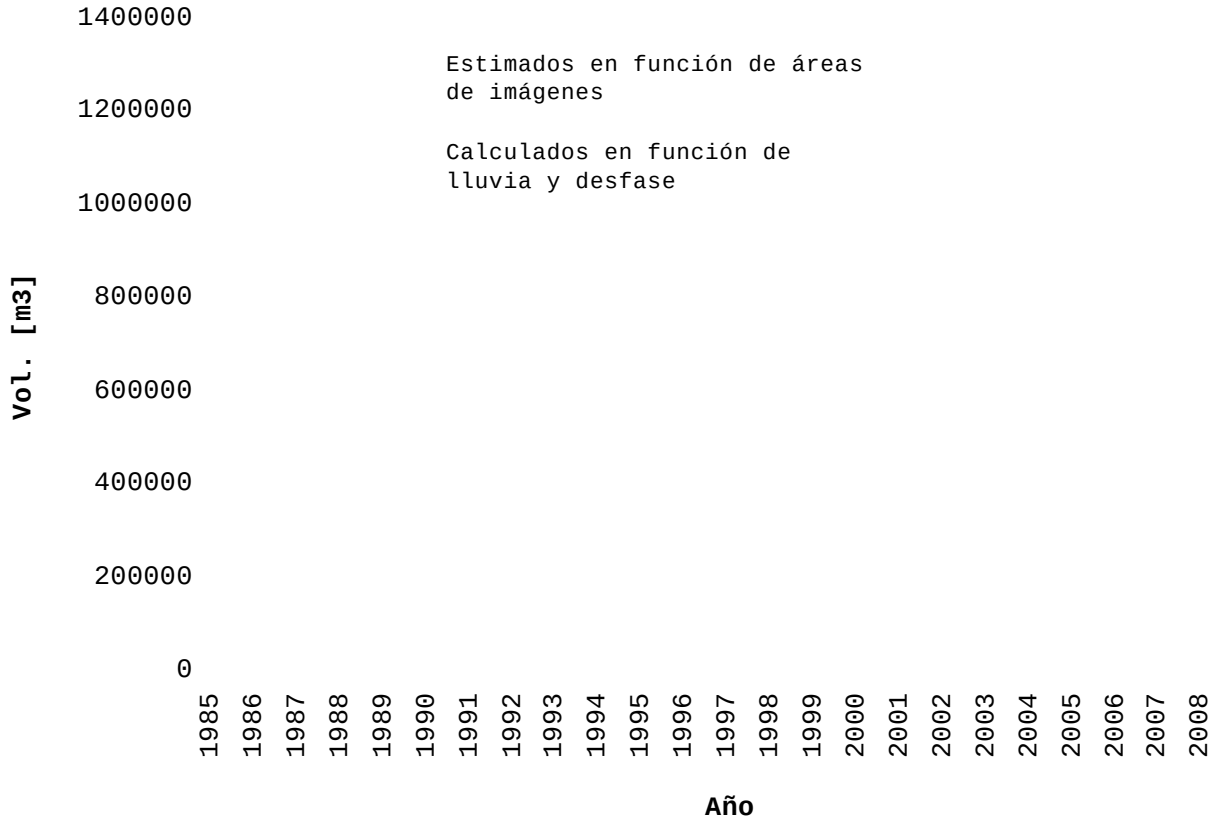
u(t): función auxiliar

PS_{ij}: lluvia en el mes i del año j en la estación Socaire

D(t): desfase en días entre t y el 20 de febrero (fecha arbitraria de referencia)

En el Gráfico 10 se muestran los volúmenes de lagunas a través del tiempo generados con la función antes descrita. Si bien los valores calculados con la función antes definida calzan muy bien con los valores estimados en función de las imágenes satelitales, no es posible asumir que la función es válida para rellenar una estadística temporal. Sí se puede utilizar para obtener órdenes de magnitud de los volúmenes almacenados a través del tiempo, especialmente hasta 500.000 m^3.

Gráfico 11. Volúmenes de agua almacenados en lagunas calculados en función de la lluvia



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

ANEXO 1

Registros de lluvias

Mensuales medidas

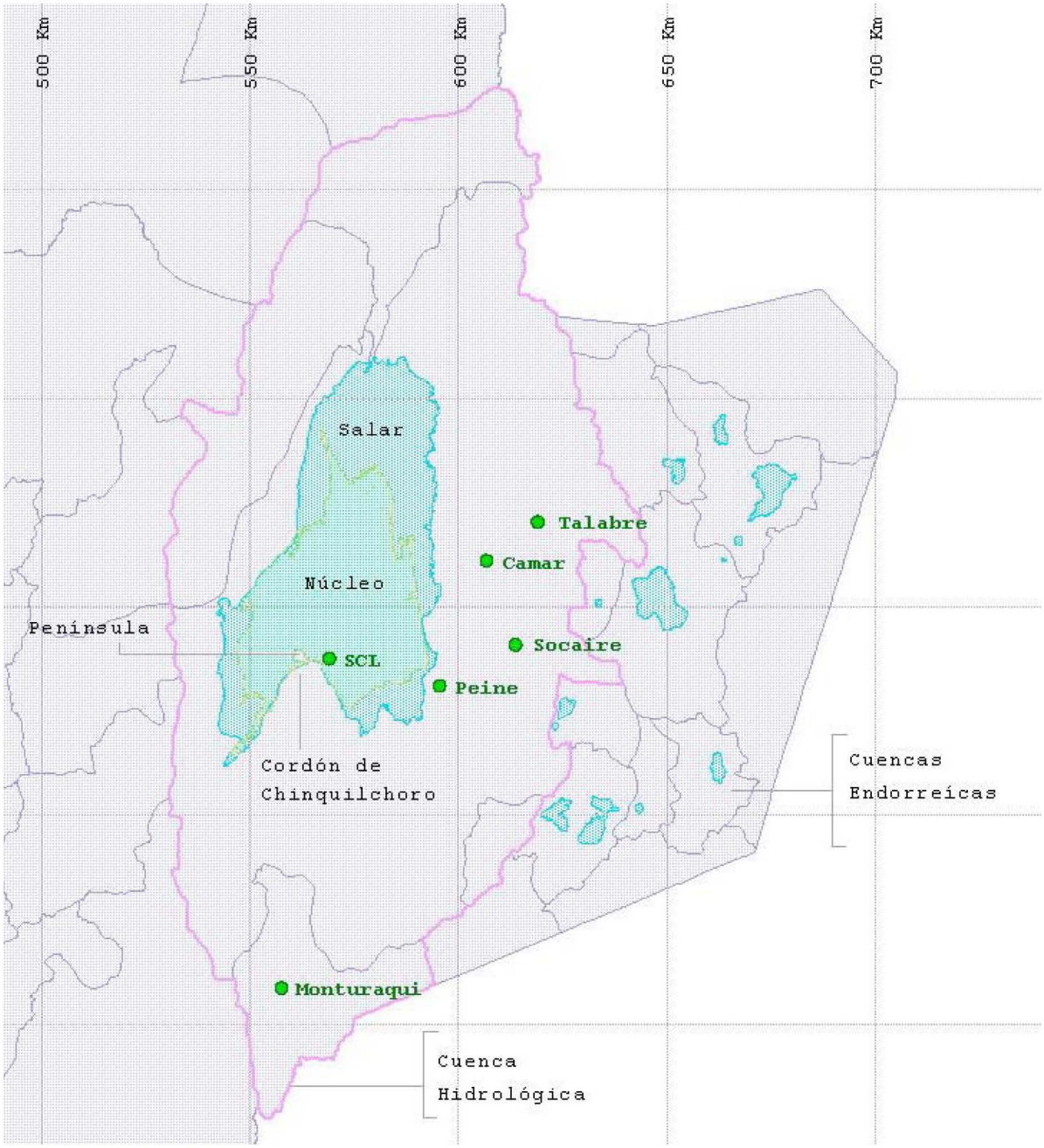
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

A1 REGISTROS DE LLUVIAS MENSUALES MEDIDAS

En las tablas Tabla 1 a Tabla 5 se presentan las estadísticas de precipitaciones mensuales medidas en las estaciones Camar, Socaire, Peine, Talabre, Monturaqui y Planta SCL. Los datos fueron obtenidos en la D.G.A., excepto los de la estación Planta SCL, proporcionados por SCL. En la Figura 1se muestran las ubicaciones de las estaciones pluviométricas existentes en la zona de estudio.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 1. Estaciones pluviométricas



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Tabla 1. Precipitaciones mensuales medidas en la estación Camar

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1979	8.0	0.0	7.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0
1980	0.0	4.0	9.0	0.0	2.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0
1981	0.0	94.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	10.5
1983	0.0	4.0	0.0	0.0	5.0	65.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.0
1984	93.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	125.0
1985	0.0	15.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.0
1986	29.0	12.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	2.0	0.0	0.0	7.5	0.0	60.5
1987	14.0	15.1	27.5	0.0	2.5	1.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	60.9
1988	3.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1
1989	0.0	40.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.5
1990	1.0	0.0	1.0	0.0	2.0	0.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.5	25.5
1991	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
1992	1.1	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	8.1
1993	2.0	6.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.1
1994	0.0	0.0	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	12.4
1995	22.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.5
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0
1997	1.0	51.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.5
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
1999	0.0	18.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	25.5
2000	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.9
2001	0.0	16.0	82.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.5
2002	0.0	0.1	58.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.8
2003	0.0	7.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0
2004	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0
2005	23.5	0.0	1.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	33.0
2006	6.0	7.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	13.4
2007	0.6	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	
2008	1.2	4.0	0.0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
promedio	8.2	10.1	8.3	0.2	0.9	3.9	0.1	1.0	0.6	0.0	0.3	0.8	36.0

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Tabla 2. Precipitaciones mensuales medidas en la estación Socaire

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1974	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1975	55.5	12.5	29.1	0.0	21.5	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	128.1
1976	35.9	2.0	3.0	0.0	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.8
1977	13.0	51.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.0
1978	3.0	36.5	1.5	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.5
1979	14.0	0.0	11.5	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.5
1980	-----	-----	-----	2.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1981	0.0		8.5	12.0	0.0	0.0	0.0	5.0	4.0	0.0	0.0	0.0	
1982	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	5.0	19.1
1983	0.0	1.5	0.0	4.5	14.5	28.5	8.0	0.0	3.0	0.0	0.0	2.0	62.0
1984	109.5	0.0	3.0	0.0	0.0	33.4	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	155.9
1985	0.0	40.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0
1986	21.0	7.5	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	2.4	0.0	0.0	11.7	0.0	46.6
1987	22.0	21.7	39.5	0.0	6.0	3.0	1.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	97.2
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	0.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0
1990	3.0	0.0	4.5	0.0	3.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.1	33.1
1991	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
1992	4.5	0.0	0.0	9.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	16.5
1993	4.0	4.5	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8
1994	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	10.0
1995	-----	-----	-----	-----	-----	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	
1996	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.5
1997	0.0	51.5	0.0	0.0	7.0	1.5	0.0	0.0	0.5	0.0	-----	0.0	
1998	0.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0
1999	0.0	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.0
2000	67.0	0.0	0.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.0
2001	0.0	5.5	39.5	3.0	3.5	0.0	0.0	0.5	2.0	0.0	0.0	1.0	55.0
2002	0.0	0.0	29.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.0

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

2003	0.0	8.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0
2004	1.5	6.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5
2005	6.0	0.0	2.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	17.0
2006	4.0	3.0	0.0	0.0	4.7	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2
2007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2008	2.3	2.5		0.0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
promedio	11.5	10.7	6.5	1.3	2.7	3.0	0.5	1.0	1.0	0.3	0.4	0.9	40.0

Nota: texto en rojo indica más de 20 días con información en el mes

Tabla 3. Precipitaciones mensuales medidas en la estación Peine

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1974											0.0	0.0	
1975	10.5	2.0	0.0	0.0	7.0	2.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	24.0
1976	13.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0
1977	0.0	5.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5
1978	0.0	39.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0
1979	1.0	0.0	8.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0
1980	0.0	0.0	19.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.5
1981	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	3.0	2.5	0.0	0.0	0.0	11.5
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	6.0
1983	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	24.0	8.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	40.5
1984	35.5	0.0	1.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	50.0
1985	0.0	15.1	12.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.2
1986	4.5	6.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	15.5
1987	6.5	26.0	36.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	69.5
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0
1990	3.1	0.0	1.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	14.1
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-----	-----	-----	-----	-----	
1992	0.0	0.0	0.0	3.0	7.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0
1993	4.0	4.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5
1994	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1995	10.5	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.5
1996	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5
1997	1.0	20.0	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.5
1998	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-----	0.0	0.0	
1999	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	18.5
2000	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5
2001	0.0	2.0	35.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5
2002	0.0	0.0	69.5	0.0	1.0	0.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.0
2003	0.0	40.5	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.0
2004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
2005	0.0	0.0	3.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	0.0	0.0	0.0	17.5
2006	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0
2007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2008	0.0	0.0	0.0	0.0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
promedio	2.7	5.9	5.9	0.5	1.2	1.7	0.5	0.5	0.6	0.1	0.0	0.3	21.3

Nota: texto en rojo indica más de 20 días con información en el mes, es decir, en aquel mes se registró la lamina de lluvia en a lo menos 20 días.

Tabla 4. Precipitaciones mensuales medidas en la estación Talabre

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1995	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	
1996	0.0	1.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	42.0	0.5	0.0	0.0	0.0	48.0
1997	0.0	55.0	19.0	0.0	4.5	0.0	0.0	1.5	2.0	0.0	0.0	0.0	82.0
1998	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0
1999	0.0	8.0	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	38.0
2000	91.5	0.0	3.0	6.0	10.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	112.5
2001	7.5	53.5	96.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	161.0
2002	0.0	6.0	79.0	0.0	3.0	1.0	9.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	99.0
2003		30.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2004	18.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	41.5
2005	40.7	1.0	2.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	58.7
2006	0.0	19.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	23.5
2007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2008	35.0	5.0	0.0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	

Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

promedio	16.1	15.9	17.8	1.3	3.6	0.5	0.8	3.5	0.9	0.1	0.0	0.2	61.2

Nota: texto en rojo indica más de 20 días con información en el mes

Tabla 5 Precipitaciones mensuales medidas en la estación Monturaqui

año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1974	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0	0.0	
1975	83.0	7.5	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.5
1976	103.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	103.0
1977	6.0	20.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.0
1978	0.0	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.0
1979	11.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0
promedio	40.6	12.1	4.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.8

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Tabla 6. Precipitaciones anuales medidas en estación Planta SCL

AÑO	MES	DIAS	Lluvia [mm]
1990	Enero a Diciembre		2.78
1991	Enero a Diciembre		7.73
1992	Enero a Diciembre		6.42
1993	Enero a Diciembre		0.44
1994	Enero a Diciembre		0.48
1995	Enero a Diciembre		2.87
1996	Enero a Diciembre		9.93
	Febrero	23	1.00
1997	Marzo	3, 4, 5 y 6	28.00
	Mayo	11	3.30
	Agosto	15	2.20
1998	Febrero	9	4.00
	Junio	26	1.50
	Febrero		7.00
1999	Marzo	13 y 30	1.00
	Diciembre		0.50
2000	Enero	21, 22, 23 Y 27	6.50
	Junio	2	2.90
2001	Febrero	27 y 28	4.20
	Marzo	1, 2, 3, 14 y 21	81.70
	Marzo		20.00
2002	Abril		3.00
	Junio		2.00
	Julio		17.00
2003	Mayo		2.00
2004	Agosto	10	1.50
	Enero	14	1.50
2005	Abril	24	4.00
	Septiembre	14	3.00
	Febrero		4.00
2006	Junio		0.60
	Agosto		3.00
2007	Enero a Diciembre		0.00
2008	Enero	14	10.00

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

ANEXO 2

Gráficos de niveles de salmuera y Agua dulce medidos por SCL

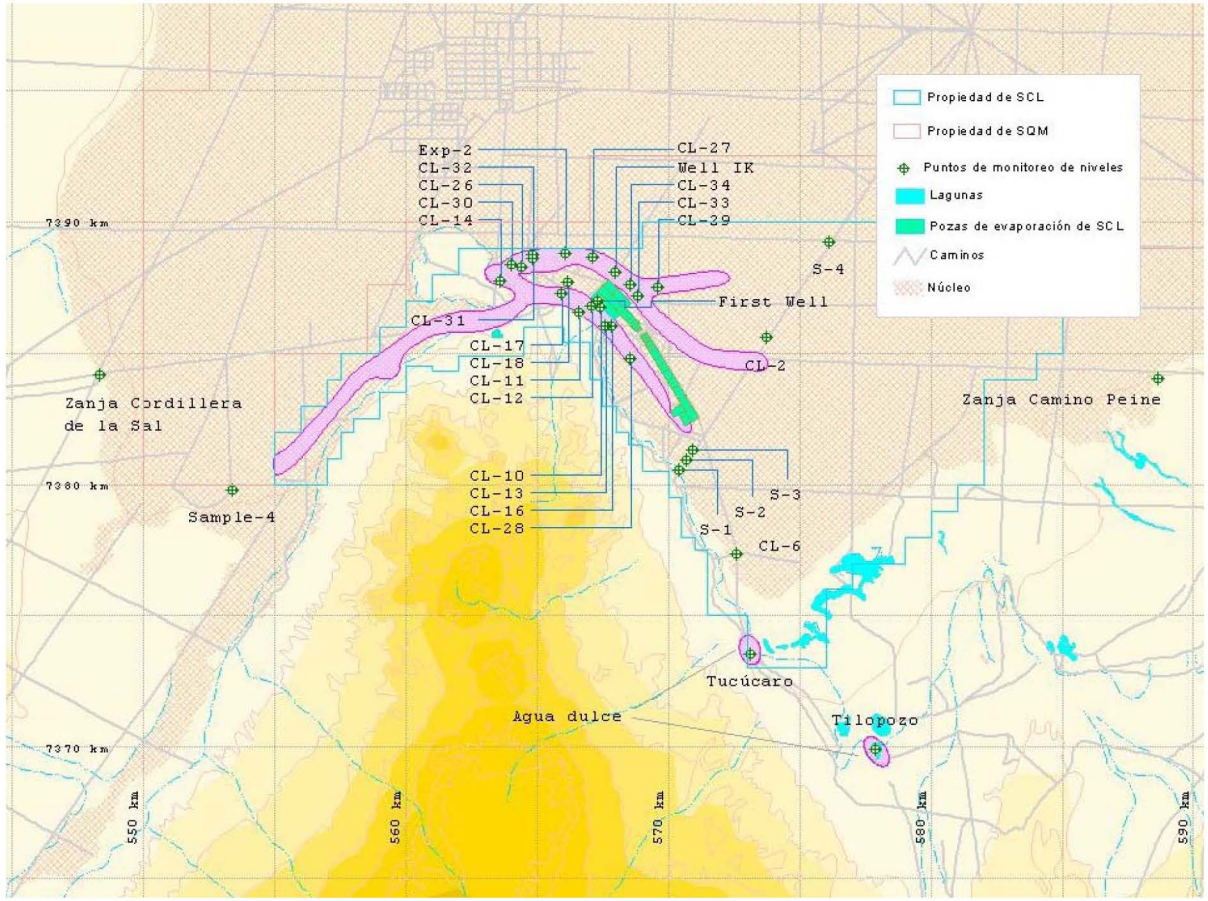
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

ANEXO 2

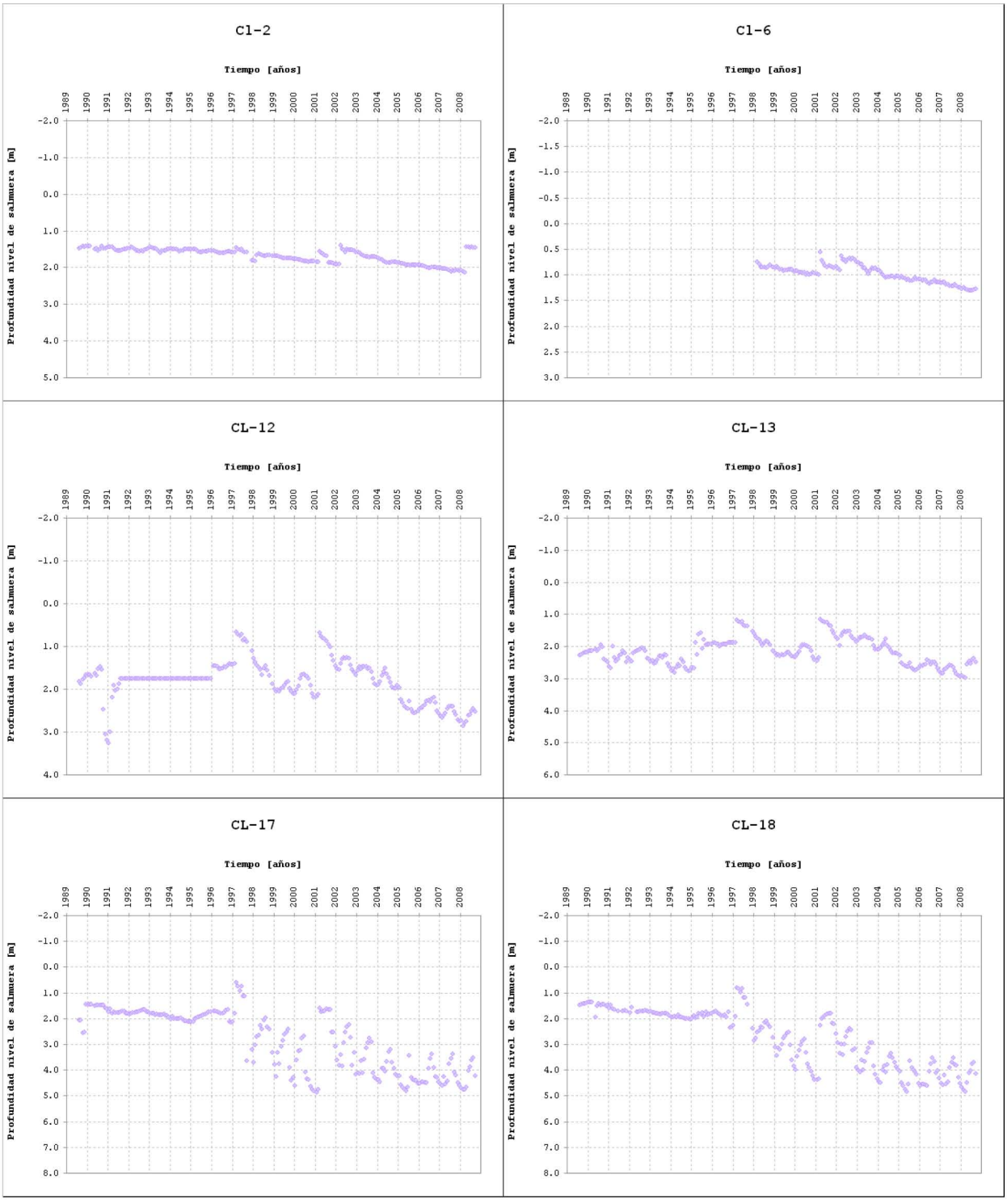
En este anexo se han incluido los gráficos con las mediciones mensuales de niveles de salmuera. Las lecturas corresponden a profundidades de salmuera referidas al nivel de terreno (costra).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

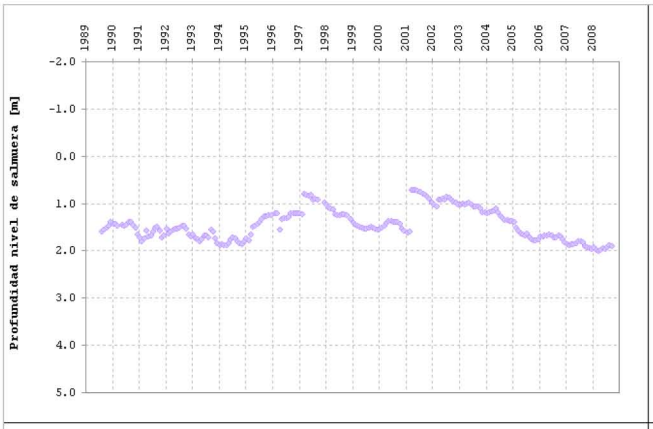
Figura 1. Ubicación de pozos de monitoreo de niveles de salmuera y agua dulce

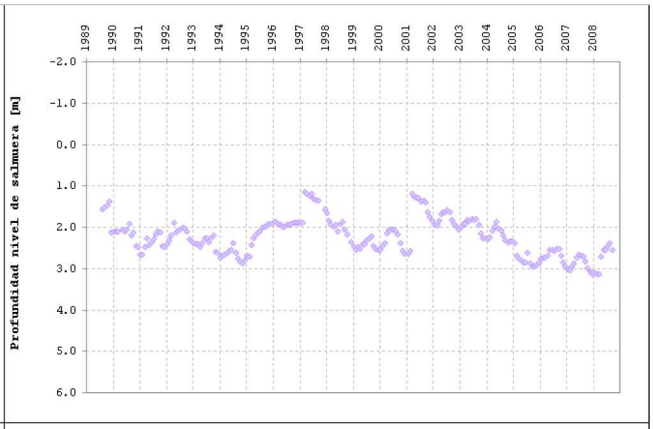


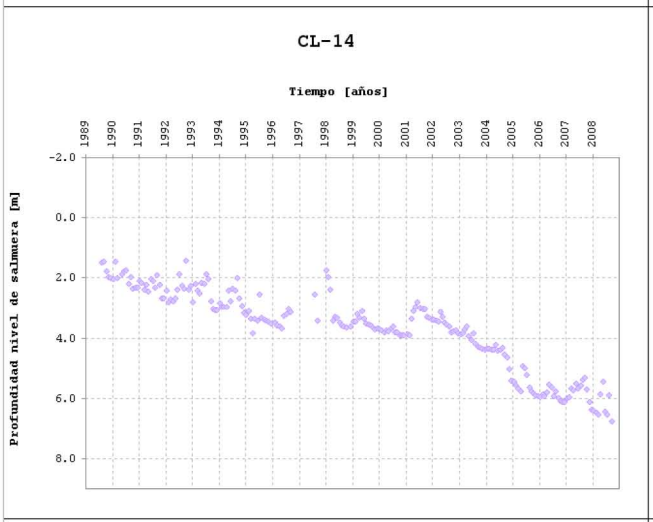
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

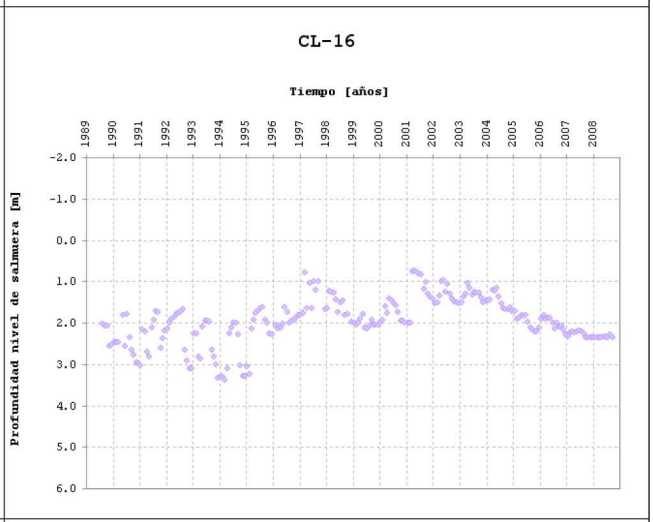


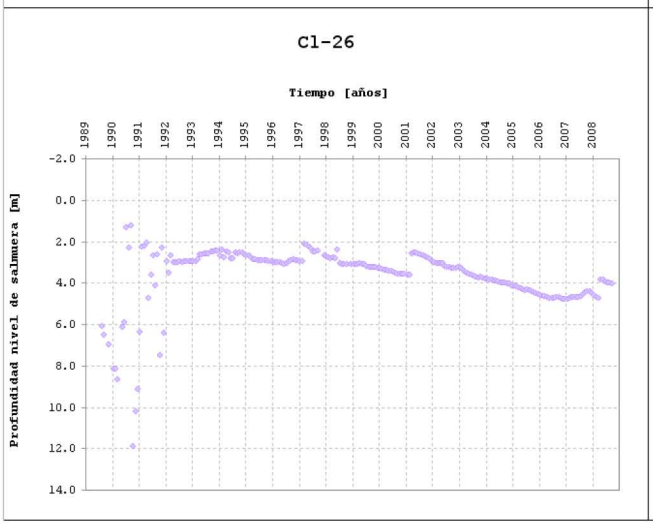
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

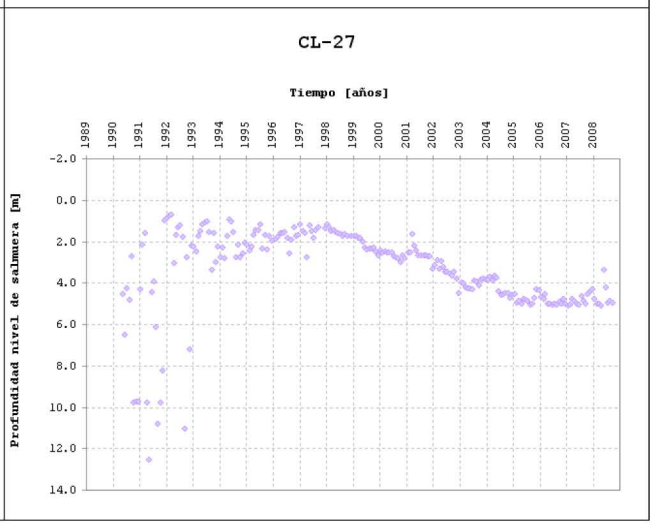




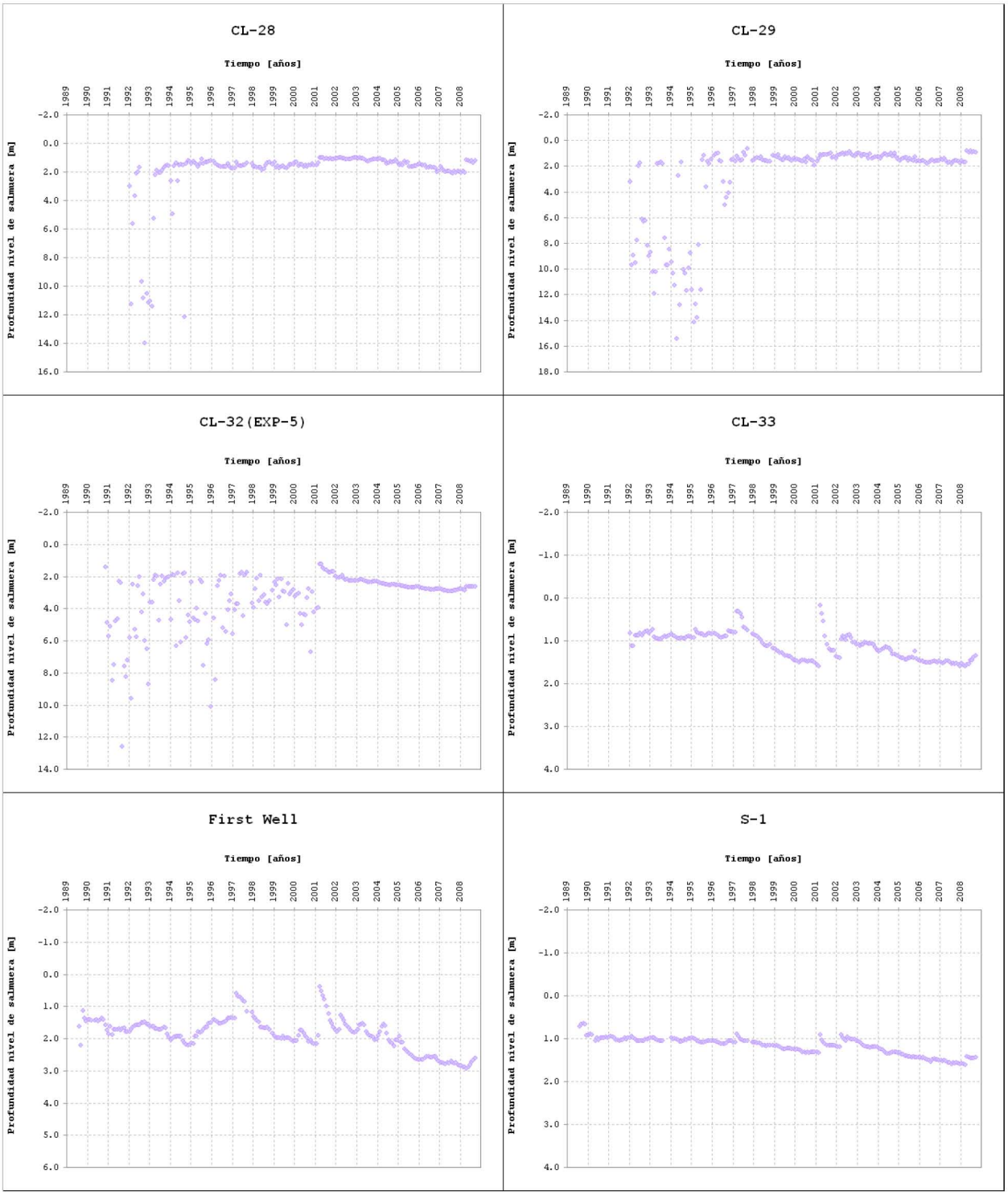




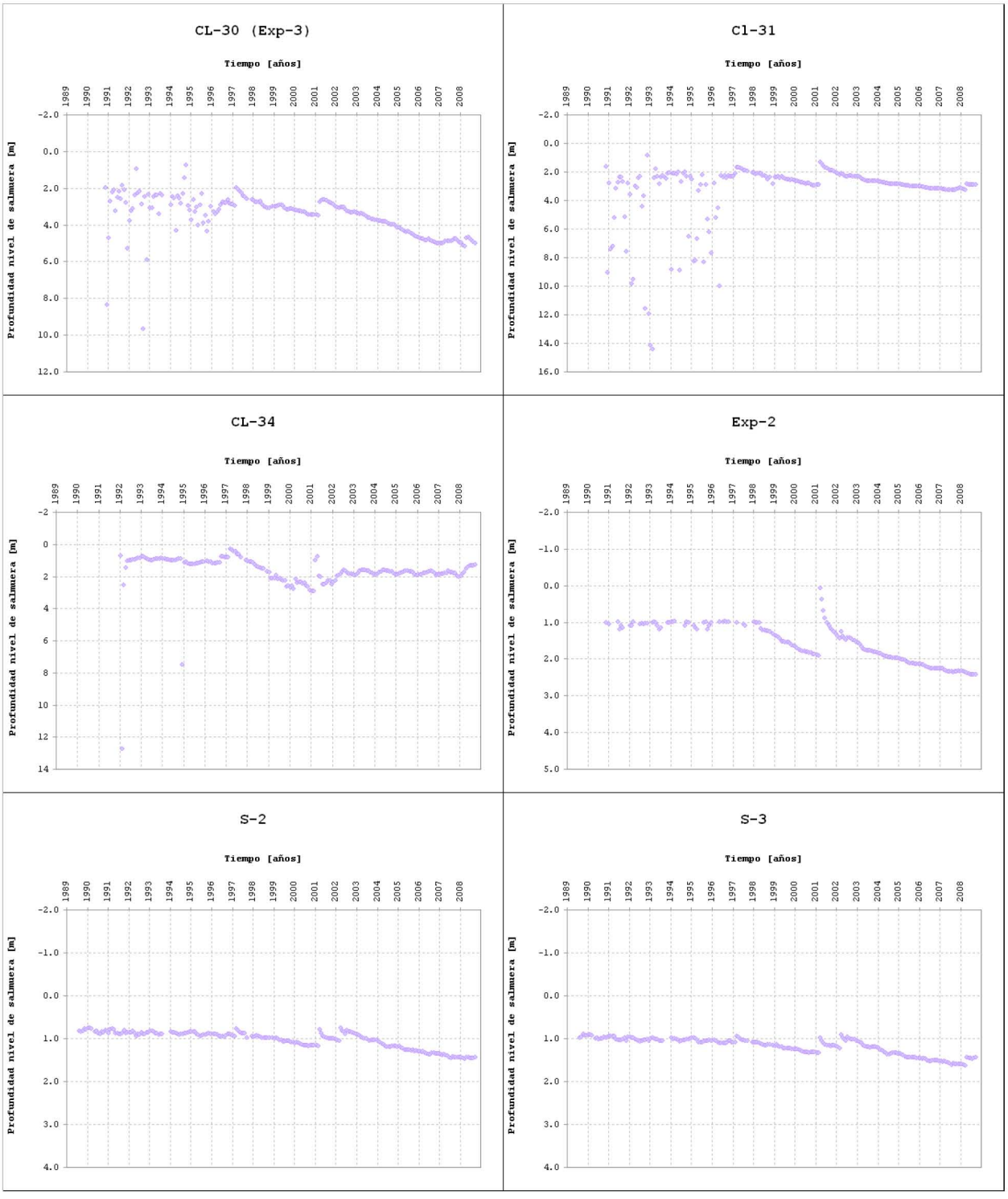




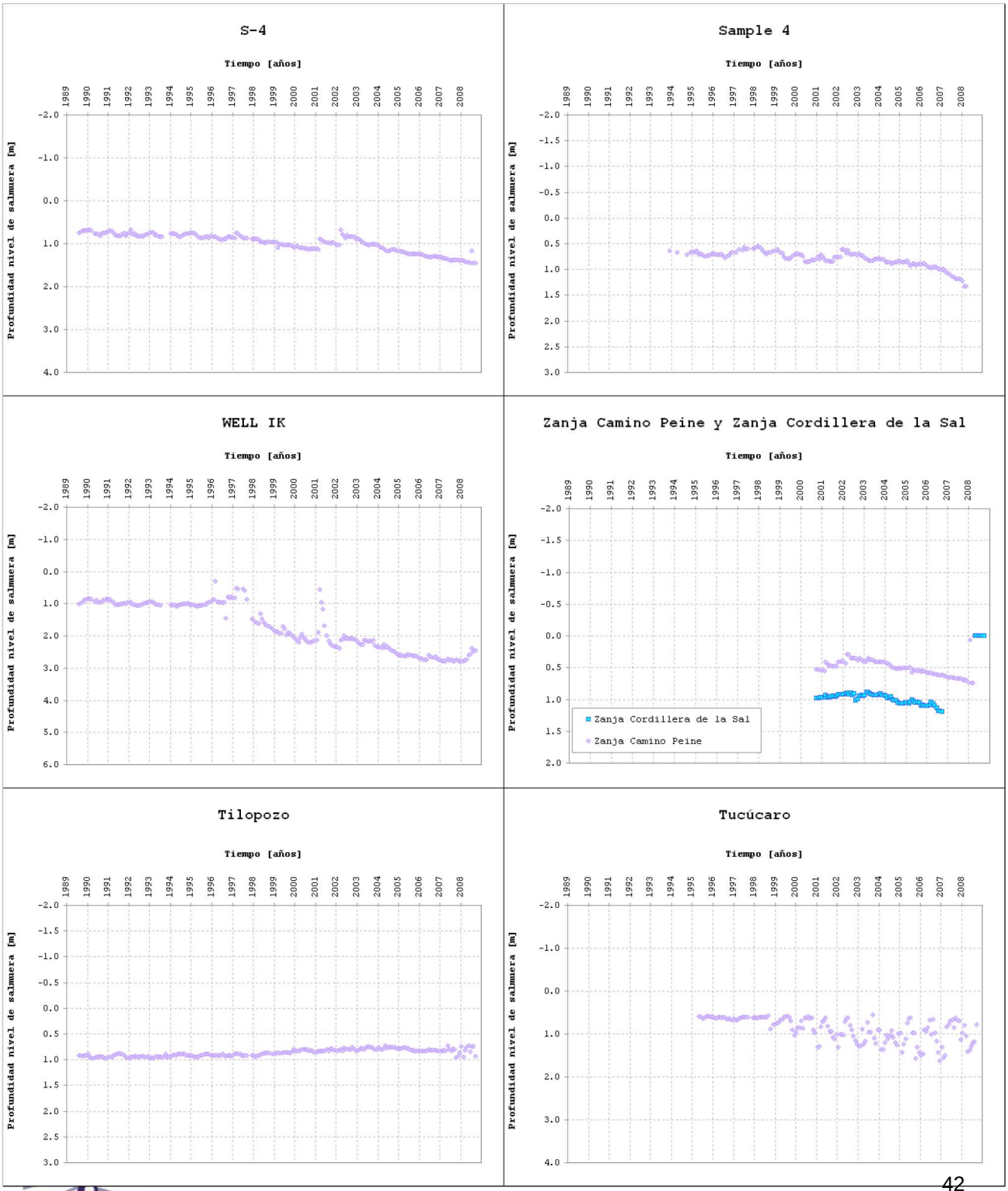
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Anexo 5.4

Fauna:

Situación del Flamenco Altoandino

Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

ÍNDICE

1. SITUACION DEL FLAMENCO ALTOANDINO 1

1.1. Antecedentes Generales 1

2. BIOLOGÍA DEL FLAMENCO ALTOANDINO 2

2.1. Taxonomía, Morfología e Identificación 2
2.2. Etología, Reproducción y Alimentación 3
2.2.1 Etología 3
2.2.2 Reproducción 4
2.2.3 Alimentación 9
2.3. Amenazas a la población y Estado de Conservación 10
2.3.1 Amenazas 10
2.3.2 Estado de Conservación 10
2.3.2.1 Legislación 10
2.3.2.2 Categoría de Conservación 11

3. ECOLOGÍA DEL FLAMENCO ALTOANDINO 12

3.1. Hábitat 12
3.2. Distribución 12
3.3. Abundancia 14
3.3.1 Abundancia en el Salar de Atacama 14
3.3.2 Abundancia Sistema Hidrológico Peine 21

4. CONCLUSIONES 24

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1. SITUACION DEL FLAMENCO ALTOANDINO

1.1. Antecedentes Generales

Los flamencos son aves del orden de los Ciconiformes, caracterizados por sus patas y cuellos de extensa longitud, y de distintivos colores rosáceos. Existen en el mundo 5 especies de flamencos de las cuales 3 existen en nuestro territorio, sin embargo, son de particular mención, dos especies endémicas de hábitat altoandinos; *Phoenicoparrus andinus* (parina grande) y *Phoenicoparrus jamesi* (parina chica) (Caziani et al, 2007)[1]. Ambas, conviven con una tercera especie de flamenco *Phoenicopterus chilensis* (flamenco chileno) en gran parte de su distribución.

P. andinus y *P. jamesi*, son habitantes exclusivos de salares y lagunas salinas del prealtiplano y altiplano del Norte de Chile, Perú, Bolivia y Argentina mientras que *P. chilensis* utiliza además ambientes de costas marinas, distribuyéndose a lo largo de todo el país (Parada, 1990)[2].

Estas aves de gran tamaño características del Norte de Chile, son especies carismáticas y de atractivo turístico, que han sufrido una importante merma poblacional a partir de las actividades antropocéntricas, con fines culturales como económicos. Es por ello que actualmente y de acuerdo a la Ley de caza 19.473 y su reglamento (SAG, 2004), las tres especies de flamencos están catalogadas como especies de densidades poblacionales reducidas, benéficas para la mantención del equilibrio de los ecosistemas naturales y de estado de conservación Vulnerable. Se clasifican con el mismo estado de conservación según el Libro Rojo de la Fauna de Vertebrados Terrestres de Chile (Glade, 1993)[3].

[1] Caziani S., Rocha O.,Rodriguez E., Romano M.,Derlindati E., Talamo A., Rigalde D., Quiroga C., Contreras J., Valqui M. & Sosa H. 2007. Seasonal Distribution, Abundance, and Nesting of Puna, Andean, and Chilean Flamingos. The Condor 109:276-287

[2] Parada M. (1990). Flamencos en el Norte de Chile: Decrementos Invernales y Proposición de Movimientos Migratorios. En I taller Internacional de especialistas en flamencos sudamericanos. Corporación Nacional Forestal- Sociedad Zoológica de Nueva York, pp 148-153

[3] Glade, A. (1993). Libro Rojo de los Vertebrados Terrestres de Chile, CONAF. 2da ed. Ministerio de Agricultura, Santiago. p. 68

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

2. BIOLOGÍA DEL FLAMENCO ALTOANDINO

2.1. Taxonomía, Morfología e Identificación

Los tres flamencos Sudamericanos poseen la taxonomía que se describe a continuación:

Categoría	Taxa
Reino	Animalia
Filo	Chordata
Clase	Aves
Orden	Phoenicopteriformes
Familia	Phoenicopteridae

Sin embargo, cada género y especie fue introducida por distintos autores:

- Phoenicopterus (Linnaeus, 1758) chilensis (Molina 1782): flamenco chileno
- *Phoenicoparrus* (Bonaparte, 1856) *andinus* (Philippi 1854): flamenco andino
- *Phoenicoparrus* (Bonaparte, 1856) *jamesi* (Sclater 1886): flamenco de James

Esta clasificación es la oficialmente reconocida por la Unión de Ornitólogos de Chile. En el ámbito científico internacional comienza a utilizarse el genero Phoenicopterus para todas las especies sudamericanas, descontinuándose el uso del genero Phoenicoparrus, que reunía a las especies de flamenco endémicas de los Andes Centrales de America del Sur (Rodríguez et al., 2005)[4].

Respecto a la morfología e identificación de los flamencos, existen muchos autores que describen las características corporales de estas especies, las mas actuales corresponden a Araya y Millie (1986)[5], Jaramillo (2003)[6], Martínez-Gonzáles (2005)[7]. A continuación se

[4] Rodríguez E. (ed) 2005. Flamencos Altoandinos en el Norte de Chile: Estado Actual y Plan de Conservación. Corporación Nacional Forestal, CONAF. Antofagasta, Chile.
[5] Araya, Millie y Bernal, 1986. Guía de Campo de las Aves de Chile. Editorial Universitaria. Chile. 389 pag.
[6] Jaramillo A., Burke P. & Beadle D. (2003). Birds of Chile. Cristopher Helm, A & C Black Publisher Ltd. Soho Square, London. p. 240
[7] Martínez D., González G. (2005). Las Aves de Chile, Nueva Guía de Campo. Ediciones del Naturalista. p. 620

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

describen las características morfológicas necesarias para realizar una correcta identificación de las especies.

Phoenicopterus chilensis: Se distingue por sus patas relativamente largas. Tonalidad general rosácea, concentrado en el pecho, parte baja del cuello, dorso y plumero. Con las alas plegadas se ve una gran mancha rosada, intensa, que cubre la cola y el costado, en esta condición el negro no es visible. Iris blanco, indistinguible a distancia. Pico rosado pálido con mitad terminal negra. Patas grises con articulaciones y dedos rojos. Dedo posterior vestigial. Longitud entre 106/125 cm.

Phoenicoparrus andinus: Es el más grande de los flamencos y el de mayor intensidad en sus colores, pero por sus patas relativamente cortas se asemeja al flamenco chileno. Adulto de color rosado, especialmente en el cuello, parte baja del pecho vinosa. Tercio trasero negro distintivo, por sus terciarias negras y plumeros cortos. El pico es amarillo con negro, ocupando el color negro 2/3 del total. La base de la mandíbula superior es anaranjada, en contraste con la inferior amarilla. Cara gris verdosa con mancha rosada delante del ojo. Iris negro y notorio a distancia. Sus patas y dedos son amarillos. Carece de dedo posterior. Longitud entre 100/140 cm.

Phoenicoparrus jamesi: Es el más pequeño de los flamencos, pico, patas y cuello relativamente más cortos. Se distingue por ser de cuerpo rosáceo, en contraste con cuello, pecho, cabeza y escapulares posteriores rojizos y largas plumas color carmín, que caen sobre las alas y rabadilla. Terciarias rosadas, plumero corto, mostrando un parche delgado negro en forma de cuña. Iris oscuro. Pico corto y más redondeado que en las otras especies, parte negra separada de la parte clara por una línea cóncava. Base del pico amarillo fuerte, manchita roja en el ángulo del culmen y antifaz rosado oscuro rodeando el ojo oscuro y conectado a la base del pico. Sus patas y dedos son rojas. Carece de dedo posterior. Longitud entre 90/110 cm.

2.2. Etología, Reproducción y Alimentación

2.2.1 Etología

Respecto a la conducta individual y social de los flamencos, los estudios existentes son en su mayoría referidos a especies del género *Phoenicopterus* bajo condiciones de cautividad. Estudios in situ sobre especies silvestres son escasos, destacando el trabajo de autores sudamericanos como Parada (2004), Rodríguez y Gallardo (1992).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Uno de los comportamientos mayormente estudiados es la conducta relacionada a la alimentación. Los flamencos acostumbran alimentarse en grupo, con el pico semisumergido y moviendo la cabeza a ambos lados. En ocasiones, se puede observar cierta agresividad entre los miembros de la misma especie y frente a las otras especies cuando están buscando su alimento, originada posiblemente por conflictos de territorialidad.

Aunque las tres especies obtienen el alimento por filtración, realizan diferentes sistemas de búsqueda y dedican distintos tiempos para esta actividad. El flamenco andino utiliza un 97% de su tiempo diario en la faena de alimentación, seguido del flamenco de james que utiliza un 92% y el flamenco chileno con un 88%. Se describe que el gran tiempo utilizado respondería fundamentalmente a las necesidades energéticas (Rodríguez, et al., 2005).

2.2.2 Reproducción

Las tres especies de flamencos se reproducen principalmente en los meses de verano, aunque pueden hacerlo en cualquier época del año.

Parada (1990)[8] describió 7 etapas en la reproducción: formación de las parejas, construcción de nidos, cópulas, postura, eclosión, agregación infantil y dispersión de los polluelos. Estos eventos en los flamencos altiplánicos comienzan en Agosto y terminan en Julio.

[8] Parada M.(1990). Flamencos en el Norte de Chile, distribución, abundancia y fluctuaciones estacionales del número. En I taller Internacional de especialistas en flamencos sudamericanos. Corporación Nacional Forestal- Sociedad Zoológica de Nueva York, pp 52-66

Tabla 1. Cronología de eventos reproductivos de Flamencos Altoandinos

EVENTOS	MESES											
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Formación de parejas												
Construcción de nidos												
Cópulas												
Postura												
Eclosión												
Agregación Infantil												
Dispersión												
Flamenco Andino												
Flamenco de James												
Flamenco Chileno												
Registros excepcionales de Flamenco Chileno												

Los flamencos generalmente alcanzan su madurez sexual a los tres años, pero generalmente se reproducen a partir del sexto (Parada, 1990)[9]. Esto genera que su reproducción sea muy lenta, y ante factores adversos la nidificación se vea altamente disminuida.

La mayoría de las cópulas ocurren en la etapa de construcción del nido o inmediatamente después. Generalmente ponen un solo huevo de color blanco, pero pueden llegar a poner dos; la incubación dura 30 a 32 días y es compartida por el macho y la hembra; el inicio de la incubación es sincronizado dentro de la colonia. La eclosión tarda entre 24 y 36 horas, periodo en el cual el padre y los polluelos vocalizan, y por último, a los 4 a 7 días los polluelos salen del nido y se agrupan formando grandes agregaciones.

[9] Parada M. (1990). Flamencos en el Norte de Chile y su Reproducción. En I taller Internacional de especialistas en flamencos sudamericanos. Corporación Nacional Forestal- Sociedad Zoológica de Nueva York, pp 132-138

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Entre los sitios de nidificación de mayor relevancia cabe destacar al salar de Surire, salar de Huasco, salar de Coposa en Chile, y laguna Colorada en Bolivia, todos estos ambientes registran nidificación de las tres especies. De exclusividad son los sitios salar Punta Negra, salar Maricunga y Laguna Negro Francisco para la especie *Phoenicoparrus andinus*; Piedra parada, Laguna Vilama y Lago Poopó para la especie *Phoenicoparrus jamesi*; Junin, Loromayu, Pujsa, Loyoques, Laguna Pozuelos, Laguna Huambune y Laguna Llacanelo para la especie *Phoenicopterus chilensis* (Rodríguez et al., 2005). El salar de Atacama y Surire son los sitios que han presentado mayor estabilidad respecto del establecimiento de colonias de crías en Chile. en particular para las especies *Phoenicoparrus andinus* (Mapa 1.), y *Phoenicoparrus jamesi* (Mapa 2) (Rigalde D., 2003[10]).

De los 12 sitios de nidificación descritos en Chile, 8 se encuentran protegidos por algún instrumento legal nacional o internacional, estos se representan por los siguientes actores:

(1) Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) a través del Parque Nacional Lauca, Parque Nacional Tres Cruces, Reserva Nacional Los Flamencos, Monumento natural Salar de Surire

(2) Declaración de Sitios RAMSAR. Protección internacional de humedales

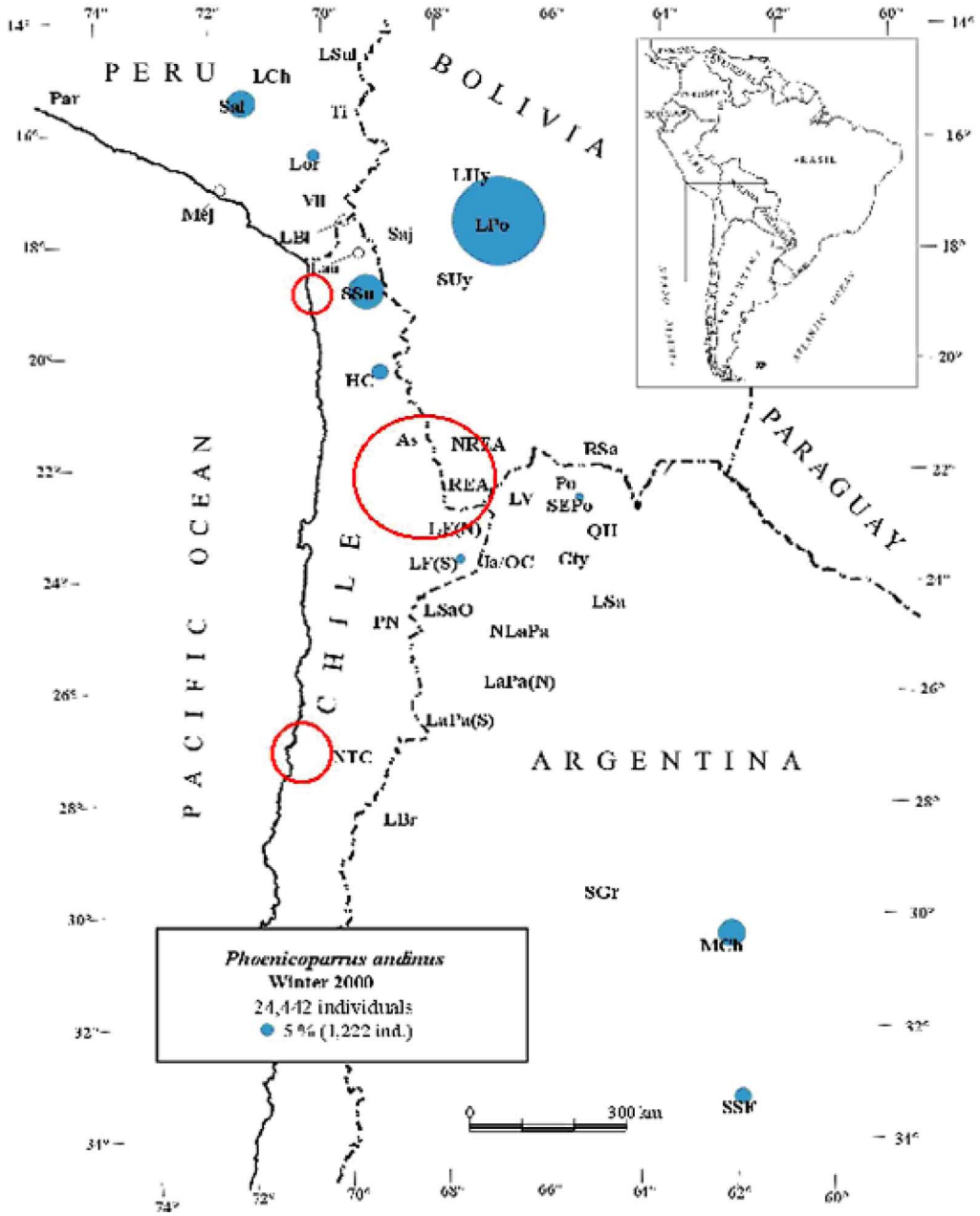
Tabla 2. Áreas Chilenas de nidificación del Flamenco Altoandino

	Sitios de Nidificación	Tipo de protección legal
1	Salar de Atacama	Sitio Ramsar y Reserva Nacional los Flamencos *
2	Salar Punta Negra	
3	Salar de Huasco	Sitio Ramsar
4	Salar de Coposa	
5	Salar de Surire	Monumento Natural
6	Salar de Maricunga	Sitio Ramsar y Parque Nacional Tres Cruces **
7	Laguna Negro Francisco	Sitio Ramsar y Parque Nacional Tres Cruces
8	Salar de Tara	Sitio Ramsar y Reserva Nacional los Flamencos
9	Salar de Pujsa	Reserva Nacional los Flamencos
10	Salar de Piedra Parada	
11	Laguna Huambune	Parque Nacional Lauca
12	Salar de Loyoques	

* Protección solo Sistema hidrológico Soncor; ** Protección solo Laguna Santa Rosa

[10] Rigalde D. (2003). Conservación de Flamencos en el altiplano peruano. Lyonia 4(1): 87-96.

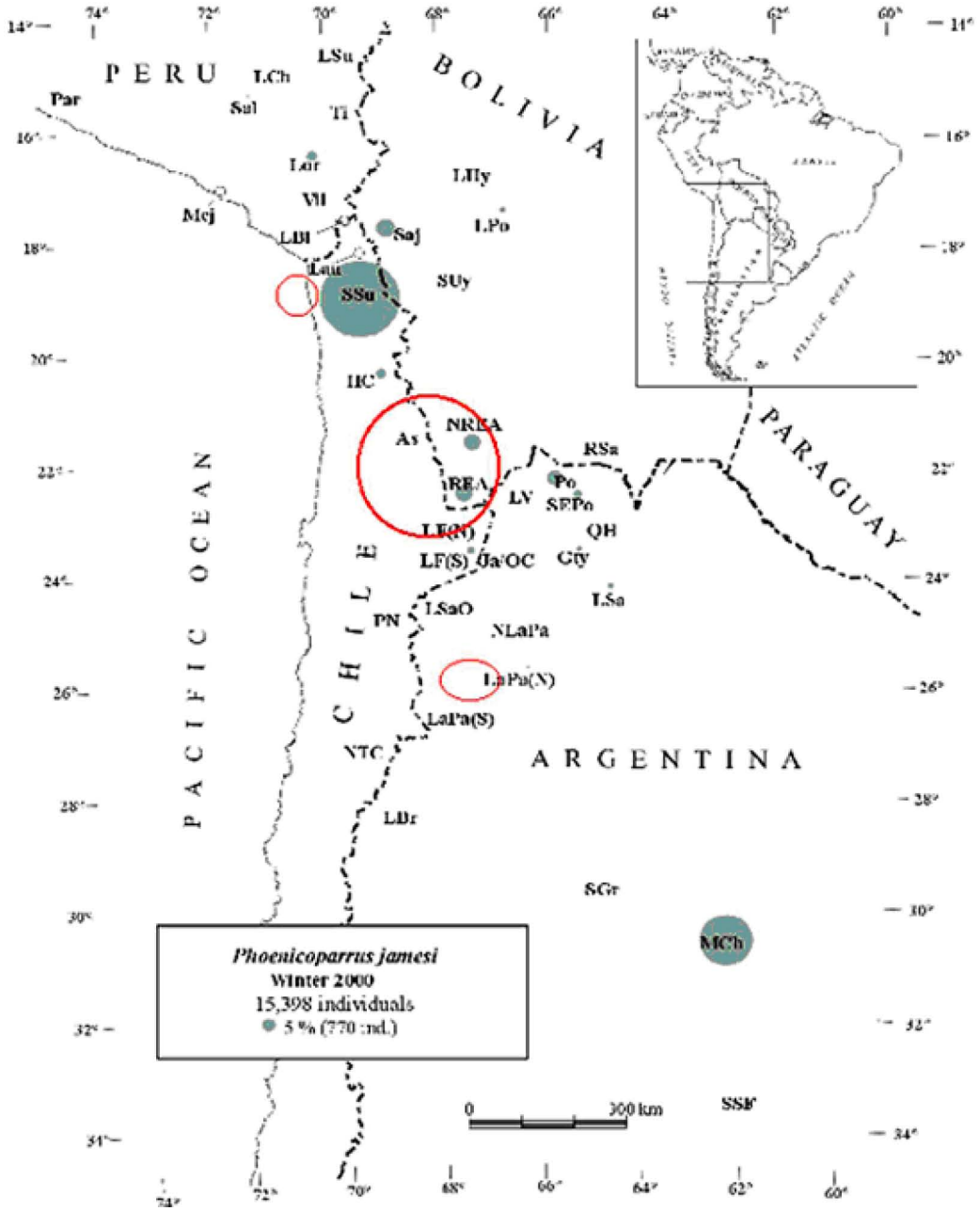
Mapa 1. Localidades utilizadas por el Flamenco Andino (*Phoenicoparrus andinus*) en cuatro países. Ver color azul. Las circunferencias rojas son sus áreas de nidificación en lagos, lagunas y salares desde donde migran y a donde regresan anualmente.



Fuente: Informe 2001 al CMS por la Secretaría del GCFA.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Mapa 2. Localidades utilizadas por el Flamenco de James (*Phoenicoparrus jamesi*) en cuatro países. Ver color verde. Las circunferencias rojas son sus áreas de nidificación en lagos, lagunas y salares desde donde migran y a donde regresan anualmente.



Fuente: Informe 2001 al CMS por la Secretaría del GCFA

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

2.2.3 Alimentación

Son las únicas aves que filtran su alimento; los flamencos mantienen hundido el pico al revés en el agua, y recogen plantas y animales diminutos filtrando el líquido a través de unas ranuras o lamelas que tienen en el pico y la lengua. Se sugiere que el tamaño lamelar del aparato filtrador de cada especie seria determinante a la hora de clasificar las dietas (Gallardo y Rodríguez, 1992)[11]. Se alimentan en lagos pocos profundos, a veces en bandadas de más de un millón de ejemplares.

Al alimentarse retienen materia particulada en la boca como algas, diatomeas, crustáceos, etc., y el agua es expulsada, lo que evita que consuman aguas alcalinas o salinas. El alimento de los flamencos contiene pigmentos específicos para mantener su coloración, ya que tienen la capacidad de oxidar β carotenos naranjo o amarillo a keto carotenoides rojos (Pincheira y Durand, 2005)[12].

Los flamencos generalmente se alimentan de algas diatomeas, crustáceos y moluscos que contienen carotenoides. Los pigmentos amarillos de especies como el flamenco de James y Andino, provienen de xantofilas obtenidas del alimento de origen vegetal (Pincheira y Durand, 2005).

Las tres especies presentan diferencias en su alimentación. El flamenco chileno (*Phoenicopterus chilensis*), se alimenta principalmente en lagunas profundas propicias para el desarrollo de macroinvertebrados tales como artemias, nemátodos, larvas de moscas y copépodos, aunque su dieta también incorpora diatomeas de gran tamaño tales como Navícula, Surirella y Amphora. El flamenco Andino (*Phoenicoparrus andinus*), es predominantemente omnívoro e incorpora las mismas especies de diatomeas señaladas anteriormente y componentes macroinvertebrados tales como larvas de moscas, nemátodos y copépodos. El flamenco de james (*Phoenicoparrus jamesi*), preda sobre diatomeas de menos tamaño, incorporando como las otras especies, grandes cantidades de fango ricos en bacterias y materia orgánica (Rodríguez et al., 2005)

[11] Gallardo O. P., & Rodríguez, E., 1992. Hábitos alimenticios y etología de flamencos en el Salar de Surire. Tesis de grado. Universidad Arturo Prat, 89 pp.
[12] Pincheira, B.; Durand D. 2005. Flamencos: Antecedentes generales y su manejo en cautiverio. En: Cría en cautividad de fauna chilena. Ed. Iriarte A.; Tala C.; González B.; Zapata B.; González G.; Maino M. Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias, Universidad de Chile. Santiago, Chile. pp 215-226.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

2.3. Amenazas a la población y Estado de Conservación

2.3.1 Amenazas

Entre las amenazas naturales de los flamencos Chilenos, se encuentran los depredadores naturales principalmente depredadores terrestres como las dos especies de zorro (*Pseudalopex culpeaus y Pseudalopex griseus*). Existen registros de depredación sobre huevos, crías y adultos de Zorro culpeo en los salares de Atacama y Punta Negra (Rodríguez et al., 2002)[13]. Estos predadores tienen acceso a las aves cuando el nivel de las aguas disminuye (Pincheira y Durand, 2005). Otras evidencias se han colectado por guardaparques y personal técnico de CONAF que indican intentos de predación sobre huevos de flamenco por las especies *Larus serranus* (Gaviota andina) y *Falco peregrinus* (Halcón peregrino) (Rodríguez et. al 2005).

La acción del ser humano es considerada una de las mayores amenazas para los flamencos, ya que genera distintos efectos negativos para las poblaciones como, contaminación de lagos y lagunas por actividad minera, construcción de caminos y carreteras que facilita la llegada de predadores terrestres, uso del recurso agua para riego y actividades productivas, y por último, la actividad turística informal y descontrolada, que altera el comportamiento de los flamencos, modificando conductas como la reproductiva, lo que ha implica alteraciones en la dinamica de la población (Rodríguez et. al, 2005).

2.3.2 Estado de Conservación

2.3.2.1 Legislación

Chile posee actualmente distintos instrumentos legales de carácter Nacional e Internacional, que hacen relación a los flamencos y/o su hábitat.

Dentro de los instrumentos nacionales se cita al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE), relacionado con las siguientes normativas; D.S Nº 4363 de 1931 (Ley de Bosque, CONAF), D.L 1.939/1977 (Creación y desafectación de áreas protegidas), Ley Nº 19.3300/1997 (Bases generales del medio ambiente), Ley Nº 18.362 (Creación del SNASPE), Ley Nº 19.253/1993 (Ley indígena), Ley de caza Nº 19.473 (Sobre caza y captura de especies en territorio Chileno).

[13] Rodríguez, E.; Contreras, J.; Amado, N.; Santoro, A.; Valenzuela, I.; Caqueo, B. 2002. Conservación de flamencos en el norte de Chile. Corporación Nacional Forestal. Antofagasta, Chile. pp 7-35.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Dentro de los instrumentos internacionales a los cuales Chile se ha suscrito se encuentran: Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR), Convención sobre la Conservación de las Especies Migratorias de Animales Silvestres (CMS), Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES), Tratado entre la República de Chile y la República de Argentina sobre el Medio Ambiente, Convención sobre la Desertificación, Convención Relativa a la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural, Convención de Diversidad Biológica (CDB).

2.3.2.2 Categoría de Conservación

De acuerdo Ley de caza Nº 19.473 y su reglamento (SAG, 2004), las tres especies de flamencos se encuentran en estado de conservación Vulnerable debido a la reducción de sus tamaños poblaciones. Dentro de la misma categoría se encuentran catalogados en Libro Rojo de Los Vertebrados Terrestres de Chile (Glade, 1993).

Según la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2008), la especie de flamenco Andino se encuentran en categoría Vulnerable dado a que su población se ajusta a los criterios de esta categoría (reducción del tamaño poblacional superior al 30%). Por otro lado, flamenco de James y Chileno se encuentran en categoría “Cercanos a la amenaza” (especies cercanas a calificar dentro de las categorías En Peligro Critico, En Peligro, Vulnerables).

El flamenco de James y Andino se encuentran incluidos en el Apéndice I de la Convención de Especies Migratorias (CMS), este apéndice enumera las especies migratorias en peligro, y pueden acceder a esta calificación las especies migratorias que a partir de pruebas dignas de confianza, que incluyen los mejores datos científicos disponibles, demuestren que dicha especie está en peligro.

Finalmente, la familia *Phoenicopteridae* se encuentra en el Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES). Dentro de esta categoría figuran especies que no están necesariamente amenazadas de extinción pero que podrían llegar a estarlo a menos que se controle estrictamente su comercio. También se encuentran las llamadas especies semejantes, es decir, especies cuyos especímenes objeto de comercio son semejantes a los de las especies incluidas por motivos de conservación.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

3. ECOLOGÍA DEL FLAMENCO ALTOANDINO

3.1. Hábitat

Como ya se menciono, *P. andinus* y *P. jamesi* son especies que se restringen a ambientes altiplánicos puneños y pre- puneños. Estos ambientes se componen en su mayoría por salares, vegas, bofedales, cursos fluviales y lagunas salobres de baja profundidad, ubicados en mesetas desérticas sobre los 3.500 msnm y en cuencas endorreicas como el salar de Atacama y de Punta negra entre los 2.300 y 2.400 msnm. A pesar que *P. chilensis* comparte este tipo de hábitat, también utiliza la costa y lagunas de baja profundidad en sitios de menor altitud. En suma, el flamenco sudamericano ocupa humedales, ambientes sujetos a fluctuaciones naturales de tamaño, profundidad, salinidad, que finalmente son factores que afectan la disponibilidad de hábitat y el éxito reproductivo (Valqui, 2000)[14].

3.2. Distribución

Como ya se menciono los flamencos sudamericanos del género *Phoenicoparrus (P. jamesi, P. andinus)*, se distribuyen principalmente en salares del altiplano y zonas precordilleranas en la puna de Argentina, Bolivia, Chile y Perú (Rodríguez *et al*., 2002). En Chile ambas especies de este género, habitan lagunas y salares altoandinos entre el límite con Perú, y las lagunas de Santa Rosa y salar de Maricunga (Araya y Millie 1992).

El flamenco chileno (*P. chilensis*), tiene una distribución más amplia en Sudamérica, desde el suroeste de Ecuador, Bolivia y sur de Brasil hasta tierra del fuego (Pincheira y Durand, 2005). Habita en las costas marinas, en los lagos salados y en los lagos de agua dulce, y se ha encontrado desde el nivel del mar hasta los 4500 metros de elevación.

Los flamencos presentan continuos desplazamientos a lo largo del año en busca de lugares aptos para la reproducción y alimentación. En el altiplano estos lugares favorables son afectados por rigurosas condiciones climáticas, las que ocasionan el congelamiento de las lagunas por sobre los 4000 msnm en la época invernal (Parada, 2005)[15]. Por esta situación, los

[14] Valqui, M., Caziani, S.M., Omar Rocha & Eduardo Rodriguez, 2000. Abundance and distribution of the South American Altiplano Flamingos. Waterbirds 23 Special Publicatiion (1): 110-113

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

flamencos se desplazan hacia salares de baja altura asociados a Argentina, Bolivia, Chile y Perú, o ambientes de altura no afectados por el congelamiento (Rodríguez *et al*., 2002).

Estos fenómenos climáticos también actúan sobre las colonias de nidificación de flamencos, a veces en forma favorable cuando las condiciones del tiempo son aptas para la reproducción, y muchas veces de manera desfavorable por exceso de lluvias que hacen subir demasiado los niveles de agua en las lagunas, y cuando las temperaturas son demasiado extremas y los huevos quedan expuestos a los rayos solares por demasiado tiempo. Por otro lado sequías catastróficas podrían causar un completo abandono de los huevos (Amando et al., 2007)[16]. Los factores climáticos también pueden incidir en el comportamiento reproductivo, altos niveles de pluviosidad puede generar un efecto en la disponibilidad de alimento, florecimiento de algas, coloración del plumaje, lo que altera el comportamiento reproductivo (Pincheira y Durand, 2005).

Durante los meses de verano, los flamencos vuelven a realizar una redistribución de su población en busca de lugares favorables. El flamenco Andino durante los meses cálidos distribuye su población a lo largo del altiplano, a excepción de los ejemplares reproductivos que se desarrollan entre los 2000 y 3000 mt. de altura en la zona precordillerana del altiplano de Chile, principalmente en los salares de la vertiente occidental de los Andes. El flamenco de James se desplaza hacia los salares por sobre los 4000 mt. de altura, y su reproducción se realiza principalmente en Bolivia, mientras que el flamenco Chileno realiza una distribución homogénea a lo largo de Chile, y nidifica en un rango mayor dentro del altiplano, presentando colonias en Argentina, Bolivia y Chile principalmente (Mascitti & Maris, 2002)[17].

[15] Parada, M. 2005. Incubación, alimentación artificial y reinserción de polluelos de flamencos. En: Cría en cautividad de fauna chilena. Ed. Iriarte A.; Tala C.; González B.; Zapata B.; González G.; Maino M. Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias, Universidad de Chile. Santiago, Chile. pp 227-247.
[16] Amado, N., Castro, A. and Rodriguez, E. 2007. Nidificación de flamencos en la región de Antofagasta, Chile; Temporada reproductiva 2006-2007. Flamingo 15, pp 21-25
[17] Mascitti V., & Maris S., 2002. Patterns of Abundance, Distribution and Habitat Use of Flamingos in the High Andes, South America. Waterbird 25 (3): 358-365.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

3.3. Abundancia

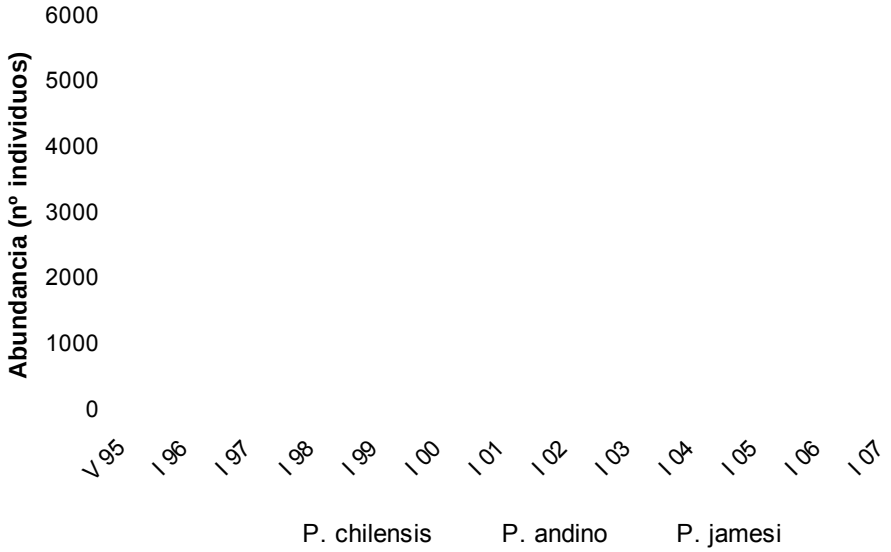
3.3.1 Abundancia en el Salar de Atacama

La abundancia o número de individuos, es un parámetro cuantitativo que nos entrega información respecto de la dinámica poblacional de una especie. En este contexto, la metodología de censos secuenciales nos permite obtener datos en el tiempo sobre esta variable. Sin embargo, este método de estimación es de largo plazo, de difícil ejecución en la mayoría de los casos, requiere de especialistas por lo que su costo aumenta, etc. Por este y otros motivos, la cuantificación como monitoreo poblacional de nuestra fauna silvestre, ha sido escasa, difusa, incompleta y de muy difícil acceso. Es destacable el esfuerzo de CONAF y otras entidades, que en el tiempo han incluido dentro de sus agendas la cuantificación de población silvestre. Es así, como CONAF en conjunto con el grupo para la conservación de flamencos altoandinos (GCFA), y actores del sector privado, han efectuado registros de la población a partir de censos simultáneos a nivel internacional y en particular para nuestro país en aquellos sectores de mayor sensibilidad por la cercanía de actividades mineras.

A continuación se presenta información obtenida por CONAF, sobre la abundancia de flamencos en el Salar de Atacama en el periodo estival e invernal entre 1995-1997 (Figura 1), registros obtenidos específicamente de las lagunas de mayor importancia biológica para las especies, estas son; Laguna Puilar, Laguna Burro Muerto, Laguna Chaxa, Laguna Barros Negros, Laguna Salada, Saladita e Interna, Laguna Aguas de Quelana, y Lagunas La Punta y La Brava.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 1. Abundancia de Flamencos Salar de Atacama 1995-2007



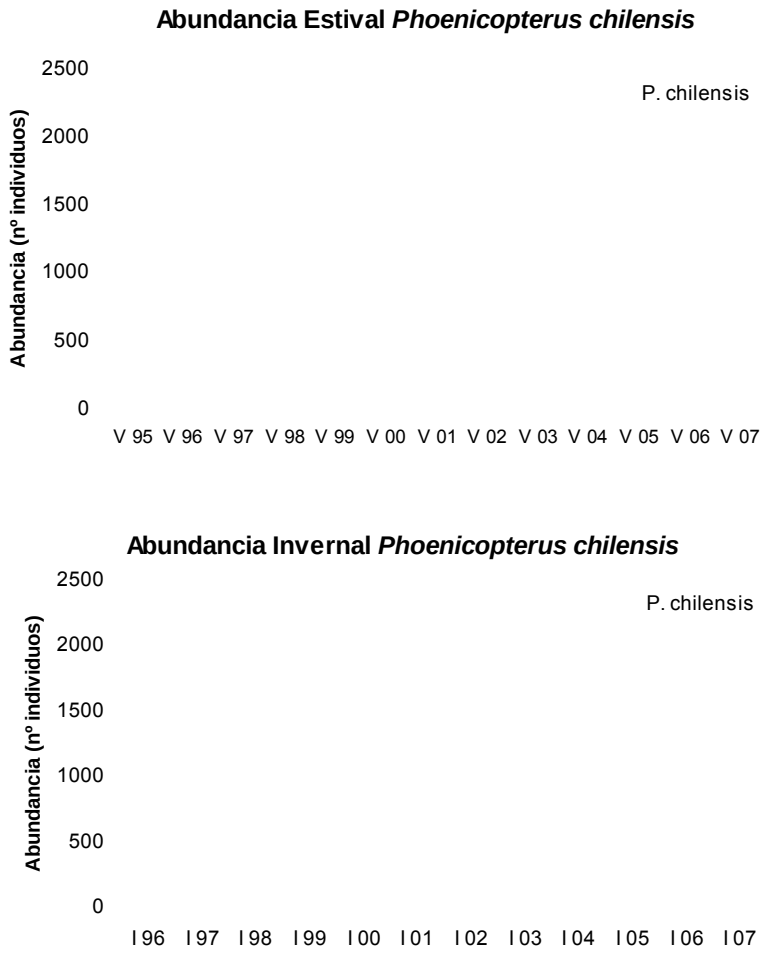
En términos generales se observa que la abundancia y su distribución a lo largo del periodo muestreado difieren según la especie. La especie de mayor presencia en el Salar es la *Phoenicoparrus andinus*, seguida por *Phoenicoparrus jamesi* y *Phoenicopterus chilensis.* Las distribuciones son de tipo estival para *P. andinus*, invernal para *P. jamesi* y a pesar de ser un régimen de distribución variable para *P. chilensis,* se observa una tendencia invernal. Esta fluctuación estacional en la abundancia y composición de especies de flamencos en el Salar, evidencian el comportamiento migratorio de estas aves.

A continuación se detallan las observaciones realizadas por especie en las estaciones de verano e invierno.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

3.3.1.1 *Phoenicopterus chilensis*

Figura 2. Abundancia *Phoenicopterus chilensis*



Fuente: Elaboración propia, datos CONAF

De acuerdo a su abundancia, el flamenco chileno es el segundo en importancia en el país. El censo 1995-2007, registra un total de 27.350 individuos, alcanzando en época estival la mayor abundancia que representa con un total de 15.218 individuos, valor que disminuye en la estación de invierno con 12.132 individuos.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

La población de verano se presenta variable con registros máximos y mínimos. Se observa en el año 1997 un valor máximo de 2.301 individuos. Este aumento poblacional coincide con eventos naturales, en particular el fenómeno de El Niño. El aumento de las lluvias, inundaciones y aluviones de sitios altiplánicos provocaría la migración de estas especies desde la Puna hacia Salar de Atacama en búsqueda de una mejor calidad de hábitat.

La población de invierno presenta un comportamiento similar a la época estival, con valores máximos y mínimos de abundancia. El *Peak* se presenta en el año 1996 con una abundancia de 2.149 individuos.

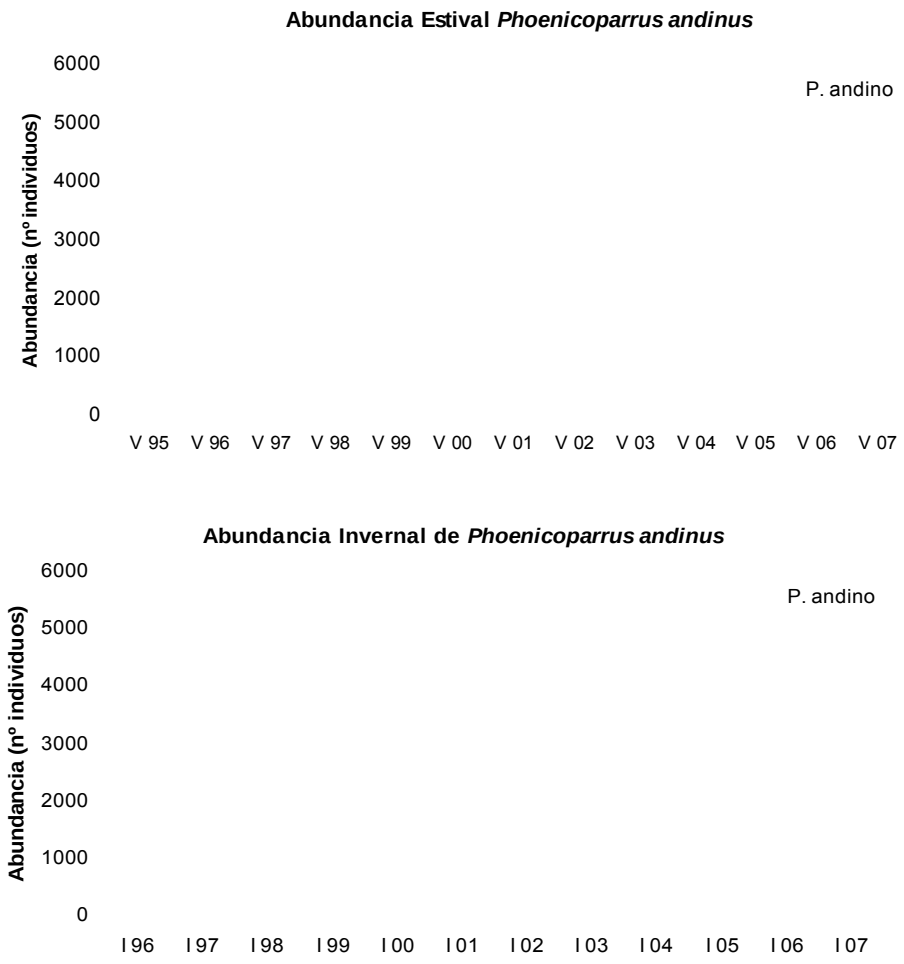
A pesar que se describen movimientos migratorios invernales para esta especie, del registro de datos se puede observar, que no existen cambios significativos entre las estaciones de invierno y verano, con abundancias relativas totales de 12.132 y 15.218 individuos respectivamente en el periodo 1995-2007. La explicación para este comportamiento se debe a la condición que presente el hábitat. Si la calidad del ambiente, reflejada en términos de disponibilidad de alimento, refugio, sitios de nidificación entre otros, no es adecuada para las necesidades de la población, entonces esta recurre a la visita de nuevos sitios fuente. Datos registrados en el periodo 1985-1988 (Parada,1990), indican de modo coincidente que la variabilidad interestacional no es significativa, con valores de invierno y verano de 1.448 y 1.093 individuos respectivamente.

A pesar que esta especie es la segunda más abundante, se observa que la tendencia general de la población en el periodo 1995-2007 es a la disminución.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

3.3.1.2 Phoenicoparrus andinus

Figura 3. Abundancia de *Phoenicopterus andinus*



Fuente: Elaboración propia, datos CONAF

El flamenco andino es la especie mejor representada en el país. El censo del periodo 1995-2007 registra un total de 63.020 individuos. A diferencia del flamenco chileno, esta especie presenta marcados patrones de fluctuación poblacional interestacional, alcanzando valores mayores de abundancia en épocas estivales (41,478 individuos) y valores menores (21.542 individuos) en épocas invernales. Este patrón demuestra un comportamiento marcadamente

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

migratorio originado por las condiciones climáticas presentes en cada estación y es semejante a aquellos datos registrados por autores como Parada (1990) y Hurlbert (1981)[18].

Se ha descrito que esta especie migra desde el Salar de Atacama durante los inviernos hacia los altos Andes de Bolivia (Mascitti & Bonaventura, 2002).

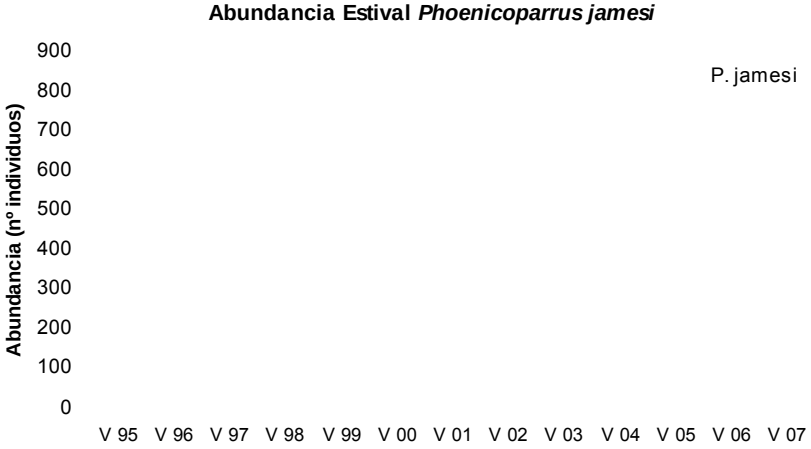
La población de verano presenta un patrón de fluctuación variable, se registran 2 valores máximos 5.234 (1996) y 5.366 (2003) individuos superando aproximadamente en un 60% el valor promedio de la población en el periodo total.

La población de invierno presenta un patrón de fluctuación similar a la época estival, con valores máximos y mínimos de abundancia. El *peak* se presenta en el año 2004 con una abundancia de 5.670 individuos.

A pesar que existen fluctuaciones en la dinámica de la población la tendencia de esta en el periodo descrito (1995-2007) es a la baja.

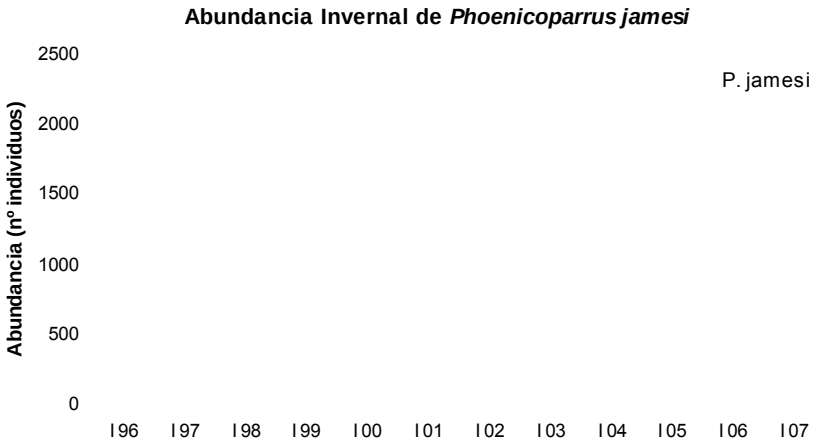
3.3.1.3 Phaenicoparrus jamesi

Figura 4. Abundancia de *Phoenicoparrus jamesi*



[18] Hurlbert, S.H., 1981. Results of three flamingo censuses conducted between December 1978 and July 1980. Andean Lake and Flamingo Investigations. Technical Report Nº2

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl



Fuente: Elaboración propia, datos CONAF

El flamenco de James es la especie con menor abundancia en el país. El censo del periodo 1995-2007 registra un total de 21.343 individuos. Esta especie también muestra patrones de fluctuación poblacional interestacionales, sin embargo, los valores máximos de abundancia se alcanzan en épocas invernales mientras los valores mínimos en épocas estivales.

La población de verano presenta un patrón de fluctuación variable, se registra un valor máximo de 824 individuos en el año 2003 y un valor mínimo de 70 individuos en el año 1998. El valor máximo supera al 100% del valor promedio de la población en el periodo total.

La población de invierno presenta un patrón de fluctuación similar a la época estival, es decir, sin un patrón definido. El *peak* de abundancia se presenta en el año 2001 con una abundancia de 1.698 individuos.

.

En conclusión, el análisis de censo entre el periodo 1995-2007, es decir 12 años, permitió establecer diferencias entre las tres especies.

En el flamenco de James, se estimó un patrón de distribución invernal de la población, con un *peak* de 1.698 individuos (2001). Por otro lado, el flamenco Andino mostró un patrón de distribución de verano, con un *peak* de 5.366 individuos (2003). Finalmente, la especie de flamenco Chileno, presentó un patrón de distribución mixto.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

3.3.2 Abundancia en el Sistema Hidrológico Peine

El sistema Hidrológico Peine se ubica en el sector Sur del Salar de Atacama, y se compone por las Lagunas Salada, Saladita e Interna. Estas lagunas han sido descritas como sitios de nidificación para las tres especies de flamenco, por lo que revisten gran importancia para la conservación del flamenco altoandino (Parada, Rottmann & Guerra)[19].

A partir de los datos obtenidos por CONAF en los censos puntuales de estas lagunas durante el periodo (1995-2003), se pueden observar los siguientes patrones de abundancia:

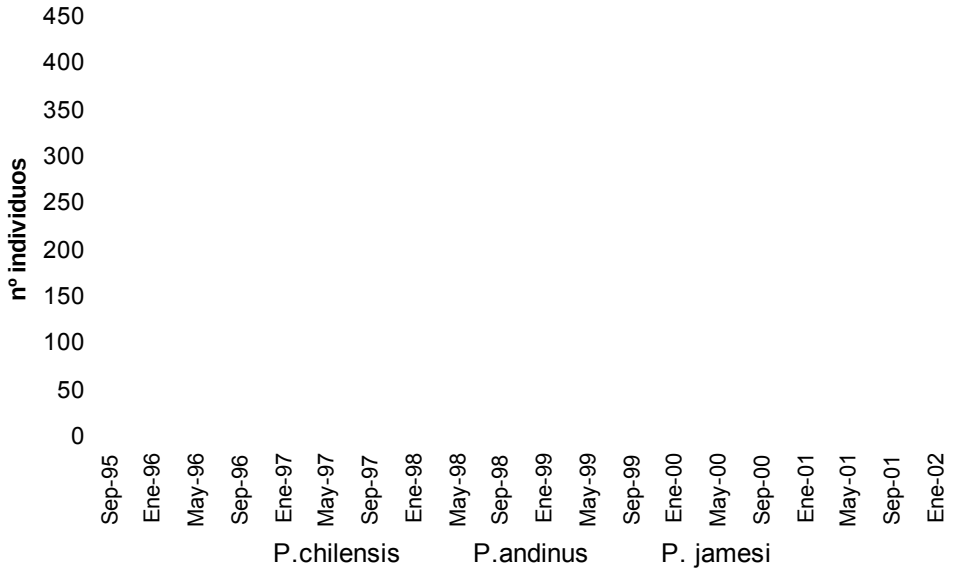
3.3.2.1 Laguna Salada

Se observa en la Figura 5, un comportamiento variable en la dinámica de la población de flamencos. La especie mas abundante corresponde a *Phoenicoparrus andinus*, quien presenta un patrón de distribución estival con valores máximos que bordean los 400 individuos. La segunda especie mas abundante es *Phoenicoparrus jamesi* quien presenta un patrón menos claro que el anterior. A pesar de ello esta especie posee en general una distribución invernal, sin embargo, alcanza un valor máximo de abundancia durante enero del 2002 con 330 individuos. Finalmente, *Phoenicopterus chilensis* presenta un patrón mixto con valores máximos en época tanto estival como invernal. Los valores de los censos correspondientes a las tres especies durante el periodo septiembre 1995-octubre 2002 son, 7.339, 2.185 y 1.808 individuos en orden descendente respectivamente.

[19] Parada M., Rottmann J., & Guerra C. 1990. I Taller Internacional de Especialistas en Flamencos Sudamericanos. Corporación Nacional Forestal – Chile y Sociedad Zoológica de Nueva York- U.S.A.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 5. Abundancia de Flamencos en la Laguna Salada



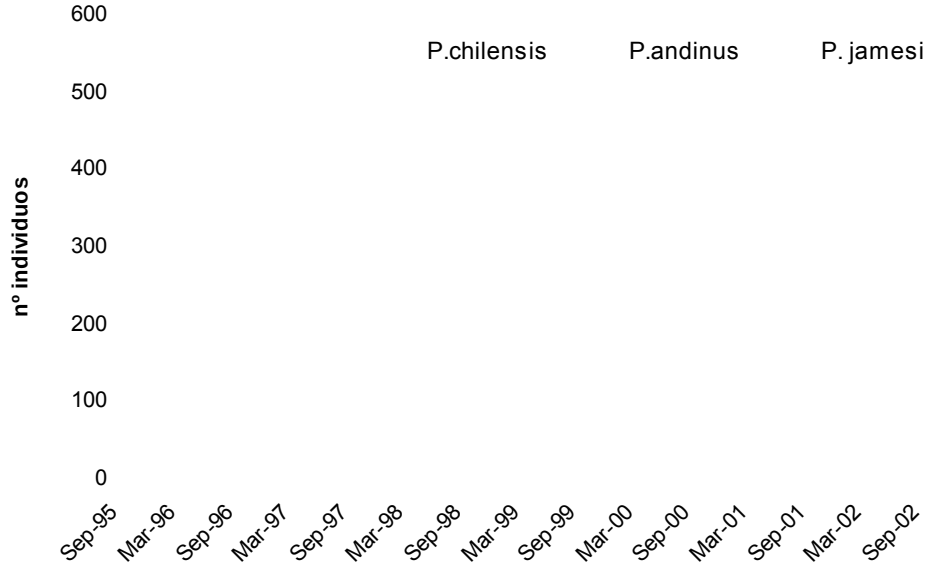
Laguna Salada concentra un valor total de 11.330 individuos durante el periodo descrito. El comportamiento observado coincide con la información bibliográfica sobre la distribución de las tres especies en cuestión, ya que en su condición migratoria, estas aves presentan diferencias en sus distribuciones según la estación del año. En particular las especies del género *Phoenicoparrus.*

3.3.2.2 Laguna Saladita

Se observa en la Figura 6 un comportamiento variable en la dinámica de la población de flamencos, con una notoria disminución en la cantidad de individuos censados. La especie más abundante corresponde a *Phoenicoparrus andinus*, quien presenta un patrón de distribución estival con valores máximos que bordean los 400 individuos. La segunda especie más abundante es *Phoenicopterus chilensis,* quien presenta un patrón mixto con valores máximos en época tanto estival como invernal. Se observa que esta especie sufre grandes variaciones en los valores de abundancia al comienzo del periodo censado. Finalmente, se encuentra la especie *Phoenicoparrus jamesi* quien presenta un patrón con tendencia de distribución invernal y con una población censada muy baja. Los valores de los censos correspondientes a las tres especies durante el periodo septiembre 1995-octubre 2002 son 1.506, 1.064 y 594 individuos en orden descendente respectivamente.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 6. Abundancia de Flamencos Laguna Saladita



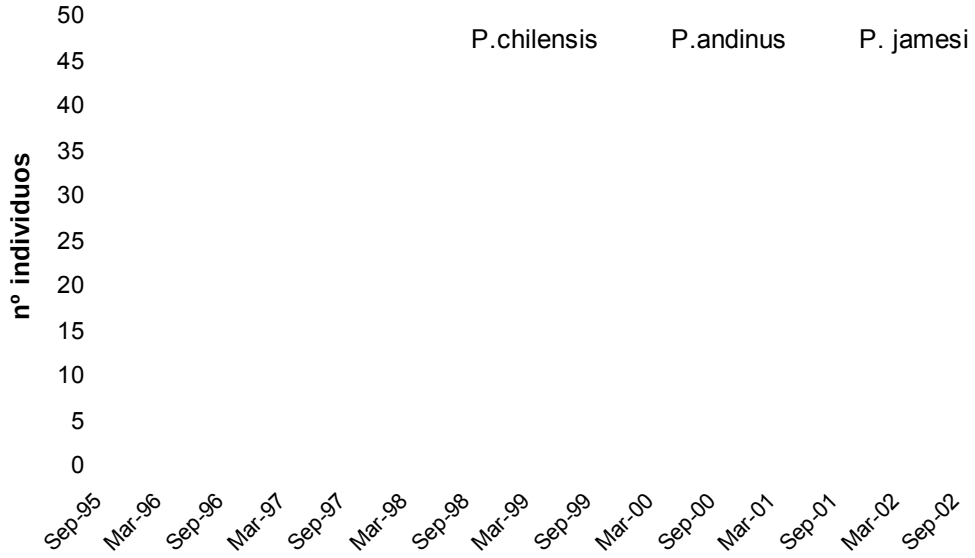
La Laguna Saladita concentra menor cantidad de individuos, con un valor de 3.164 flamencos. Sin embargo, la tendencia de ocupación, sigue el patrón general descrito para cada una de las especies.

3.3.2.3 Laguna Interna

Se observa en la Figura 7 un comportamiento variable en la dinámica de la población de flamencos, con una notoria disminución general en la cantidad de individuos censados en el periodo 1997-1999. La especie más abundante corresponde a *Phoenicoparrus andinus*, que presenta un patrón de distribución estival con valores máximos que bordean los 47 individuos. La segunda especie más abundante es *Phoenicopterus chilensis,* que presenta un patrón mixto con valores máximos en época tanto estival como invernal. Finalmente, se encuentra la especie *Phoenicoparrus jamesi* que presenta un patrón con tendencia de distribución invernal con valores máximos que bordean los 16 individuos. Los valores de los censos correspondientes a las tres especies durante el periodo septiembre 1995-octubre 2002 son 385, 122 y 90 individuos en orden descendiente respectivamente.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 7. Abundancia de Flamencos Laguna Interna



El grafico indica una disminución de la población de las tres especies durante el periodo 1997-1999, esta disminución describe a la Laguna Interna como el hábitat que concentra el menor número de individuos censados, con un valor de 597 flamencos en el periodo 1995-2002. Sin embargo, la tendencia de ocupación, sigue el patrón general descrito para cada una de las especies.

4. CONCLUSIONES

La estocasticidad que presenta la población de flamencos en el Salar de Atacama y en particular en el sistema de Lagunas Salada-Saladita-Interna, es resultado de variables inherentes a la población y de la dinámica del hábitat que sustenta estas poblaciones.

Los sistemas de lagunas Salada-Saladita-Interna y las lagunas inscritas en el Salar de Atacama, se definen como el hábitat de las tres especies de flamencos. Estas lagunas presentan una importante variación estacional y anual. En este contexto de variabilidad natural asociada al hábitat de los flamencos, sus poblaciones también sufren fluctuaciones de abundancia debido a esta condición de cambio. Existen estudios que documentan que la variación en la distribución de la población de flamencos en el Salar de Atacama, se podría

explicar por factores climáticos de variación de temperatura y precipitación en el caso del flamenco de James y Andino, mientras que el flamenco Chileno seria mayormente afectado por la variación de temperatura, ya que la variación en la precipitación no presenta valores estadísticamente significativos (González, 2007)[20].

Las abundancias de las tres especies de flamenco presentan una clara estacionalidad en el Salar de Atacama (indicio del comportamiento migratorio), con máximas abundancias en verano para el flamenco andino y máximas en invierno para el flamenco de James. El flamenco chileno no presenta estacionalidad con precisión, más bien posee un comportamiento mixto con una tendencia hacia épocas invernales. En este último escenario flamenco de James y flamenco chileno compartirían un mismo nicho ecológico.

El sistema de lagunas Salada-Saladita-Interna (área con escasa reproducción), presenta el mismo patrón cíclico estacional de abundancia, sin embargo este patrón es más notorio en el caso de la laguna Salada.

Al estudiar la abundancia de las tres especies de flamencos en el Salar de Atacama durante el periodo 1995-2007, se observó que la especie que tenía una mayor abundancia era el flamenco Andino con 5.251 individuos promedio, la segunda especie en abundancia es el flamenco chileno con 2.279 individuos promedio, y por último el flamenco de James con 1.778 individuos promedio. Respecto a la distribución de abundancia particular del sistema de lagunas Salada-Saladita-Interna durante el periodo 1995-2002, se obtiene que las mayores abundancias de flamencos totales se encuentran en orden decreciente en Salada (11.330), Saladita (3.164) e Interna (594).

Los datos de abundancia obtenidos para los flamencos del Salar representan en escala temporal, solo una porción de la dinámica total de las especies. Es por ello que las conclusiones vertidas solo pueden ser referidas al tiempo de estudio, y con ello las posibilidades de suponer una tendencia de la población en el tiempo es baja. Por otra parte la escala geográfica con la cual se enfrenta la situación del flamenco debe ser entendida bajo el contexto de un dinámica metapoblacional. Esto quiere decir que las colonias de flamencos deben ser tratadas como pequeñas poblaciones locales en contacto con poblaciones regionales (nacionales, internacionales) a partir de la dispersión (migración). Es así, como las lagunas de los salares deben visualizarse como nichos ecológicos

[20] González F. 2007. Variabilidad Poblacional de los Flamencos en el Altiplano Chileno relacionada con las Precipitaciones y la Temperatura.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

ocupados o en proceso de ser ocupados, y que a favor de las necesidades de las especies se van sucediendo episodios de abandono y colonización de parches. De este modo existe una dinamismo poblacional que disminuye la probabilidad de extinción de las especies.

En conclusión, los censos de flamencos en las lagunas del Salar de Atacama y del sistema de lagunas Salada-Saladita-Interna, indican un comportamiento fluctuante en los valores de abundancia de la población total, variabilidad asociada a la demografía inherente de la población, como a aquella ofrecida por el medio ambiente. Por otra parte, los resultados no permiten demostrar una tendencia de la población a largo plazo.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Anexo 5.5

Limnología

Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

INDICE

1. LIMNOLOGÍA 3

1.1. Introducción 3
1.2. Metodología 4
1.3. Resultados 6
1.4. Conclusiones 20

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Localización geográfica de los sitios de muestreo. Las coordenadas están expresadas en unidades UTM (Datum WGS84) 5

Tabla 2. Composición taxonómica del fitoplancton y abundancia (células/L) por sitio de muestreo para los sistemas de aguas La Punta-La Brava y Salada-Saladita-Interna 9

Tabla 3: Composición taxonómica del fitobentos y abundancia (células/mm3) por sitio de muestreo para los sistemas de aguas La Punta-La Brava y Salada-Saladita-Interna 11

Tabla 4: Composición taxonómica y abundancia (individuos/L) de la fracción zooplanctónica entre las 125 - 250 19

Tabla 5: Composición taxonómica y abundancia (individuos/L) de la fracción zooplanctónica superior a 250 μ 19

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Riqueza taxonómica fitoplanctónica para los sistemas La Punta-La Brava (LP-LB en barras grises) y el sistema Salada-Saladita-Interna (S-S-I barras blancas). 7

Figura 3: Riqueza taxonómica fitobentónica para los sistemas La Punta-La Brava (LP-LB en barras grises) y el sistema Salada-Saladita-Interna (S-S-I en barras blancas). 8

Figura 4: Abundancia total (células/L) de fitoplancton para cada sitio de muestreo. 14

Figura 5: Abundancia total (células/mm^3) de fitobentos para cada sitio de muestreo..... 14

Figura 6: Abundancia promedio (células/L) de fitoplancton para cada sitio de muestreo 15

Figura 7: Abundancia promedio (células/mm^3) de fitobentos para cada sitio de muestreo. 16

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 8: Diversidad fitoplanctónica expresada como índice de Shannon (en unidades bits) para cada sitio de muestreo. 17

Figura 9: Diversidad fitobentónica expresada como índice de Shannon (en unidades bits) para cada sitio de muestreo. 18

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1. ESTUDIO LIMNOLÓGICO

Entre el 3 y el 5 de Septiembre del año 2008, se llevó a cabo un estudio limnológico para caracterizar los sistemas de lagunas La Punta-La Brava y Salada-Saladita-Interna, ubicados en el sector sur-este del Salar de Atacama. El estudio consideró la medición de distintos componentes ambientales de carácter biótico (i.e., fitoplancton, fitobentos, plantas acuáticas y zooplancton). Se prospectaron un total de 17 sitios distribuidos de manera amplia a lo largo de los dos sistemas de aguas superficiales.

La riqueza de plantas acuáticas fue muy baja, con ocurrencia de una única especie (*Ruppia filifolia*) localizada en escasos y aislados sitios.

En general, todos los indicadores comunitarios medidos para las componentes fitoplanctónica, fitobentónica y zooplancton mostraron un grado alto de uniformidad. Dado que estos componentes bióticos constituyen la base de la cadena trófica en estos sistemas de salmueras, es posible sugerir que los sistemas La Punta-La Brava y Salada-Saladita-Interna, cumplirían funciones ambientales equivalentes, al menos en lo que respecta a los parámetros medidos en el presente estudio. Sin embargo, por tratarse este de un estudio temporalmente acotado, no es posible generalizar estas conclusiones al resto del ciclo anual.

1.1. Introducción

Antecedentes Generales

A continuación se presentan los resultados de un estudio de campo realizado en los sistemas de lagunas existentes en el área de influencia del proyecto. El trabajo de terreno consideró la prospección limnológica de los sistemas de lagunas Salada-Saladita-Interna y La Punta-La Brava. El sistema Salada-Saladita-Interna en la práctica no posee una delimitación clara, pues se encuentra conectado superficialmente en un complejo entramado de canales que forma un continuo. Similares características posee el sistema conformado por las lagunas La Punta y La Brava, ubicada a 11 kilómetros al sur-oeste del sistema Salada-Saladita-Interna. Ambos sistemas de aguas proveen condiciones ambientales para sostener especies de avifauna, entre las que destacan los flamencos (*Phoenicopterus chilensis, Phoenicoparrus andinus, Phoenicoparrus jamesi*), especies que utilizan las lagunas y sus alrededores como zonas de nidificación (Sistema Salada-Saladita e Interna) y alimentación (ambos sistemas).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

El presente estudio forma parte de los trabajos de caracterización del área de influencia del proyecto, específicamente a la descripción y caracterización biótica en lo que refiere a la composición y abundancia de las componentes fito y zooplanctónicas

Objetivos

a) Describir la flora acuática de los sistemas Salada-Saladita-Interna y La Punta-La Brava en términos de las componentes fitoplanctónica, fitobentónica y de plantas acuáticas.

b) Describir la fauna acuática de los sistemas Salada-Saladita-Interna y La Punta-La Brava, en términos de su componente zooplanctónica.

1.2. Metodología

Área de Estudio

El área de estudio se localiza a aproximadamente 10 Km al oeste de la localidad de Peine, y distante aproximadamente 90 Km al sur del pueblo de San Pedro de Atacama. Esta zona corresponde al borde sur-este del Salar de Atacama en la zona de influencia del proyecto.

El estudio se focalizó en dos sistemas de lagunas ubicadas en el área de influencia del proyecto. Un grupo de aguas superficiales es conocido como sistema Peine compuesto por las lagunas Salada-Saladita-Interna. Dichas lagunas no existen como espejos de agua aislados, sino que forman un entramado interconectado superficialmente, creando un sistema continuo de aguas. El segundo grupo de lagunas se ubica aproximadamente a 11 Km al sur-oeste de este sistema, y lo conforman el continuo de lagunas La Brava y La Punta.

En consideración a los antecedentes expuestos en la Introducción, el diseño de muestreo consideró una disposición espacial amplia de sitios de muestreo, con el fin de obtener una caracterización representativa de las diversas condiciones bióticas de los sistemas de aguas en estudio. La ubicación definitiva de cada sitio de muestreo se definió en terreno, intentando abarcar la mayor extensión espacial posible considerando las restricciones de accesibilidad existentes, relacionadas con un número limitado de accesos habilitados. La Tabla 2 muestra las coordenadas geográficas (UTM) para los sitios muestreados. La toma de muestras se llevó a cabo entre los días 03-05 de Septiembre del año 2008.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Tabla 1: Localización geográfica de los sitios de muestreo. Las coordenadas están expresadas en unidades UTM (Datum WGS84)

Sistema	Estación	E	N
LP-LB	E1	576.677	7.375.474
	E2	576.782	7.375.494
	E3	576.921	7.375.432
	E4	577.034	7.375.354
S-S-I	E5	587.551	7.380.785
	E6	587.655	7.380.597
	E7	587.502	7.380.531
	E8	587.931	7.380.689
	E9	588.084	7.380.520
	E10	586.827	7.381.805
	E11	586.515	7.382.055
	E12	586.332	7.381.970
	E13	586.274	7.382.262
	E14	586.221	7.382.400
	E15	586.202	7.382.593
	E16	586.096	7.382.726
	E17	586.058	7.382.940

LP-LB = La Punta-La Brava; S-S-I = Salada, Saladita e Interna.

Caracterización Biótica

Fitoplancton y Fitobentos

La caracterización de la flora acuática se llevó a cabo por separado para las fases fitoplanctónica y fitobentónica. Esta última integra las fracciones epilítica y epipélica, cuya distinción en terreno resultó inconveniente.

Las muestras de fitoplancton se obtuvieron por medio filtrado de 10 L de agua a través de tamices de 150 µ de apertura de poro. Por su parte, para la obtención de fitobentos se recolectó 100 ml de sedimento. En ambos casos se preservaron las muestras con lugol y se transportaron al laboratorio para su identificación taxonómica (hasta el mayor nivel de resolución taxonómico posible). El reconocimiento se realizó por medio de observación bajo microscopio y conteo celular en cámara Sedgwick-Rafter (10 cm^2 de área y 1 ml de volumen). Los resultados obtenidos permitieron confeccionar un inventario taxonómico por sitio, estimándose así la riqueza taxonómica por zona de estudio. De igual forma, fue posible estimar la abundancia (total) promedio para esta componente biológica.

Plantas Acuáticas

El reconocimiento de plantas acuáticas se llevó a cabo *in situ* examinando los ejemplares presentes cada 2 m a lo largo de una transecto de 20 m de largo total, dispuesta en paralelo a

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

la línea de aguas. El reconocimiento se hizo hasta el mayor nivel de resolución taxonómico posible.

Zooplancton

En cada sitio de muestreo se filtró un volumen de 10 L de agua a través de filtros con apertura de poro de 125 y 250 µ. Las muestras obtenidas fueron preservadas en alcohol al 90% y transportadas al laboratorio para su identificación taxonómica hasta la mayor resolución taxonómica posible. Los resultados obtenidos permitieron confeccionar un inventario de especies por sitio, y estimar la riqueza taxonómica y abundancia (individuos/L) en cada sitio de muestreo.

1.3. Resultados

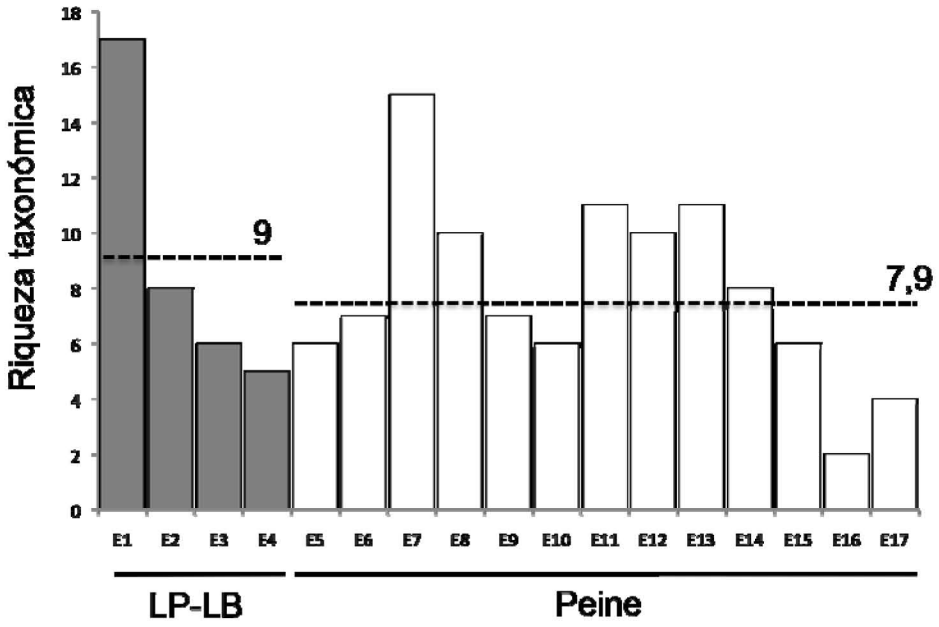
Caracterización Biótica

Fitoplancton y Fitobentos

Se identificó un total de 40 taxa fitoplanctónicos, y 46 taxa fitobentónicos. La Figura 1 muestra la riqueza taxonómica para la componente fitoplanctónica de los sistemas Salada-Saladita-Interna y La Punta-La Brava. Se aprecia un rango amplio de variación entre estaciones, con el mayor grado de heterogeneidad en el sistema La Punta-La Brava. Sin embargo, ambos sistemas no difieren significativamente en términos de su riqueza promedio (prueba *t*-student, $p > 0.05$).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 1: Riqueza taxonómica fitoplanctónica para los sistemas La Punta-La Brava .

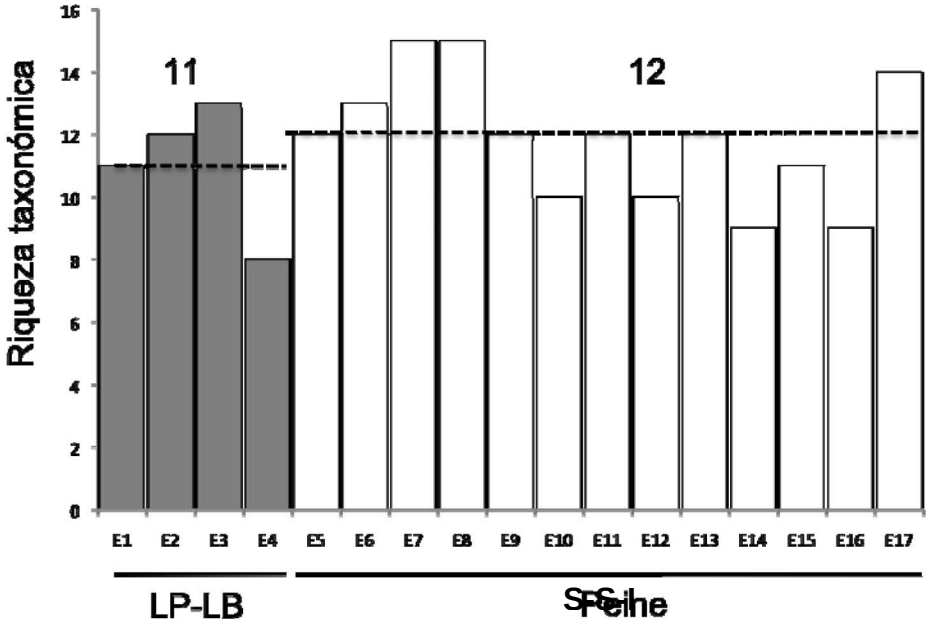


***** LP-LB en barras grises) y el sistema Salada-Saladita-Interna (S-S-I barras blancas**.** Líneas punteadas indican valores promedio de riqueza para cada sistema. No se detectó diferencia significativa entre grupos (prueba *t*-student para muestras con tamaños muestrales distintos, $p > 0,05$).

Por su parte la componente fitobentónica mostró valores levemente superiores a su contraparte planctónica, pero mostrando un patrón coherente de no diferenciación estadística entre sistemas lacustres (Figura 2).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 2: Riqueza taxonómica fitobentónica para los sistemas La Punta-La Brava.



* (LP-LB en barras grises) y el sistema Salada-Saladita-Interna (S-S-I en barras blancas). Líneas punteadas indican valores promedio de riqueza para cada sistema. No se detectó diferencias significativas entre grupos (prueba *t*-student para muestras con tamaños muestrales distintos, $p > 0{,}05$).

La desglosa la composición y abundancia (i.e., conteo celular) taxonómica por sitio de muestreo para la componente fitoplanctónica. Se aprecian diferencias de composición y dominancia entre sitios, siendo las especies *Achanthes minutissima*, *Craticula cuspidata*, *Denticula kuetzingii* y *Fragilaria brevistriata* las más ampliamente distribuidas, encontrándose en un 67% de los sitios muestreados. El total de especies encontradas correspondió a los grupos Bacillariophyceae (17 géneros), Cyanophyceae (1 género) y Chlorophyceae (2 géneros).

Tabla 2. Composición taxonómica del fitoplancton y abundancia (células/L) por sitio de muestreo para los sistemas de aguas La Punta-La Brava y Salada-Saladita-Interna

Especie	Sistema La Punta-La Brava					Sistema Salada-Saladita-Interna											
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
Achnanthes atacamae					360000		480000	240000									
Achnanthes brevipies											384000						
Achanthes minutissima						480000	125000	1200000	612000		192000	1500000	450000	540000	816000		525000
Amphora acutiuscula															204000		
Amphora atacamae	360000						500000	300000			96000	150000					
Amphora carvajaliana								450000	204000		48000		90000				
Amphora lineolata							250000										
Amphora sp			192858					150000					90000				
Anomoeoneis sphaerophora							125000										
Craticula cuspidata	225000	150000		120000	1800000		500000			720000	48000	750000	180000	360000	612000		
Cymbella pusilla														180000			
Denticula kuetzingii	1260000	30000	257144	240000			1250000			240000	48000	450000	180000	1080000	408000		
Entomoneis paludosa	90000																
Epithemia adnata	225000																
Fragilaria brevistriata	900000	900000	1157148	480000	360000					3600000		6000000	270000	1800000	816000		
Fragilaria pinnata				120000													
Fragilaria stuasorella	180000	660000															
Haloroundia speciosa	45000		128572			120000	375000		408000				180000	180000			
Mastoglia atacamae	360000				1080000	240000	625000	450000				1500000	180000				
Mastoglia brevistriata					720000												1050000

Especie	Sistema La Punta-La Brava					Sistema Salada-Saladita-Interna											
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
Mastoglia braunii		210000	257144	120000					204000				90000				
Mastoglia elliptica						240000	125000	150000	612000						204000		
Mastogloia sp		450000						450000									
Navicula atacamana											48000						
Navicula carvajaliana											48000						
Navicula cincta									204000								
Navicula cryptotenella	45000						375000	450000			48000			180000			
Nitzchia accedens	90000																
Nitzchia epitenoides	45000					480000	375000				144000	150000	360000				525000
Nitzchia liebetruthii		60000	321430					150000									
Nitzchia pellucida														360000			
Nitzchia pusilla	225000																
Nitzchia valdecostata	450000						250000										
Pinnularia vidris	90000									120000		150000	90000			2700000	
Planothidium chilense	180000	180000			720000		125000			240000							
Planothidium delicatum										360000						540000	
Planothidium sp	135000																
Stauroneis legreri						120000						150000					
Surirella sella						120000	375000				720000	150000					525000
Surirella ovata									204000								

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Por su parte, la Tabla 3 desglosa la composición y valores de abundancia para la componente fitobentónica de la flora acuática. Las especies *Amphora sp, Craticula cuspidata, Haloroundia speciosa, Mastoglia atacamae, Navicula cryptotenella, Navicula salinicola* y *Nitzchia epitenoides* fueron las especies con mayor distribución especial. Del total de especies, 18 géneros pertenecieron al grupo Bacillariophyceae, 3 géneros al grupo Cyanophyceae al igual que el grupo de las Chlorophyceae.

Tabla 3: Composición taxonómica del fitobentos y abundancia (células/mm3) por sitio de muestreo para los sistemas de aguas La Punta-La Brava y Salada-Saladita-Interna

Especie	Sistema La Punta-La Brava				Sistema Salada-Saladita-Interna												
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
Achnanthes atacamae		48	210		1440							438					
Achnanthes brevipies									576								
Achanthes minutissima				612	900	1560	3240	4800		1026	498					636	342
Amphora acutiuscula					180	312		2400				438		732	1104		
Amphora atacamae	1110					1872	2160	4800	576	1026	996				828		
Amphora acutiuscula				612			540		1728	342			258				342
Amphora carvajaliana	444							2400									
Amphora cofeaformis					180												
Amphora sp	222	48	210		180	312	1080				498	438			276	954	342
Anomoeoneis sphaerophora													516	1098			
Coconeis placentula								4800									
Craticula cuspidata		144	1260		180			4800		342	996	438	258		552	318	342
Cymbella pusilla					1800	312			1152								
Denticula kuetzingii	8880	240	840		360		540						1548	1830			3420
Denticula subtilis														366			

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

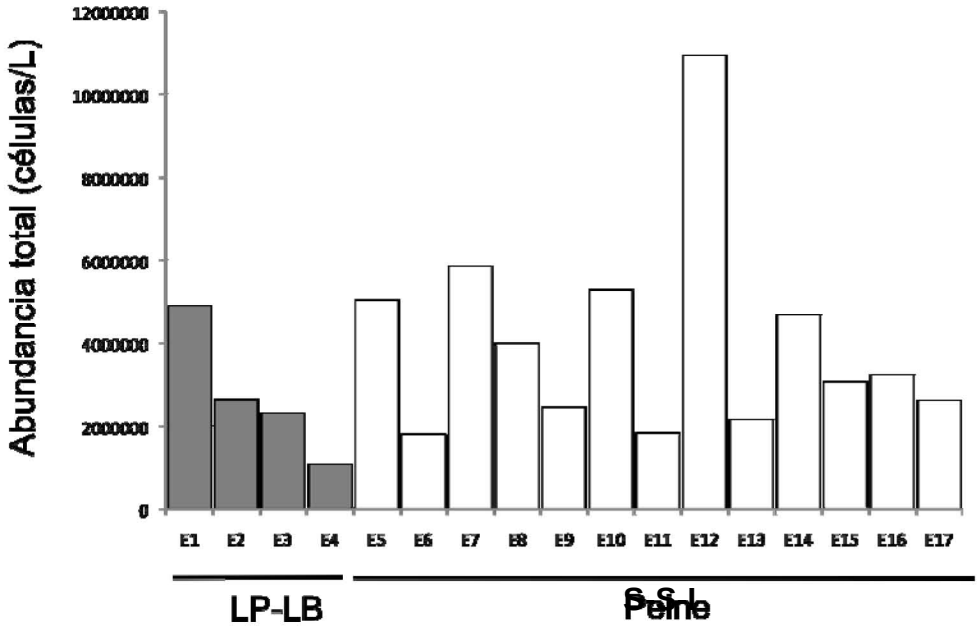
Especie	Sistema La Punta-La Brava				Sistema Salada-Saladita-Interna												
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
Entomoneis paludosa		48								342		438	258				
Epithemia adnata										342							
Fragilaria brevistriata	6660	480		612				2400				876	1548				3420
Fragilaria pinnata																	
Fragilaria stuasorella	1110		210				540										
Haloroundia speciosa	1110	48	630	1836			540	2400					774	1098	276		1026
Mastoglia atacamae		48	210			1872	5400	9600	1152	342	5976		258		552	1272	
Mastoglia braunii									576								
Mastoglia elliptica								2400	288								
Mastogloia sp						312		4800	288		498						342
Navicula atacamana		240	210				540										
Navicula brevipies			630													636	
Navicula cincta																	342
Navicula cryptotenella			210	612			540	2400		342	498	1752	516		276	318	342
Navicula luisii				1836													
Navicula salinicola	444					312	1080	4800	1728	1026	498	876		366	1104		
Navicula sp							540										
Nitzchia brevistriata			630		720	312	540								1656	954	
Nitzchia denticulum		48		612													
Nitzchia frustulum				612													
Nitzchia epitenoides	888	48				1248	1620		864		996		258				684

Especie	Sistema La Punta-La Brava				Sistema Salada-Saladita-Interna												
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
Nitzchia liebetruthii		144				312							258	732			
Nitzchia perminuta															276		
Nitzchia pusilla									288		996						342
Nitzchia salinicola					720												
Nitzchia spp			210														
Nitzchia valdecostata																	1026
Pinnularia vidris					360										276	318	
Planothidium chilense	1776				720			14400		2052		438					
Stauroneis legreri						312					498			366			
Surirella sella	1110		630			1248	1620	7200	864		1494	438	516	732		954	684

La Figura 3 muestra la abundancia total por sitio de muestreo, donde se aprecia algún nivel de variabilidad entre sitios que no produce diferencias significativas entre sistemas lacustres (prueba *t*-student para muestras con distinto tamaño muestreal, $p > 0{,}05$). La Figura 4 muestra la misma información para la componente fitobentónica, donde se aprecian mayores rangos de variabilidad entre estaciones, con notable máxima en la estación E8. Sin embargo, las comparaciones promedio entre estaciones no muestran diferencias estadísticamente significativas entre sistemas lacustres (prueba *t*-student para muestras con distinto tamaño muestreal, $p > 0.05$).

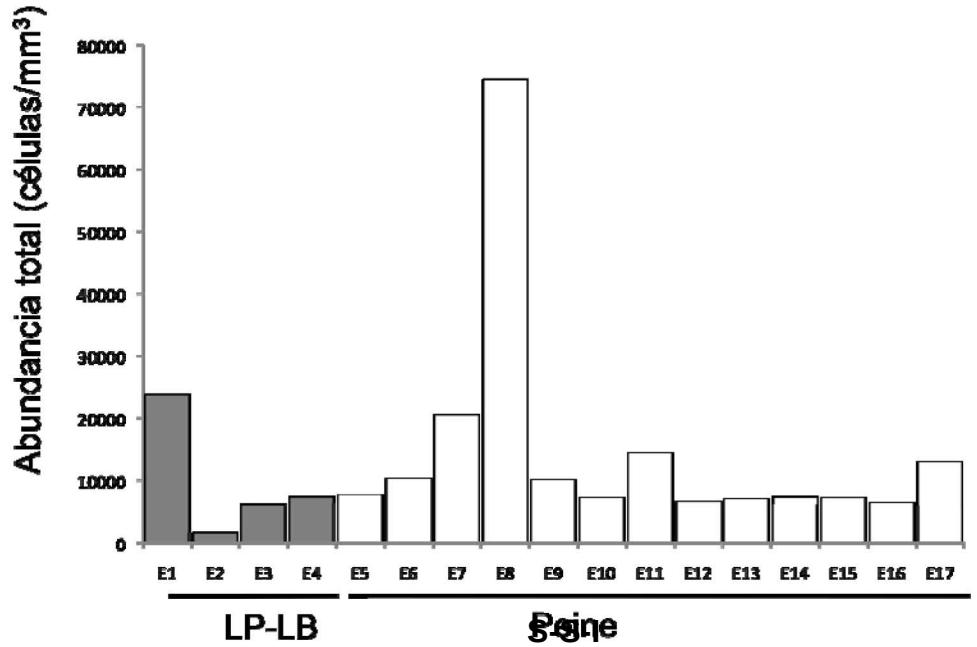
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 3: Abundancia total (células/L) de fitoplancton para cada sitio de muestreo.



* En barras grises se indican sitios pertenecientes al sistema de aguas La Punta-La Brava. En blanco los sitios de muestreo del sistema Salada-Saladita-Interna. No se detectaron diferencias significativas entre ambos sistemas (prueba *t*-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p > 0{,}05$).

Figura 4: Abundancia total (células/mm^3) de fitobentos para cada sitio de muestreo.

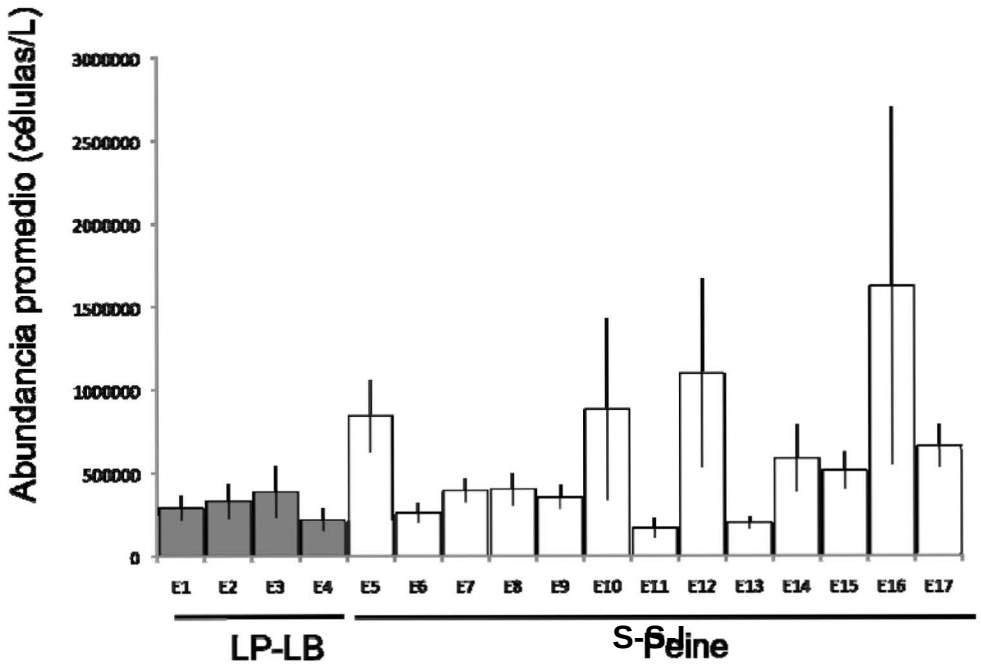


GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

*En barras grises se indican sitios pertenecientes al sistema de aguas La Punta-La Brava. En blanco los sitios de muestreo del sistema Salada-Saladita-Interna. No se detectaron diferencias significativas entre ambos sistemas (prueba *t*-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p > 0,05$).

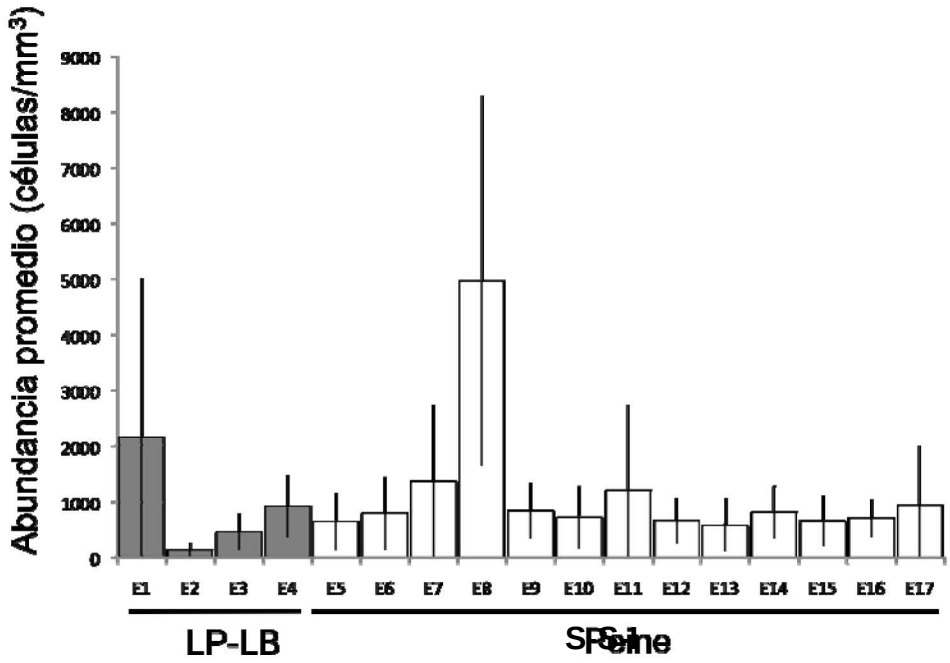
La Figura 5 exhibe la abundancia taxonómica promedio por sitio para el fitoplancton, la que bordea las 300.000 células por litro para el sistema La Punta-La Brava. Por su parte el sistema Salada-Saladita-Interna duplica esta cifra, la que en promedio supera las 600.000 células por litro, siendo las diferencias entre sistemas estadísticamente significativas (prueba *t*-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p < 0.05$). Por otra parte, la componente fitobentónica (Figura 6) también muestra un alto grado de variación entre sitios de muestreo, con valores máximos en la estación E8, coherente con los valores reportados para la abundancia total. Sin embargo, a pesar de las diferencias entre sitios, los valores promedio para cada sistema lacustre no difieren significativamente (prueba *t*-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p > 0,05$).

Figura 5: Abundancia promedio (células/L) de fitoplancton para cada sitio de muestreo



* En barras grises se indican sitios pertenecientes al sistema de aguas La Punta-La Brava. En blanco los sitios de muestreo del sistema Salada-Saladita-Interna. Existen diferencias significativas entre ambos sistemas (prueba t-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p < 0,05$).

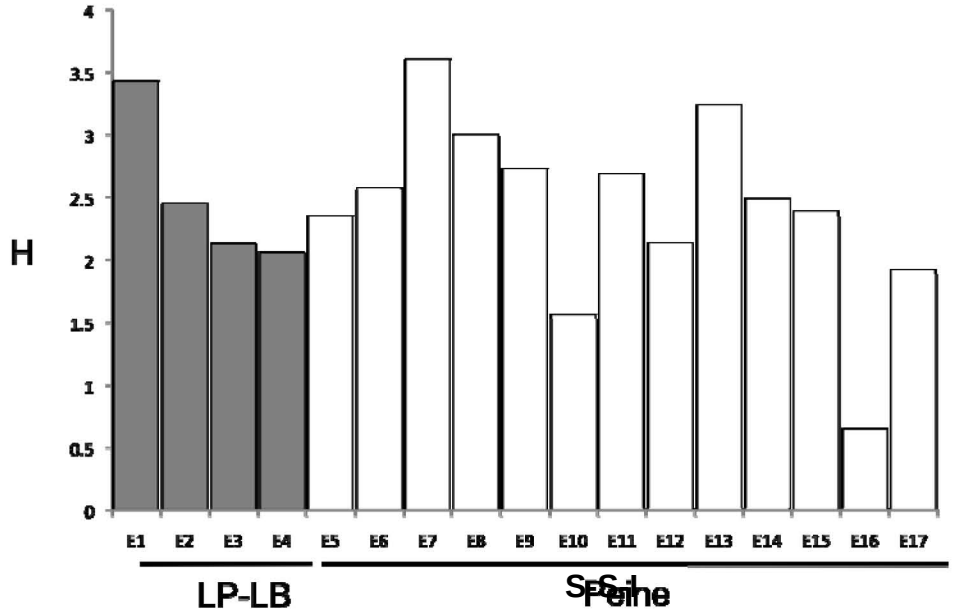
Figura 6: Abundancia promedio (células/mm^3) de fitobentos para cada sitio de muestreo.



* En barras grises se indican sitios pertenecientes al sistema de aguas La Punta-La Brava. En blanco los sitios de muestreo del sistema Salada-Saladita-Interna. No se detectaron diferencias significativas entre ambos sistemas (prueba *t*-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p > 0{,}05$).

Por último, la diversidad expresada como índice de Shannon se mostró uniforme a lo largo de los sitios de muestreo, sin generar diferencias significativas entre sistemas lacustres (Figura 7, prueba *t*-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p > 0.05$). Similares conclusiones estadísticas se obtuvieron para la componente fitobentónica (Figura 8), sin embargo la variabilidad entre sitios para el índice de Shannon fue mucho menor que para el caso del fitoplancton, reflejando una mayor estabilidad en las abundancias relativas de las comunidades residentes de fondo, en comparación con su contraparte de la columna de agua.

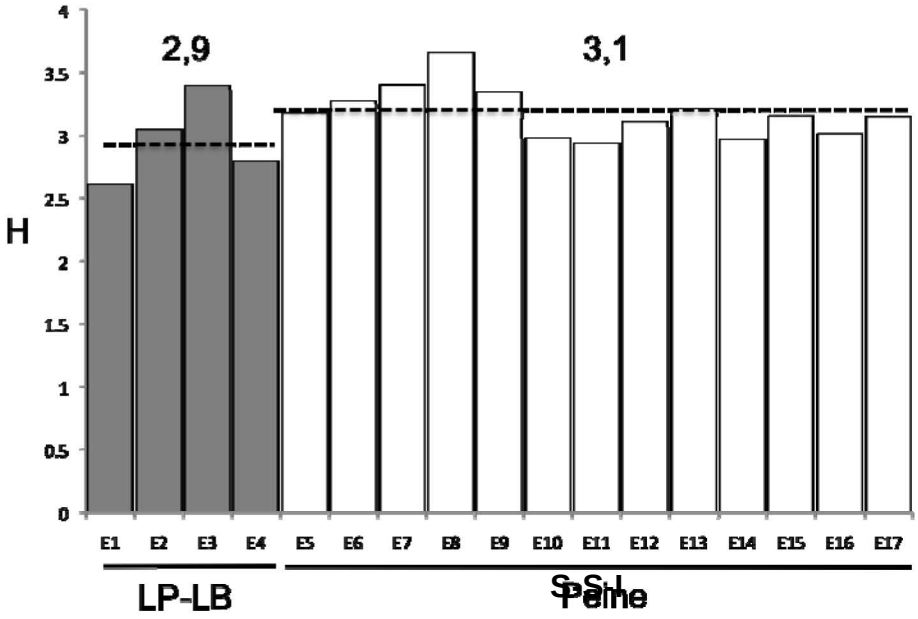
Figura 7: Diversidad fitoplanctónica expresada como índice de Shannon (en unidades bits) para cada sitio de muestreo.



* En barras grises se indican sitios pertenecientes al sistema de aguas La Punta-La Brava. En blanco los sitios de muestreo del sistema Salada-Saladita-Interna. No existen diferencias significativas entre ambos sistemas (prueba *t*-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p > 0,05$).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 8: Diversidad fitobentónica expresada como índice de Shannon (en unidades bits) para cada sitio de muestreo.



* En barras grises se indican sitios pertenecientes al sistema de aguas La Punta-La Brava. En blanco los sitios de muestreo del sistema Salada-Saladita-Interna. Líneas punteadas indican los valores promedio de cada sistema. No existen diferencias significativas entre ambos sistemas (prueba *t*-student para comparaciones con distinto tamaño muestreal, $p > 0,05$).

Plantas Acuáticas

Se detectó la presencia de una única especie de planta acuática en dos estaciones del sistema Salada-Saladita-Interna, en el sector de Laguna Salada (estaciones E5 y E8). La especie es *Ruppia filifolia*, perteneciente la familia Ruppiaceae (clase Monocotyledoneae), representada en Chile por dos especies *R. maritima* y *R. filifolia* cuyas distribuciones dependen de la salinidad del agua. Esta es una especie que no presenta problemas de conservación. Su cobertura en los sitios señalados fue baja, formando algunos parches discretos y aislados en pequeñas zonas de "bahías" sin continuidad distribucional fuera de su acotada área de ocurrencia.

Zooplancton

La Tabla 4 desglosa la composición taxonómica por sitio de muestreo para la componente zooplanctónica de la fracción de tamaño 125 - 250 µ. Los principales grupos presentes corresponden a Copépodos y Chironómidos, de los cuales la mayor representación numérica la mostró el grupo Ceratopogonoide. Para esta fracción zooplanctónica, la riqueza taxonómica fue baja, con un máximo de 4 taxa distintos observados en la estación E8.

Tabla 4: Composición taxonómica y abundancia (individuos/L) de la fracción zooplanctónica entre las 125 - 250

Especie	Sistema La Punta-La Brava							Sistema Salada-Saladita-Interna									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
Chiromidae																	
Ceratopogonoide													14,4	160	4		
Ephydridae	0,4							0,4									
Syrphidae								0,4									
Amphipodos																	
Hyalella sp.									0,4	0,4	8						
Copepodos																	
Cyclopoida	3,2	1,6	1,6	4	3,2	0,4		0,4	2,8				21,6	32			4,8
Metacyclops sp.												1,6		32			
Paracyclops																	4,8
Harpatacoidea		0,4	0,4	0,8	0,4											16	
Gastropoda																	
Littoridina sp.					0,4												
Ostracoda																	
Eucypris sp.		0,4	0,4			1,2	0,4	1,6					1,2				2,1

Un patrón similar se observó para la fracción zooplanctónica (Tabla 5) de tamaño superior a las 250 μ. Para esta fracción también se observó una dominancia numérica del grupo Ceratopogonoide, aunque la mayor ocurrencia espacial se verificó para el grupo Cyclopoida, con un 64% de representación en los sitios muestreados, seguidos del grupo Ceratopogonoide con un 50% de ocupación.

Tabla 5: Composición taxonómica y abundancia (individuos/L) de la fracción zooplanctónica superior a 250 μ

Especie	Sistema La Punta-La Brava							Sistema Salada-Saladita-Interna									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
Chiromidae																	
Dolichopodidae			0,4					2,4									
Ceratopogonoide	0,8							0,4	0,4	0,48			7,6	48	50		
Ephydridae								0,4									
Amphipodos																	
Hyalella sp.												8					
Copepodos																	
Cyclopoida	4,4	0,8			1,2	2	0,4	1,2	0,8	0,96							0,8
Harpatacoidea	0,4										4				1	4	
Ostracoda																	
Eucypris sp.						2	0,4	0,8									

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1.4. Conclusiones

En general los sistemas de aguas superficiales La Punta-La Brava y Saladita- Salada-Interna, muestran una alta heterogeneidad de pequeña escala, que resulta evidente al observar la alta variabilidad entre sitios para los distintos parámetros medidos.

En relación a la componente plantas acuáticas, sólo se verificó su presencia en dos de los sitios de estudio, correspondiendo a una sola especie, *Ruppia filifolia*. Su presencia sólo se registró de manera aislada en zonas cerradas (tipo "bahías") y en ningún caso se observó una distribución continua a lo largo de los cuerpos de aguas muestreados.

Al analizar los distintos indicadores comunitarios para las componentes fitoplanctónicas, fitobentónica y zooplanctónica (en dos categorías de tamaños), se puede concluir de manera similar a lo observado para los parámetros físico-químicos, que existe una gran heterogeneidad entre sitios. Sin embargo, a pesar de esta variabilidad, no se observaron diferencias significativas a nivel de sistemas (a excepción de la abundancia promedio de fitoplancton). Lo anterior sugiere que, a pesar de existir algún grado de estructuración ambiental diferencial entre los sistemas La Punta-La Brava y Salada-Saladita-Interna éste no determinaría cambios evidentes en los niveles de productividad primaria y secundaria de ambos sistemas en este muestreo. Por esta razón sería razonable suponer que ambos sistemas cumplen una función equivalente en términos de los servicios ecosistémicos prestados a la fauna (e.g., aves, reptiles y micromamíferos) que hacen uso de estos ambientes.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Anexo 5.6

Patrimonio Histórico- Cultural- Arqueológico

Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

ANEXO

LÍNEA BASE AMBIENTAL

Patrimonio Histórico-Cultural-Arqueológico

MARÍA LORETO VARGAS
Licenciada en Antropología mención en Arqueología
MSc. en Ciencias Biológicas
Universidad de Chile

1.1 Patrimonio Histórico-Cultural-Arqueológico

1.1.1 Aspectos Generales

El estudio del componente patrimonio histórico-cultural-arqueológico del Proyecto contempla la evaluación de los aspectos culturales y arqueológicos del área donde se emplazará dicho Proyecto y presentan los objetivos que guían este estudio en particular y los antecedentes legales que rigen este tipo de estudios, la metodología utilizada, resultados, conclusiones y recomendaciones para el titular del Proyecto.

Cualquier obra (vial, construcción, industrial, turística, etc.) que implique la intervención del suelo y/o subsuelo del territorio nacional, puede afectar parte del Patrimonio Cultural. Cabe señalar que, como parte del patrimonio cultural, los sitios arqueológicos en Chile, en su mayoría, están constituidos por restos que pueden parecer, a simple vista, de poca significancia pero que poseen gran valor científico y cultural para el estudio de la prehistoria del país.

La protección y estudio del Patrimonio cultural está sujeto a una serie de disposiciones legales enmarcadas en tres cuerpos legales. En primer lugar, la Ley de Monumentos Nacionales (Nº 17.288, del 4 de Febrero de 1970) y su reglamento (2 de Abril de 1991). Esta Ley declara que "Son monumentos nacionales y quedan bajo la tuición y protección del Estado, los lugares ruinas, construcciones u objetos de carácter histórico o artístico; los enterratorios o cementerios u otros restos de los aborígenes; las piezas u objetos antropo-arqueológicos, paleontológicos o de formación natural, que existan bajo o sobre la superficie del territorio nacional o en la plataforma submarina de sus aguas jurisdiccionales y cuya conservación interesa a la historia, al arte o a la ciencia;.. Su tuición y protección se ejercerá por medio del Consejo de Monumentos Nacionales en la forma que determina la presente ley." (Título I, artículo 1º). En sus artículos 11 y 12 se determina que "los monumentos nacionales quedan bajo el control y supervigilancia del Consejo de Monumentos Nacionales, sean de propiedad pública o privada y todo trabajo de conservación debe ser previamente autorizado". En el caso concreto de los sitios arqueológicos, en el artículo 21 se declara que "por el solo ministerio de la Ley son monumentos arqueológicos de propiedad del Estado los lugares, ruinas, yacimientos y piezas antropoarqueológicas que existan sobre o bajo la superficie del territorio nacional", sin declaración previa.

Todo Monumento Nacional es parte del Patrimonio cultural del país y por lo tanto cualquier

Los contenidos que soporta el presente documento constituyen Propiedad Intelectual queda prohibido su reproducción, total o parcial, por cualquier medio, en forma íntegra o extractada.

actividad que cause algún efecto sobre éste, debe ser notificada y evaluada por el Consejo de Monumentos Nacionales. En virtud de lo anterior, la Ley señala que “Toda persona natural o jurídica que al hacer excavaciones en cualquier punto del territorio nacional y con cualquier finalidad, encontrare ruinas, yacimientos, piezas u objetos de carácter histórico, antropológico, arqueológico o paleontológico, está obligada a denunciar inmediatamente el descubrimiento al Gobernador del Departamento, quien ordenará a Carabineros que se haga responsable de su vigilancia hasta que el Consejo se haga cargo de él” (Título V, artículo 26º).

Un segundo cuerpo legal corresponde a la Ley Nº 19.300/94, que en su artículo 1, letra k), define el impacto ambiental como: “la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.”. En el artículo 10 de esta ley se enumeran “i) Proyectos de desarrollo minero” y “o) Proyectos de saneamiento ambiental, tales como …sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos y sólidos” Por otra parte, en el artículo 11, establece que "los proyectos o actividades enumerados en el artículo precedente requerirán la elaboración de un estudio de impacto ambiental, si generan o presentan a lo menos, uno de los siguientes efectos, características o circunstancias: a) riesgo para la salud de las personas; b) efectos adversos significativos para los recursos naturales, c) reasentamiento de comunidades; d) alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos; e) localización próxima a población, recursos y áreas protegidas; f) alteración significativa del valor paisajístico o turístico de una zona, alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural."

El tercer cuerpo legal que rige este tipo de estudios es la Ley Sobre Pueblos Indígenas, Ley N° 19.253, que en su artículo 28 establece que "el reconocimiento, respeto y protección de las culturas e idiomas indígenas contemplará...f) la promoción de las expresiones artísticas y culturales y la protección del patrimonio arquitectónico, arqueológico, cultural e histórico indígenas".

1.1.2 Metodología

Para el presente estudio se trabajó con la metodología propia de la disciplina arqueológica, que consistió en dos etapas. La primera correspondió a la revisión de fuentes bibliográficas, como revistas científicas, informes de investigaciones y actas de congresos, referidas a la arqueología del área de estudio. Se visitó el sitio web del Consejo de Monumentos Nacionales (www.monumentos.cl), SEIA (www.seia.cl), SINIA (www.sinia.cl), el Catastro de sitios arqueológicos de la II Región (MOP, 1994) y las fichas de Monumentos Nacionales (Montandón & Pirotte, 1998) para detectar preliminarmente el registro de sitios en el área del Proyecto o en sectores cercanos a ésta.

La segunda etapa correspondió a la visita a terreno. La metodología utilizada para inspeccionar el área en cuestión consistió en la aplicación de la técnica de prospección arqueológica, recorriendo a pie el área de estudio. Debido a las características del suelo a observar, correspondiente a gruesas costras de sal, el recorrido se realizó siguiendo huellas existentes y transectas separadas por aproximadamente 100 metros. De esta forma se cubrió la totalidad de la superficie en cuestión

Se tomaron fotos, y se registraron las características del área de estudio en cuanto a las condiciones de:

Los contenidos que soporta el presente documento constituyen Propiedad Intelectual queda prohibido su reproducción, total o parcial, por cualquier medio, en forma íntegra o extractada.

- **Visibilidad** (grados de dificultad que presenta el medio ambiente para que un observador pueda detectar materiales culturales sobre o bajo el terreno),
- **Accesibilidad** (condiciones del área de estudio que facilitan o restringen la movilidad del observador para alcanzar un determinado lugar), y
- **Obstrusividad** (características propias de los materiales arqueológicos que los hacen más "sensibles" para ser descubiertos por una técnica específica).

Estas condiciones se refieren a variables independientes al control del arqueólogo, que pueden afectar los resultados del estudio y que deben ser consignadas. La etapa de terreno la desarrolló un arqueólogo en dos campañas independientes; una entre el 15 y 18 de Enero del 2007 y otra entre el 4 y 6 de Marzo del 2008.

1.1.3 Área de Influencia

El Proyecto se emplaza en el sector sur del Salar de Atacama, a unos 30 km al poniente del pueblo de San Roque de Peine, en la Comuna de San Pedro de Atacama, Provincia del Loa, II Región de Antofagasta. La superficie involucrada en el Proyecto alcanza un total de 544 hectáreas, en un sector adyacente a las pozas existentes. Este sector puede ser identificado como el área de influencia directa (AID) del Proyecto. Este sector fue prospectado en el marco de la línea de base del Patrimonio Histórico Cultural, el que se emplaza en la superficie del Salar, correspondiente a una costra gruesa y dura de sal. Cercano a la superficie del Proyecto se encuentra un cordón montañoso que ofrece una serie de pequeñas quebradas, pero que se encuentran fuera del área del proyecto.

Como área de influencia indirecta (AII) se definió un buffer de más de 500 metros a la redonda y las quebradas cercanas a fin de descartar la presencia de restos de valor patrimonial asociados.

1.1.4 Resultados

1.1.4.1 Revisión de antecedentes bibliográficos

El área de estudio se encuentra en una faja longitudinal, correspondiente al macizo andino, en la llamada Zona Norte Grande o Norte Árido. Las características climáticas de este sector, habrían permitido el desarrollo de grupos humanos desde períodos tempranos, quienes se mantenían gracias a los recursos que las zonas de los bofedales les entregaban (Santoro, 1989). La zona de interés del presente estudio corresponde a la Puna, compuesta por un primer piso prepuneño, donde se localizan los oasis de Atacama; un segundo piso correspondiente a valles serranos y por último el piso puneño propiamente tal o alta Puna. Esta zona se caracteriza por la presencia de contrastes en paisajes y recursos (Schiappacasse *et al.* 1989, Santoro, 1989), reflejados en oasis y valles asentados en medio del desierto absoluto.

Tempranamente, durante el llamado período Arcaico (9000 al 2000 a.C aproximadamente), la zona de la Puna habría sido ocupada por cazadores (de camélidos) andinos de alta movilidad interambiental, que fueron modificando este patrón para dar paso a actividades de mayor regularidad. Las primeras ocupaciones han sido registradas en el octavo milenio antes de la era Cristiana, en el sitio Tuina, al Oriente de la ciudad de Calama (Núñez, 1989; Santoro, 1989). A mediados del Arcaico comienza, además la ocupación intensiva del litoral, mientras hacia fines del mismo, los grupos cazadores recolectores comienzan a especializarse en el uso de determinados recursos entre el Salar de Atacama, valle, puna alta y pisos más bajos, organizados en eficientes circuitos de trashumancia estacional y con un creciente desarrollo de campamentos

Los contenidos que soporta el presente documento constituyen Propiedad Intelectual queda prohibido su reproducción, total o parcial, por cualquier medio, en forma íntegra o extractada.

semipermanentes, dando inicio a procesos locales de domesticación y asentamientos que dieron pie para las siguientes fases de desarrollo cultural. Para este período, en la zona de la Puna, se ha propuesto una secuencia, sobre la base de los estudios en sitios como Toquepala, Caru, Las Cuevas, Patapatane, Tojo-Tojone, Hakenasa, Tuina, San Lorenzo, Puripica, Tulán, Tambillo, Confluencia e Isla Grande. Éstos presentan evidencias que permiten representar diferentes patrones de asentamiento y de uso del espacio que establecen las características de la secuencia (Santoro, 1989).

El desarrollo de comunidades agrícolas fue el resultado de un proceso lento y gradual durante el cual se tendió a una concentración de los espacios habitacionales para proteger las áreas cultivadas, se gestaron actividades asociadas a la domesticación de animales (Benavente, 1982; Cartagena, 1993) y se dio paso al establecimiento inicial de una economía de carácter productivo. Esto trajo consigo el desarrollo más complejo de la cultura, traducido en la aparición de la cerámica y la metalurgia, perfeccionamiento tecnológico, surgimiento de nuevos cultos mágico-religiosos, complejidad social. Este período, llamado Formativo (aproximadamente del 2.000 a. C. – 500 d. C.), es un proceso de transición hacia el desarrollo de altas culturas. En la Zona del Norte Grande, específicamente en la puna atacameña, donde se localiza el presente estudio, este proceso comienza a manifestarse alrededor del 1.700 a. C., detectado en especial en los sitios de Tulán. En el sector de San Pedro de Atacama, este período se describe en las áreas de Solor, Quitor y Larrache, entre otros.

Hacia el final del período Formativo en el Norte Grande, alrededor del 500 d.C. se da inicio al llamado Período Medio, caracterizado por la presencia de la Cultura Tiwanaku, proveniente del lago Titicaca, que se extendió, estableciendo relaciones con las poblaciones locales. Estas relaciones, se manifiestan en una doble perspectiva: el aumento de los recursos ganaderos y tecnológicos y la presencia de elementos que resaltan el quehacer cultural e ideológico (Muñoz, 1989).

Tiwanaku estableció su orbita en el norte del país, especialmente en las regiones de Arica, Tarapacá y Atacama, y en gran parte de los Andes Centro Sur. El éxito de este establecimiento se basa en: a) la creación de una semiperiferia en la Región circuntiticaca, a objeto de asegurar una hegemonía en casa, conseguir una mayor fuerza de trabajo y procurarse un mayor volumen de bienes altiplánicos como la producción agropecuaria y artesanal (tubérculos, quinoa, tejidos, etc); b) la incorporación de una periferia en las tierras bajas situadas al Oriente y Occidente de la meseta (lago Titicaca), a fin de explotar directamente otras zonas ecológicas con una productividad diferente (maíz, coca, ají, calabaza, pescados y mariscos, etc.), pero complementaria a la del altiplano; y c) la utilización de una ultraperiferia en los distantes territorios del norte y del sur (donde se encuentra nuestra área de estudio) para obtener bienes (especialmente de prestigio) que circulaban por circuitos de intercambio más lejanos. Uno de los principales lugares hacia donde las autoridades altiplánicas volcaron sus ojos para proveerse de bienes suntuarios fue San Pedro de Atacama (Berenguer & Dauelsberg, 1989; www.precolombino.cl).

La disolución de la esfera de influencia de Tiwanaku comienza a percibirse a partir del 800 d.C y culmina aproximadamente entre el 1.000 y 1.100 d.C. En este lapso se da inicio al denominado Período Intermedio Tardío (1.000 – 1.400 d.C.), en el que se cristalizan los llamados Desarrollos Regionales del Norte Grande. Éste implica la presencia de nuevas influencias culturales que se definen diferencialmente en el área. Se establece una dinámica de interacción de varias esferas o grupos culturales que probablemente se relacionaban en términos de complementariedad económica, con establecimiento de ferias, tráfico de caravanas, entre otros (Schiappacasse et al.,

Los contenidos que soporta el presente documento constituyen Propiedad Intelectual queda prohibido su reproducción, total o parcial, por cualquier medio, en forma íntegra o extractada.

1989). Este período se caracteriza además, por la existencia de un patrón arquitectónico de tipo defensivo, conocido como pukara (por ejemplo pukaras de Chiu-Chiu, Lasana, Turi y Quitor), una alta movilidad interregional y rasgos funerarios y cerámicos más simples (Schiappacasse et al., 1989).

Con posterioridad a los Desarrollos Regionales, en el Norte Grande se establece el Período Tardío, caracterizado por la presencia del Tawantinsuyu o el Inca, cuyo dominio fue más bien de carácter indirecto, a través de los reinos altiplánicos. Su corta permanencia en el área, de no más de 60 años, debido a la conquista hispana, dejó una significativa impronta cultural.

En un marco más local del desarrollo de la arqueología del área de estudio, se destaca la presencia de más de un centenar de sitios de valor arqueológico en el sector de Tulan, desde el período Arcaico, con fechas de 4990±110 a.p. (Santoro, 1989). Estos sitios se encuentran al oriente del Salar a más de 25 km. Cabe señalar que no se registran otros antecedentes de sitios u otro tipo de hallazgos en zonas aledañas al área del Proyecto. La revisión de fuentes documentales provenientes del SEIA, de investigaciones recientes y de sitios como el SINIA y el Consejo de Monumentos Nacionales, no arrojó nuevos antecedentes sobre el patrimonio cultural en el área del Proyecto. La información del Catastro del MOP (1994) da cuenta de una gran riqueza de sitios asociados al Salar de Atacama (por ejemplo, el tambo Incaico de Peine, sitio de Tilomonte, entre otros), no obstante el más cercano se encuentra a más de 20 km del área de estudio.

1.1.4.2 Antecedentes de otros Monumentos

El registro de Monumentos de la comuna de San Pedro se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1: Registro de Monumentos de la comuna de San Pedro.

Nombre	Tipo	Ubicación	Decreto
Valle de la Luna y parte de la Sierra de Orbante	Santuario de la Naturaleza	15 km al NW de San Pedro	37 del 7/01/1982
Pueblo de San Pedro de Atacama	Zona Típica	98 km al interior de Calama	2344 del 28/03/1980
Sitio de Larrache	Monumento arqueológico	Callejón de Larrache	Ley 17.288
Tambo Incaico de Peine	Monumento arqueológico	Pueblo de Peine	Ley 17.288
Iglesia de San Pedro de Atacama	Monumento Histórico	Plaza de san Pedro de Atacama	5058 del 6/07/1951
Campanario de Toconao	Monumento Histórico	Pueblo de Toconao	5058 del 6/07/1951
Ruinas de la Capilla de misiones de Peine Viejo	Monumento Histórico	Pueblo de Peine	5058 del 6/07/1951
Pueblo Antiguo de Peine	Monumento Histórico	102 km al Sur de San Pedro	36 del 7/01/1982
Pukara de Quitor	Monumento Histórico	3 km al NW de San Pedro	36 del 7/01/1982

Fuente: Elaboración propia.

Todos estos monumentos se encuentran alejados del área de emplazamiento del Proyecto.

Los contenidos que soporta el presente documento constituyen Propiedad Intelectual queda prohibido su reproducción, total o parcial, por cualquier medio, en forma íntegra o extractada.

1.1.4.3 Resultados de la Inspección en Terreno

En cuanto a la inspección en terreno, no se registró la presencia de restos arqueológicos ni paleontológicos en la superficie observada. De la misma manera, en el área directa del Proyecto, no existe otro tipo de Monumentos Nacionales (Zonas Típicas, Santuarios de la Naturaleza, Monumentos Históricos, Monumentos Públicos).

La superficie observada corresponde a una costra gruesa de sal, sobre la que no es posible desplazarse con facilidad, constituyendo un peligro en caso de caída. Esta condición, sumada a la ausencia de agua para el consumo humano, la falta de recursos mínimos para el asentamiento humano como sectores abrigados, alimentos y materias primas, permite estimar una nula probabilidad de evidencias de restos de valor arqueológico y patrimonial cultural en la superficie observada.

Vista general de tipo de ambiente, dominante en el área prospectada

Fuente: Elaboración Propia.

Las condiciones del área para las actividades de prospección arqueológica, dan cuenta de una superficie abierta, sin cobertura vegetacional y suelo desnudo en su totalidad. Estas características permitieron realizar una buena observación del suelo. De este modo, las condiciones de acceso, visibilidad y obstrusividad son buenas para la eventual detección de restos culturales.

Dentro del marco de la inspección del patrimonio, se recorrió el sector de quebradas asociadas al área de estudio, sin encontrar restos o evidencias de valor arqueológico.

1.1.5 Conclusiones

De acuerdo con los resultados del presente estudio del área del Proyecto sobre Patrimonio Histórico Cultural, se concluye que, tanto la revisión bibliográfica como la inspección visual de las campañas de Enero del 2007 y Marzo del 2008, no arrojan evidencias positivas en cuanto a la presencia de restos arqueológicos y/o paleontológicos en la superficie observada, así como

Los contenidos que soporta el presente documento constituyen Propiedad Intelectual queda prohibido su reproducción, total o parcial, por cualquier medio, en forma íntegra o extractada.

tampoco en cuanto a monumentos nacionales de otro tipo (Monumentos Históricos, Zonas Típicas, Santuarios de la Naturaleza).

No obstante lo anterior, ante la eventual aparición de restos arqueológicos durante la ejecución de las obras, Sociedad Chilena de Litio Ltda. dará aviso a las autoridades competentes y al Consejo de Monumentos Nacionales, en virtud del artículo 26° de la ley N° 17.288.

2.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benavente, M. A. (1982). ChiuChiu 200: Una comunidad pastora temprana en la Provincia del Loa (II Región). Actas del IX Congreso Nacional de Arqueología Chilena. La Serena.

Berenguer, J. & Dauelsberg, P. (1989). El Norte Grande en la órbita de Tiwanaku (400 a 1.200 d.C.). En: Prehistoria Chilena (Serie Culturas de Chile). Ed. Andrés Bello.

Cartajena, I. (1993). Identificación de restos de camélidos sudamericanos en yacimientos arqueológicos. Tesis de Licenciatura, Santiago, U. de Chile.

Consejo de Monumentos Nacionales. (1998). Monumentos Nacionales de Chile 225 fichas. Consejo de Monumentos Nacionales – Ministerio de Educación, Santiago de Chile.

Montandón, R. & Pirotte, S. (1998). Monumentos Nacionales de Chile, 225 Fichas. Dirección de Arquitectura, Ministerio de Obras Públicas, Consejo de Monumentos nacionales, Ministerio de Educación.

Moraga, A., Chong, G., Fortt, M. A. y Henríquez, H. (1970). Informe geológico del Salar de Atacama. Primer Congreso Latinoamericano de Geología. Lima, Perú. Noviembre, 1970.

Muñoz, I. (1989). El período Formativo en el Norte Grande (1.000 a.C. a 500 d.C.). Prehistoria Chilena (Serie Culturas de Chile). Ed. Andrés Bello.

Núñez, L. (1989). Hacia la producción de alimentos y la vida sedentaria (5.000 a.C. a 900 d.C.). En: Prehistoria Chilena (Serie Culturas de Chile). Ed. Andrés Bello.

Santoro, C. (1989). Antiguos cazadores de la puna (9.000 al 6.000 a.C.). En: Prehistoria Chilena (Serie Culturas de Chile). Ed. Andrés Bello.

Schiappacasse, V., Castro, V. & Niemeyer, H. (1989). Los Desarrollos Regionales en el Norte Grande (1.000 a 1.400 d.C.). En: Prehistoria Chilena (Serie Culturas de Chile). Ed. Andrés Bello.

UTMA-MOP. (1994). Estudio de Ubicación de Restos Arqueológicos en las Cuencas Priorizadas. Ministerio de Obras Públicas. Catastro II Región. CEC Ltda. Santiago de Chile.

www.monumentos.cl
www.precolombino.cl
www.sag.gob.cl
www.seia.cl
www.sinia.cl

Los contenidos que soporta el presente documento constituyen Propiedad Intelectual queda prohibido su reproducción, total o parcial, por cualquier medio, en forma íntegra o extractada.

Anexo 5.7

Análisis de Paisaje

Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

INDICE

1. METODOLOGÍA 1

1.1. Análisis de Visibilidad 1
1.1.1 Cuenca visual 1
1.2. Unidades de Paisaje 2
1.3. Inventario de Recursos 2
1.4. Calidad Visual 3
1.5. Fragilidad visual 4

2. RESULTADOS 7

2.1. Reserva Nacional Los Flamencos 7
2.2. Zona de Interés Turístico Nacional 11
2.3. Análisis de visibilidad 11
2.4. Unidades de paisaje 14
2.5. Inventario de recursos 14

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1. METODOLOGÍA

Para el análisis del paisaje se utilizó un método indirecto a través de componentes del paisaje. La metodología de trabajo buscó definir y analizar las variables que influyen y/o configuran el paisaje vinculado al proyecto.

Por otro lado, el método utilizado incluyó un análisis de visibilidad, considerándose las cuencas visuales proyectadas. Además, se precisaron unidades de paisaje (UP), a las que se les realizó un inventario de recursos y se les valoró la calidad y fragilidad visual.

1.1. Análisis de Visibilidad

La accesibilidad visual a una porción del territorio tiene directa relación con los elementos físicos (relieve) y bióticos (vegetación) presentes en el paisaje y cómo éstos se transforman en barreras visuales para los usuarios del recurso. A esto, se deben sumar las posibilidades de accesibilidad física (distancia) que tengan los observadores a las distintas porciones del territorio.

El análisis de visibilidad se define como un análisis espacial del lugar, tomando en consideración sus formas, vistas, etc. Para ello, se consideran puntos relevantes de observación y en los que el flujo de observadores es mayor, y se construyen sus respectivas cuencas visuales.

1.1.1 Cuenca visual

La cuenca visual de un punto se define como la zona que es visible desde ese punto, vale decir, corresponde a la superficie observada desde diversos puntos, los que permiten definir un área espacialmente autocontenida. Las cuencas visuales se pueden analizar de acuerdo a diferentes características visuales:

- Forma: se relaciona con su forma geométrica, la cual está delimitada visualmente, pudiendo ser circulares, alargadas o irregulares.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

- Tipos de vistas: se relaciona con las vistas obtenidas de la cuenca, pudiendo ser panorámicas (límites lejanos y vista generalizada del lugar), focalizadas (generalmente son cuencas cerradas, donde la vista se enfoca directamente hacia un punto específico) o cerradas (se puede observas primeros y segundos planos).

- Tamaño de la cuenca: cantidad de superficie vista desde el punto de observación.

- Compacidad: puede ser mayor o menor, dependiendo de la cantidad de zonas ocultas.

1.2. Unidades de Paisaje

Las Unidades de Paisaje (UP) corresponden a divisiones espaciales que cubren el territorio a estudiar. Cada unidad es una agregación ordenada y coherente de las partes elementales de un paisaje, y debieran ser lo más homogéneas posible en relación a su valor de paisaje. Las UP se establecieron en base a los elementos considerados como definitorios dentro del paisaje, proponiéndose como componente central la morfología del terreno. A cada UP definida, se le evaluó tanto su calidad visual, como su fragilidad visual.

1.3. Inventario de Recursos

Para cada una de las UP definidas se realizó un inventario de recursos, analizándose los siguientes aspectos:

- **Áreas de Interés Escénico:** Se definen como zonas o sectores que por sus características (formas, líneas, texturas, colores, etc.) otorgan un importante grado de valor estético al paisaje.

- **Hitos Visuales de Interés:** Son elementos puntuales que aportan belleza al paisaje de forma individual, y que por su dominancia en el marco escénico, adquieren significancia para el observador.

- **Cubierta Vegetal Dominante:** Se refiere al tipo de cobertura vegetal visualmente dominante en un área determinada.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

- **Presencia de Fauna:** Se refiere a todas las poblaciones animales, exóticas o autóctonas, que generen una dinámica interesante y que aporten a la calidad escénica del paisaje.

- **Cuerpos de Agua:** Se define como aquellos cuerpos de agua que poseen una significancia visual en el observador.

- **Intervención Humana:** Son los diversos tipos de estructuras realizadas por el hombre, ya sean puntuales, extensivas o lineales. (caminos, líneas de alta tensión, urbanización, áreas verdes, etc.).

- **Áreas de Interés Histórico:** Son todas las áreas que posean una carga histórica o patrimonial relevante para un país, región o ciudad (zonas donde se hallan registrado batallas importantes, asentamientos de pueblos originarios, etc.)

- **Áreas singulares**: Corresponden a aquellos sectores que conforman el paisaje y dominan por sus características únicas y distintivas, aportando positivamente en la apreciación de la estética del territorio.

1.4. Calidad Visual

La calidad visual tiene relación con el valor intrínseco que posee cierto paisaje. Se determina a través de la evaluación estética de los elementos que conforman el paisaje, y que en conjunto permiten definir las características y potencialidades que presenta el territorio. En la Tabla 1 se presentan los criterios utilizados para evaluar la calidad visual.

Tabla 1: Criterios para evaluar la Calidad Visual de una unidad de paisaje.

Elemento Valorado	Calidad Visual Alta	Calidad Visual Media	Calidad Visual Baja
Morfología o Topografía	Pendiente de más de un 30%, estructuras morfológicas muy modeladas y de rasgos dominantes y fuertes contrastes cromáticos. Afloramientos rocosos.	Pendientes entre 15% y 30 %, estructuras morfológicas con modelados suaves u ondulados.	Pendientes entre 0% y 15% dominancia del plano horizontal de visualización, ausencia de estructuras de contraste o jerarquía visual.
Fauna	Presencia de fauna nativa permanente. Áreas de nidificación, reproducción y alimentación.	Presencia de fauna nativa esporádica dentro de la unidad, sin relevancia visual, presencia de	No hay evidencias de presencia de fauna nativa. Sobrepastoreo o crianza masiva de animales

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Elemento Valorado	Calidad Visual Alta	Calidad Visual Media	Calidad Visual Baja
		animales domésticos (ganado).	domésticos.
Vegetación	Presencia de masas vegetales de alta dominancia visual. Alto porcentaje de especies nativas, diversidad de estratos y contrastes cromáticos.	Presencia de vegetación con baja estratificación de especies. Presencia de vegetación alóctona. Masas arbóreas aisladas de baja dominancia visual.	Vegetación con un cubrimiento de suelo bajo. Inferior al 50 %. Presencia de áreas con erosión evidente y sin vegetación. Dominación de vegetación herbácea, ausencia de vegetación nativa.
Formas de Agua	Presencia de cuerpos de agua con significancia en la estructura global del paisaje	Presencia de cuerpos de agua pero sin jerarquía visual	Ausencia de cuerpos de agua
Acción Antrópica	Libre de actuaciones antrópicas estéticamente no deseadas.	La calidad escénica esta modificadas en menor grado por obras, no añaden calidad visual	Modificaciones intensas y extensas que reducen o anulan la calidad visual del paisaje.
Variabilidad Cromática	Combinaciones de color intensas y variadas contrastes evidentes entresuelo, vegetación roca y agua.	Alguna variedad e intensidad en color y contrastes del suelo, roca y vegetación, pero no actúa como elemento dominante.	Muy poca variación de color o contraste, colores homogéneos continuos
Singularidad o rareza	Paisaje único, con riqueza de elementos singulares	Característico, pero similar a otros de la región.	Paisaje común, inexistencia de elementos únicos o singulares.

Fuente: SERNATUR[1], sacado del Modelo Rojas y Kong (1998).

1.5. Fragilidad visual

La fragilidad visual se refiere al grado de deterioro que el paisaje experimentaría ante la ocurrencia de ciertas acciones. Determinar la fragilidad es una forma de establecer el grado de vulnerabilidad de un espacio territorial a la intervención, cambio de usos y ocupaciones que se pretendan desarrollar en él. Mientras la calidad visual de un paisaje es una cualidad intrínseca del territorio, la fragilidad visual no lo es pues dependerá del tipo de proyecto que se pretenda desarrollar.

[1] Servicio Nacional de Turismo. 2006. Turismo y Paisaje: una aproximación al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Santiago, Chile. 117p.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Para evaluar la fragilidad visual del paisaje se propone un método que considera tres grupos de variables:

- Factores biofísicos, derivados de los elementos característicos de cada punto. Forman parte de este grupo la pendiente, orientación y vegetación, considerada en diversos aspectos (altura, densidad, variedad cromática, estacionalidad). La integración de estas variables origina un único valor que mide la fragilidad visual de un punto.

- Factores de visualización, incluyen los parámetros de cuenca visual o superficie vista desde cada punto, tanto en magnitud como en forma y complejidad. Al integrar estas variables se agregan a un único valor que determina la fragilidad visual del entorno del punto.

- Factores histórico-culturales, intentan explicar el carácter y las formas de cierto paisaje en función del proceso histórico que los ha forjado, y son determinantes de la compatibilidad de forma y función de futuras actuaciones con el medio.

La evaluación de la fragilidad visual de las unidades de paisaje definidas, se realizó a partir de una matriz paramétrica en base al modelo de Rojas y Kong (1998) que se presenta a continuación (Tabla 2).

Tabla 2: Criterios para evaluar la Fragilidad Visual de una unidad de paisaje.

Factores	Elementos de influencia	Fragilidad Visual Alta	Fragilidad Visual Media	Fragilidad Visual Baja
Biofísicos	Pendiente	Pendiente de más de un 30%, terrenos con un dominio del plano vertical de visualización	Pendientes entre un 15% y un 30%, terrenos con modelados suaves y ondulados	Pendientes entre 0 a 15%, terrenos con plano horizontal de dominancia visual.
	Vegetación (densidad)	Grandes espacios sin vegetación. Agrupaciones aisladas. Dominancia estrata herbácea	Cubierta vegetal discontinua. Dominancia de estrata arbustiva o arbórea aislada	Grandes masas boscosas 100% de ocupación del suelo
	Vegetación (altura)	Vegetación arbustiva o herbácea, no sobrepasa los 2 metros de altura.	No hay gran altura de las masas (-10 metros) baja diversidad de estratos	Gran diversidad de estratos. Alturas sobre los 10 metros.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Factores	Elementos de influencia	Fragilidad Visual Alta	Fragilidad Visual Media	Fragilidad Visual Baja
Visualización	Tamaño de la cuenca visual	Visión de carácter cercana o próxima de 0 a 1000 metros. Dominio de los primeros planos	Visión media 1000 a 4000 metros. Dominio de los planos medios de visualización.	Visión de carácter lejano a zonas distantes > a 4000 metros.
	Forma de la cuenca visual	Cuencas alargadas generalmente unidireccionales en el flujo visual	Cuencas irregulares mezcla de ambas categorías	Cuencas regulares extensas generalmente redondeadas
	Compacidad	Vistas panorámicas abiertas. El paisaje no presenta elementos obstruyendo los rayos visuales	El paisaje presenta zonas de menor incidencia visual, pero en un bajo porcentaje.	Vistas cerradsa u obstaculizadas. Presencia constante de zonas sombras o de menor incidencia visual
Singularidad	Unicidad del paisaje	Paisajes singulares, con riqueza de elementos únicos y distintivos	Paisaje de importancia visual pero habituales sin presencia de elementos singulares	Paisaje común sin riqueza visual o muy alterado.
Accesibilidad	Visual	Percepción visual alta, visible a distancia y sin mayor restricción	Visibilidad media, ocasional, combinación de ambos niveles.	Baja accesibilidad visual, vist repentinas, escasas o breves.

Fuente: SERNATUR[2], sacado del Modelo Rojas y Kong (1998).

[2] Servicio Nacional de Turismo. 2006. Turismo y Paisaje: una aproximación al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Santiago, Chile. 117p.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

2. RESULTADOS

El paisaje propio del área del proyecto se presenta de tipo panorámico tridimensional y con bordes definidos, dominando las texturas de grano fino (área del salar). Los planos de visibilidad se caracterizan por ser amplios (>2.000 m), con dominio de planos lejanos de visualización (ej. Cordillera de Los Andes). Por otro lado la accesibilidad visual al área desde las rutas de acceso, y específicamente al sitio evaluado, es importante. Es decir, los observadores o usuarios potenciales de este paisaje tienen acceso visual a él. El paisaje local se presenta sin rasgos sobresalientes respecto de su entorno y componentes, como el relieve, la vegetación, colores y texturas.

En general el paisaje presenta características que evidencian un intenso y extenso régimen de perturbaciones de origen antrópico, debido principalmente a la remoción total o parcial de los componentes originales del paisaje. El área presenta un marcado carácter minero, condición que es común para gran parte del territorio correspondiente al Salar de Atacama. A esto se le debe sumar la inserción en el paisaje de elementos construidos como caminos y construcciones de todo tipo. En consecuencia, el paisaje en evaluación presenta un importante nivel de modificación de sus elementos y atributos originales.

Cabe señalar que a aproximadamente 27 km en línea recta del área del proyecto, se sitúa la Reserva Nacional Los Flamencos (R.N. Los Flamencos).

2.1. Reserva Nacional Los Flamencos

Esta reserva fue creada el año 1990, pasando a formar parte del Sistema Nacional de las Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), hoy día administrado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Se localiza en la comuna de San Pedro de Atacama, a 27 km al Sur de San Pedro de Atacama y a 127 km al Noreste de Calama.

De acuerdo a CONAF, la R.N. Los Flamencos recibió durante el año 2007 un total de 146.262 visitantes, siendo el 72% de origen extranjero.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

La reserva cuenta con una superficie de 73.986 há., y se encuentra dividida en siete sectores, de los cuales tres se ubican en el altiplano, uno en la Cordillera de la Sal, dos en el Salar de Atacama y uno corresponde al Tambillo:

- Salar de Tara y Aguas Calientes
- Salar de Pujsa
- Laguna Miscanti y Miñiques
- Salar de Atacama (sector Soncor)
- Salar de Atacama (sector Laguna Aguas de Quelana)
- Valle de la Luna
- Tambillo

Como se ve en la Figura 1, el sector Soncor y el sector Aguas de Quelana son los más cercanos al área del proyecto, y se describen a continuación.

El sector Soncor se sitúa a 62 km al sur de San Pedro de Atacama y a 24 km del pueblo de Toconao. Se destaca la presencia de las lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros. Entre la fauna que es posible encontrar en este sector, se destaca al flamenco (andino y chileno), gaviota andina, chorlo de la puna, playero de Baird, colegial, pequén, guallata, caití, colegial, pequén, entre otros. Con respecto a la vegetación, ésta se encuentra en las riberas de los cuerpos de agua y está compuesta principalmente por grama salada, brea y cachiyuyo. Cabe mencionar que este sector es un importante centro de nidificación del flamenco andino.

Actualmente, esta división cuenta con una superficie de 5.017 há y su administración está en manos de la comunidad de Toconao.

El sector Aguas de Quelana se ubica a unos 10 km al sur del cruce que lleva a la laguna Chaxa, y consiste en un conjunto de lagunas de poca profundidad, llamadas Burros Muertos, que se interconectan por medio de canales naturales.

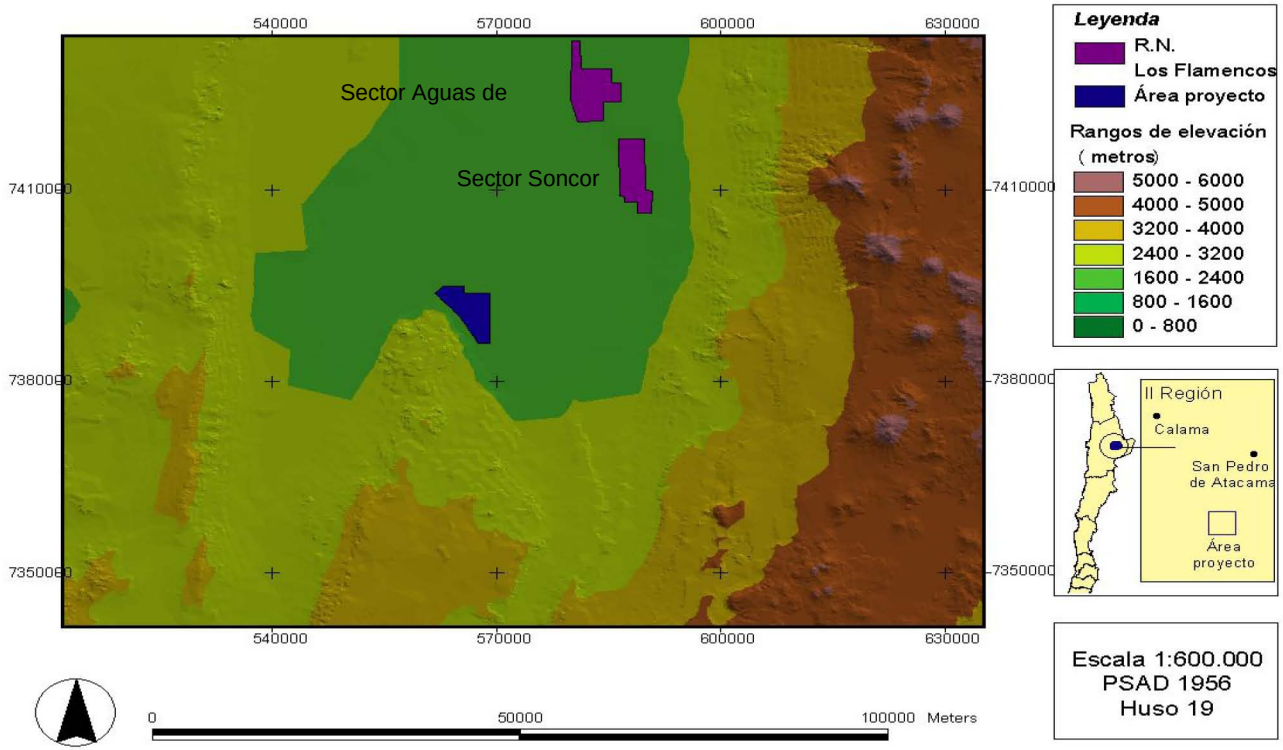
Dentro de la vegetación presente en este sector se destaca el cachiyuyo, grama salada y brea. En cuanto a la fauna, es posible encontrar tres especies de flamencos: chileno, james y andino,

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

además de aguiluchos, chorlos de la puna, golondrinas, gaviotas andinas, pequenes, entre otros.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 1: Ubicación de la Reserva Nacional Los Flamencos



Fuente: Elaboración propia.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

2.2. Zona de Interés Turístico Nacional

El área del Proyecto forma parte de la Zona de Interés Turístico Nacional (ZOIT) Área San Pedro de Atacama – Cuenca Geotérmica del Tatio (2002) (ver Sección 5.6.2 Zona de Interés Turístico del Capítulo 5 Línea de Base).

2.3. Análisis de visibilidad

Para el análisis de visualización se escogieron dos rutas de acceso cercanas al área del proyecto: la ruta B-385 (Baquedano-Tilopozo) y la ruta B-355 (Toconao-Peine). En la Tabla 1 se presentan los puntos utilizados para la construcción de las cuencas visuales desde ambas rutas.

Posteriormente, y a través de las curvas de nivel de la zona, se construyeron las cuencas visuales teóricas del sitio involucrado en el proyecto. Se denominan teóricas, porque para su elaboración no se consideran las limitaciones estructurales de la visión humana ni las variables que las moderan, como son las condiciones atmosféricas, incidencia de luz solar, etc.

Tabla 1: Puntos utilizados para la construcción de cuencas visuales (coordenadas en UTM).

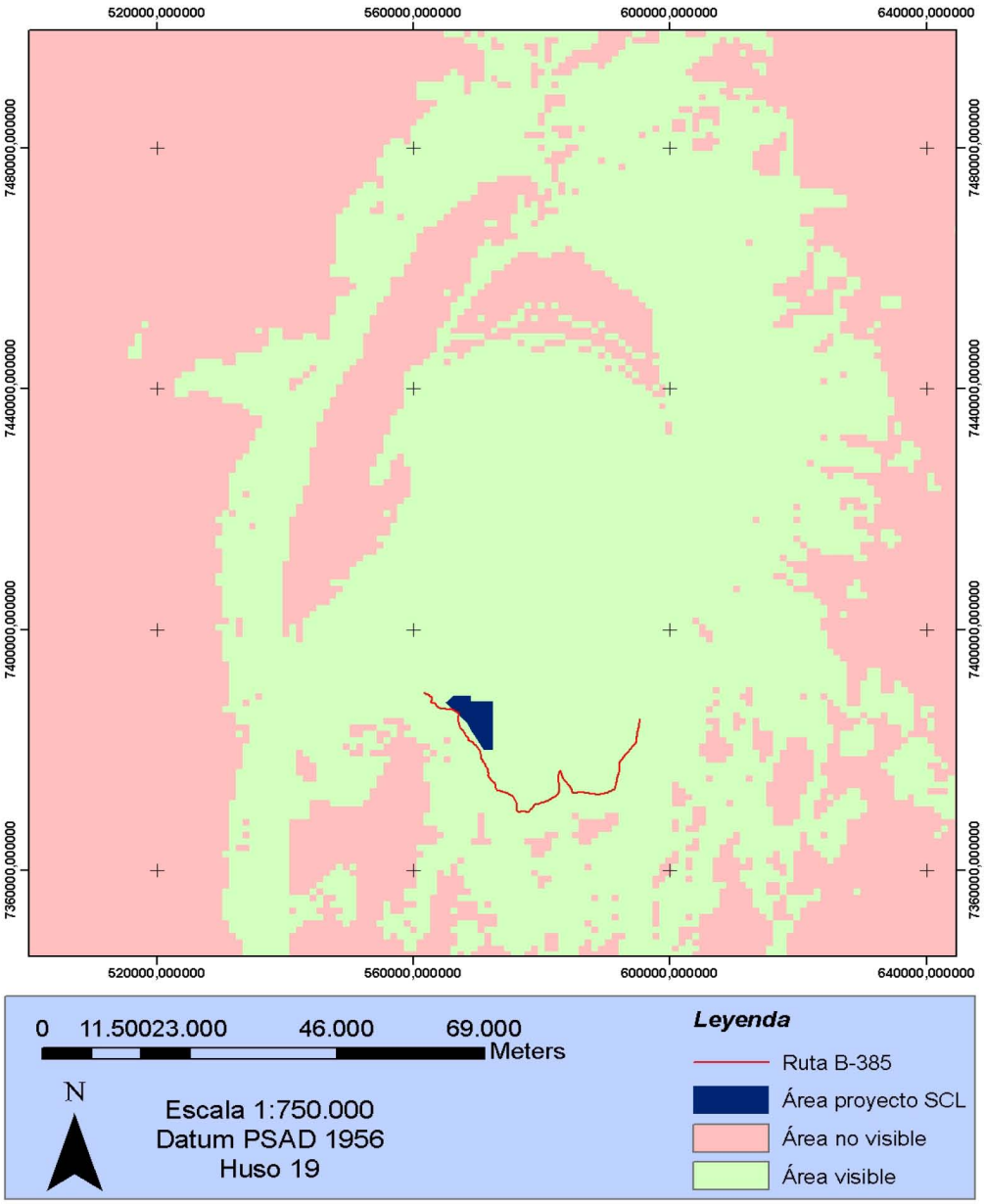
Ruta	Coordenadas UTM punto inicial		Coordenadas UTM punto final	
	Este	Norte	Este	Norte
B-385	561.558	7.389.528	594.666	7.381.119
B-355	594.743	7.381.304	601.866	7.435.523

Datum PSAD 1956. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se muestra la cuenca visual obtenida desde la ruta B-385, y en la Figura 3 el área que es posible apreciar desde la ruta B-355.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

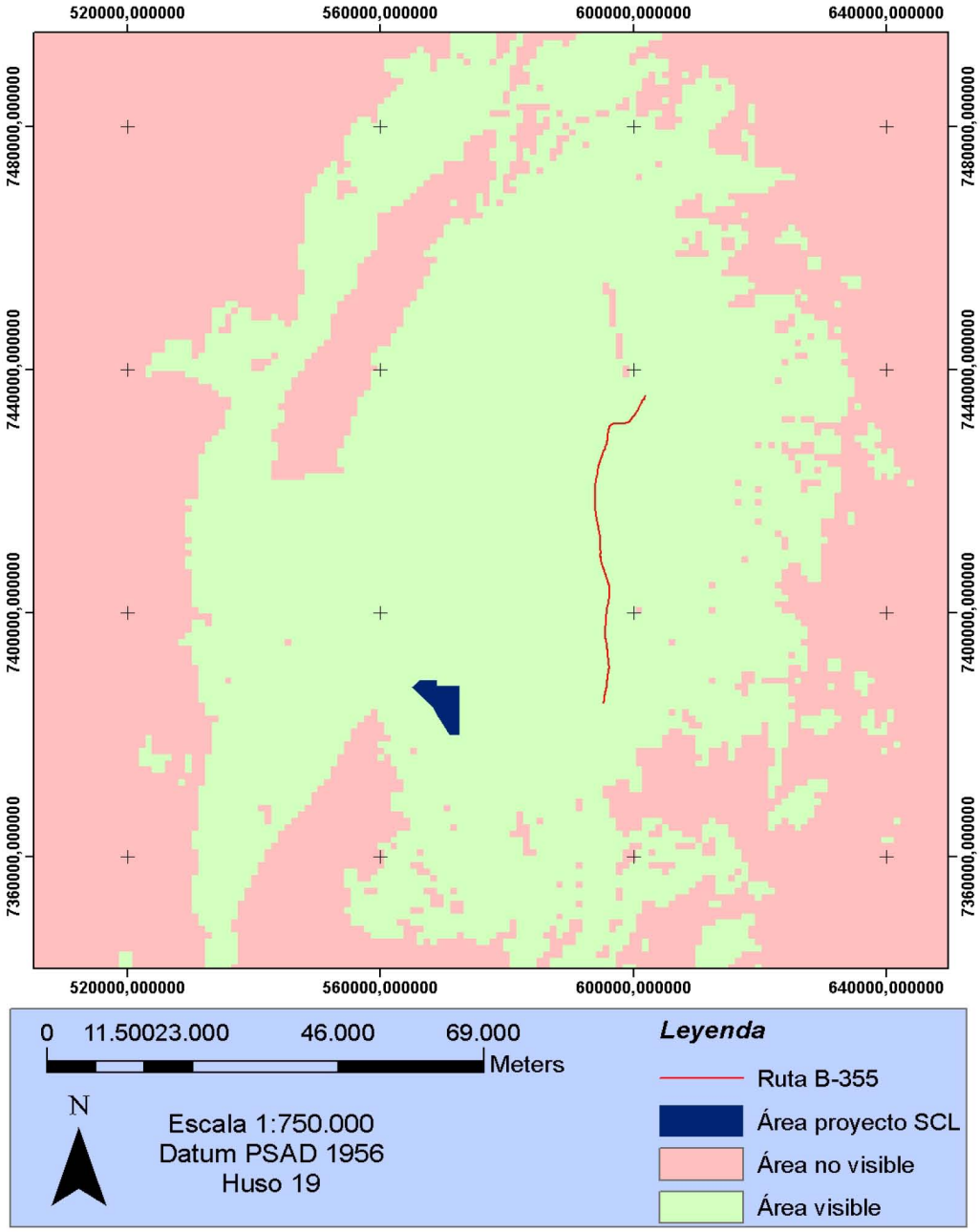
Figura 2: Cuenca visual desde ruta B-385



Fuente: Elaboración propia.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 3: Cuenca visual desde ruta B-355.



Fuente: Elaboración propia.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

2.4. Unidades de paisaje

Para el área del proyecto se definieron dos UP, de acuerdo a la geomorfología del lugar:

- UP1: Cordillera de Domeyko
- UP2: Salar de Atacama (incluye área del proyecto)

2.5. Inventario de recursos

UP 1: Cordillera de Domeyko

- **Áreas de interés escénico:** las principales zonas o áreas de interés escénico están constituidas por laderas que presenta una atractiva combinación de pendientes, marcas de escurrimientos superficiales y variaciones cromáticas a través del día.
- **Hitos visuales de interés:** dentro de la unidad son las cumbres principales las que se transforman para el observador en hitos visuales.
- **Cubierta vegetal dominante:** en la unidad casi no se registra la presencia de vegetación.
- **Presencia de fauna:** la posibilidad de observar especies de fauna de interés visual es escasa.
- **Cuerpos de agua:** no se registra la presencia de cuerpos de agua natural.
- **Intervención humana:** se ha realizado un escaso uso y modificación de los elementos del paisaje. La intervención humana es cercana moderada.
- **Áreas de interés histórico:** no se registran áreas declaradas Monumento Nacional, Histórico, Arqueológico, Público, etc. en esta UP.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

UP 2: Salar de Atacama

- **Áreas de interés escénico**: no se registraron zonas o áreas de interés escénico en esta unidad.
- **Hitos visuales de interés**: dentro de la unidad no existen hitos visuales, sólo algunas vistas de altas cumbre de la Cordillera de los Andes, que en el fondo escénico logran impactar la atención.
- **Cubierta vegetal dominante**: en la unidad no se registra la presencia de vegetación.
- **Presencia de fauna**: la posibilidad de observar especies de fauna de interés visual es escasa.
- **Cuerpos de agua**: no se registra la presencia de cuerpos de agua natural.
- **Intervención humana**: se ha realizado un importante uso y modificaciones a los elementos del paisaje. La intervención humana es importante.
- **Áreas de interés histórico**: no se registran áreas declaradas Monumento Nacional, Histórico, Arqueológico, Público, etc. en esta UP.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Anexo 7.1

Plan de Monitoreo

Sociedad Chilena de Litio Ltda.
Región de Antofagasta, Chile

Preparado por:

GCF Consultores

ÍNDICE

1. PLAN DE MONITOREO 3

1.1. Introducción 3
1.1.1 Monitoreo de niveles de salmuera y agua dulce 3
1.1.2 Monitoreo de la calidad físico-química de la salmuera y del agua de las lagunas 3
1.1.3 Imágenes satelitales 4
1.1.4 Batimetría de lagunas 7
1.2. Modelo de flujo del núcleo 7
1.2.1 Borde de baja permeabilidad 7

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Plan de monitoreo Sistema La Punta- La Brava 5

Figura 2. Ubicación de pozos de monitoreo de niveles de salmuera y de agua dulce 6

Figura 3. Modelo hidrogeológico de SCL 8

Figura 4. Perfil sur-norte 9

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1. PLAN DE MONITOREO

1.1. Introducción

La interpretación del funcionamiento de las lagunas descrita en el Capitulo 5, pretende lograr un entendimiento de la física del sistema. Con ello, es posible diseñar planes de monitoreo de las distintas magnitudes que permiten describir el estado del sistema. Un adecuado control de las variables de estado y su análisis, permitirá preservar las zonas sensibles, tomando medidas oportunas ante situaciones imprevistas.

El primer paso para definir el plan de monitoreo es identificar las áreas sensibles, que se deberían proteger. En la Figura 1 se muestran los sistemas lacustres más cercanos a la planta de SCL.

1.1.1 Monitoreo de niveles de salmuera y agua dulce

Los puntos de control propuestos se ubicaron en líneas, partiendo desde las zonas de bombeo de SCL hacia las lagunas, con espaciamiento variable, entre 1.5 y 5.5 km. En la Figura 2 se puede visualizar la red de monitoreo propuesta. En la definición de la grilla de control, se procuró cubrir toda el área por donde se podrían propagar las depresiones que podría originar el bombeo.

Se propone efectuar un monitoreo mensual de niveles de salmuera en los 10 puntos elegidos (7 pozos nuevos + 3 pozos existentes: S-1, S-3 y CI-6). Además de 2 puntos de control del agua dulce (Tucúcaro y Tilopozo, Figura 2).

Se debe tener en cuenta que la evolución del nivel de salmuera, medido en esos puntos, dependerá tanto de la extracción de SCL, como de la de SQM. A través de un modelo hidrogeológico de flujo, que se detalla más adelante, es posible analizar los efectos observados con un grado de certidumbre razonable.

1.1.2 Monitoreo de la calidad físico-química de la salmuera y del agua de las lagunas

Se propone realizar un muestreo bimensual de la salmuera de cada pozo de la grilla propuesta. Existen mediciones de calidad efectuadas por otras empresas en el área que se realizan semestral o anualmente.

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

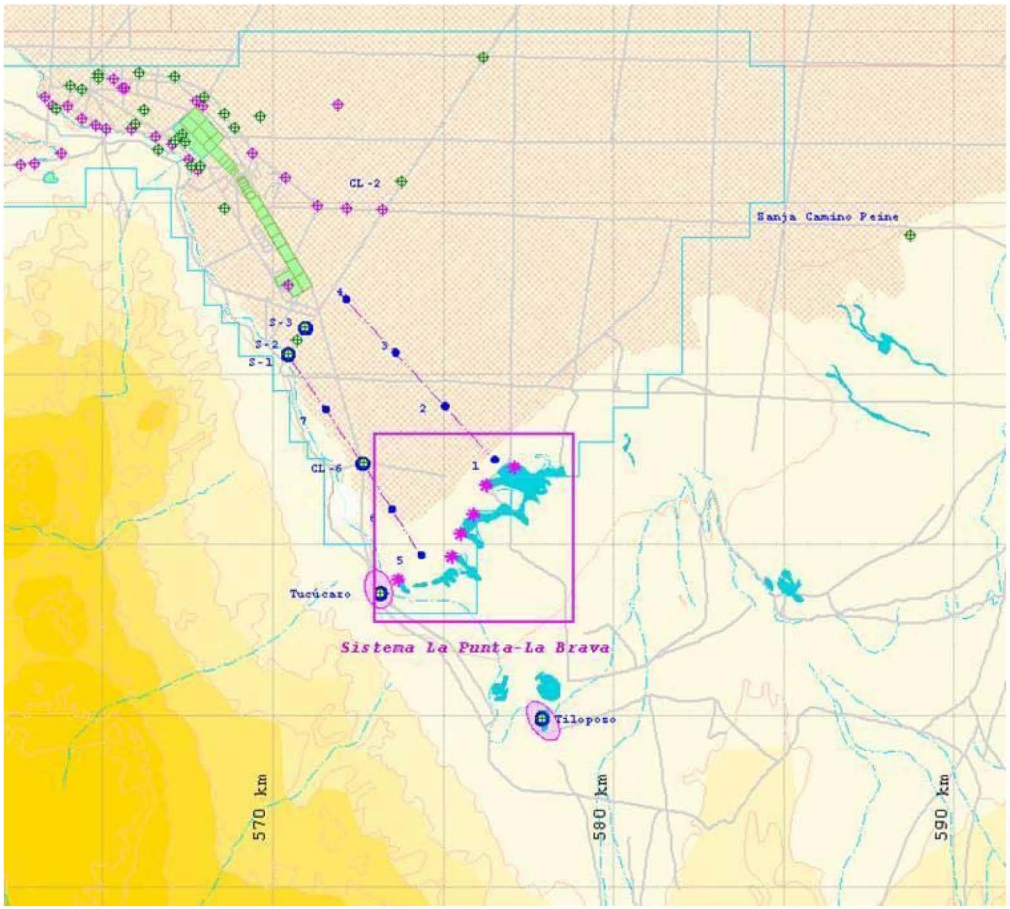
SCL cuenta con análisis de calidad de salmueras del núcleo y de agua dulce de pozos ubicados en Tilopozo y Tucúcaro (Figura 2), los parámetros medidos son densidad, temperatura, Li, K, Mg, Ca, SO_4 y Na. La densidad del agua del núcleo varía entre 1.2 y 1.25 Ton/m^3 y la del agua dulce es cercana a 1 Ton/m^3. El Li, K, Mg, Ca, SO_4 y Na en la salmuera poseen concentraciones entre 15 y 250 veces la que se ha medido en el agua dulce. Por consiguiente, sería adecuado analizar dichos elementos y compuestos, además de la densidad, puesto que permiten diferenciar claramente el agua dulce del agua salada del núcleo. Complementariamente, se analizará temperatura y oxígeno disuelto, parámetros que podrían ayudar a la diferenciación.

1.1.3 Imágenes satelitales

Se propone realizar un seguimiento semestral de la cobertura de las lagunas, a través de imágenes satelitales. Dado que las lluvias se concentran en enero, febrero y marzo, es probable registrar estados extremos en abril (peak húmedo) y noviembre (peak seco).

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

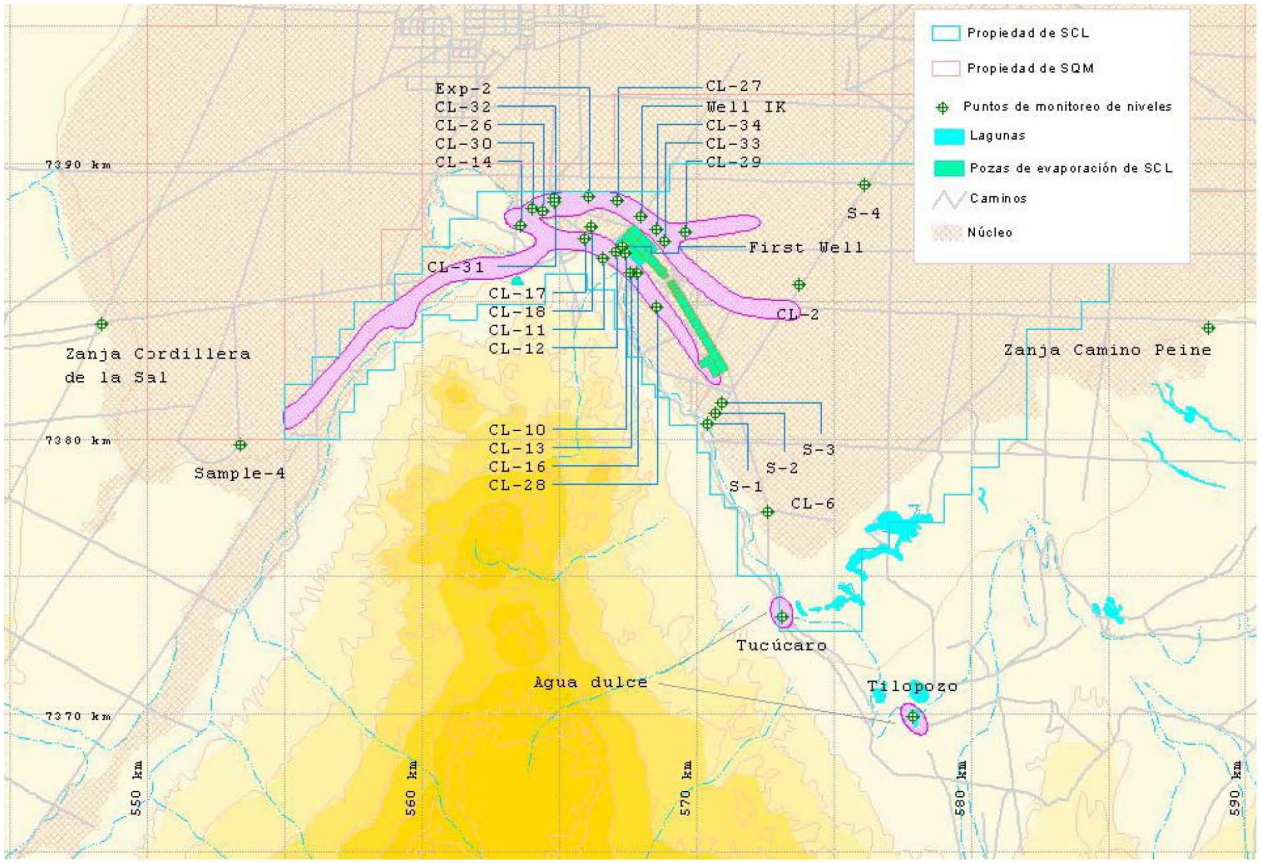
Figura 1. Plan de monitoreo Sistema La Punta- La Brava



Fuente: GCF Consultores

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 2. Ubicación de actuales pozos de monitoreo de niveles de salmuera y de agua dulce



Fuente: GCF Consultores

GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

1.1.4 Batimetría de lagunas

La morfología de las lagunas es dinámica, las lluvias disuelven el medio y en las lagunas mismas, se van depositando sedimentos. Ambos procesos modifican la topografía de las lagunas, por ello, se cree que es necesario batimetrías anuales, igualmente como se hace en las lagunas Salada, Saladita e Interna, de acuerdo con los compromisos adoptados entre SCL y la autoridad ambiental.

1.2. Modelo de flujo del núcleo

Se cuenta con un estudio de modelación hidrogeológica del flujo en el núcleo del salar realizado por este consultor en 1991 para SCL. Posteriormente, en el año 2005, el modelo fue calibrado con datos de niveles de salmuera medidos entre 1989 y 2004, incorporando además, datos en la zona de SQM para el período 1996-2002.

El detalle del modelo se incluye en el Anexo 5.2. Esta herramienta será actualizada anualmente, en la medida que se acumulen datos de bombeos y niveles de salmuera.

Como se indicó anteriormente, la herramienta permite cuantificar los efectos de las depresiones originadas por los bombeos de SQM y SCL. La precisión de dicha estimación depende en gran medida de las mediciones que realiza SQM, tanto de caudales, como de niveles de salmuera.

1.2.1 Borde de baja permeabilidad

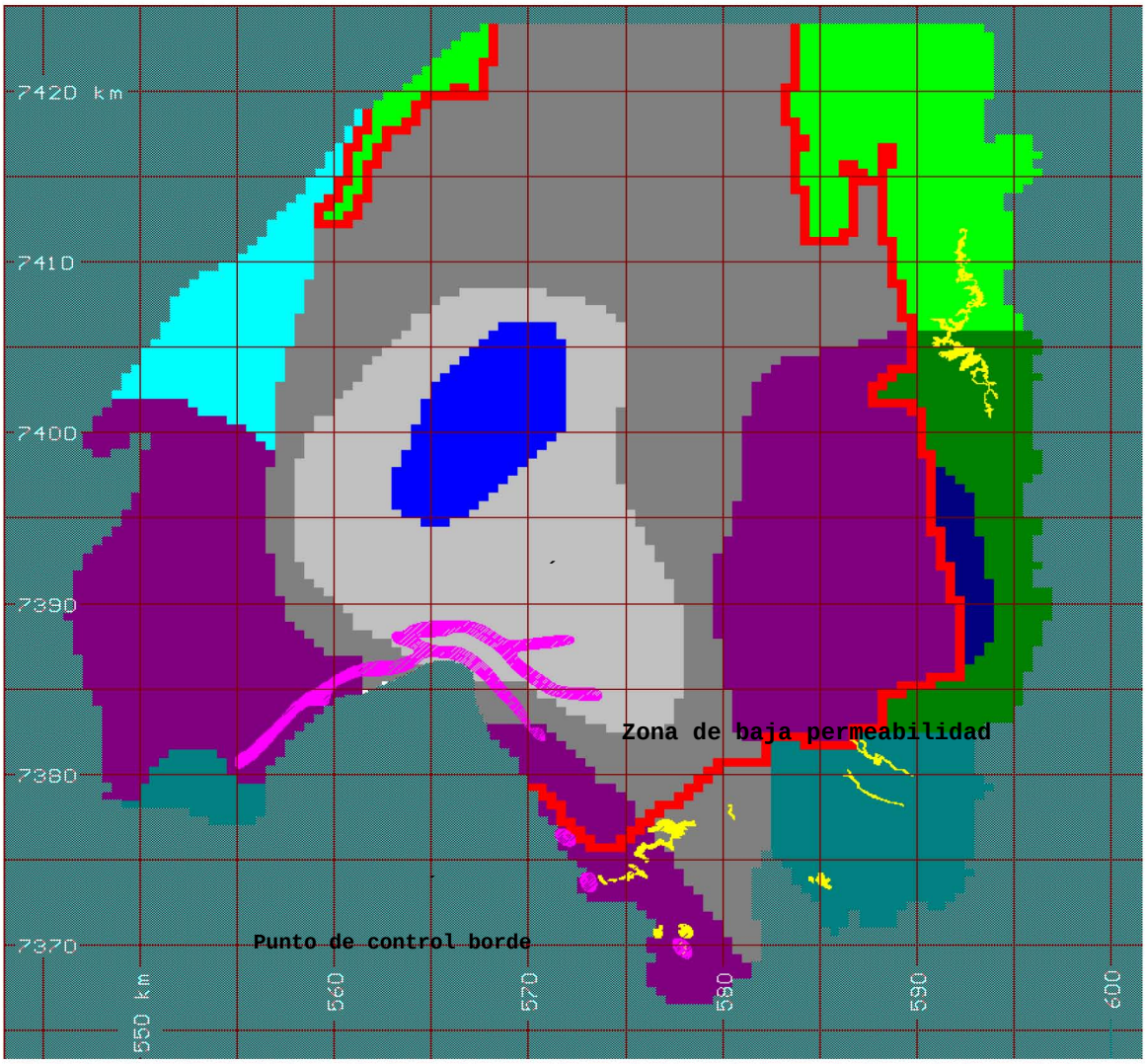
En la Figura 3 se muestra la malla de modelación y la representación de la zona de baja permeabilidad, además de 2 puntos de control, en los que se analizó la variación del nivel de salmuera para un escenario futuro. El punto denominado "núcleo" se ubica inmediatamente aguas abajo de la zona de baja permeabilidad; el punto identificado como "borde", se encuentra entre esta zona y las lagunas.

Se operó el modelo por un período de 30 años imponiendo el bombeo proyectado por SCL.

En la Figura 4 se muestra un corte de la malla de modelación. En él se puede apreciar el efecto de la zona de baja permeabilidad, actuando como amortiguador para la propagación de las depresiones hacia la zona de lagunas. El nivel de salmuera simulado corresponde al año 2039.

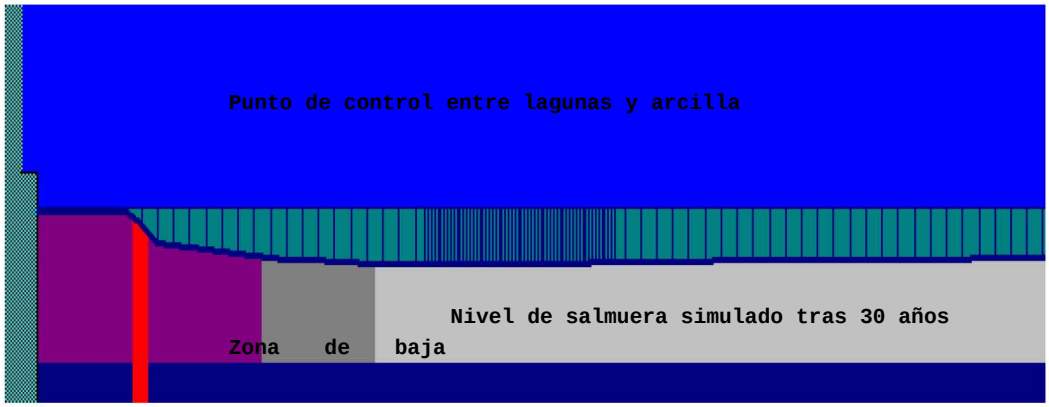
GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 3. Modelo hidrogeológico de SCL



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl

Figura 4. Perfil sur-norte



GESTION AMBIENTAL CONSULTORES
ecology and environment inc.
Padre Mariano 103 Of. 307 · 7500499, Providencia · Chile · Fono: +56 2 236 0886 · Fax: +56 2 235 1100 · www.gac.cl