

# INFORME GEOTÉCNICO

## MECANICA DE SUELOS APLICADA A SUELOS SALINOS

CMGI-2013-IG-319-CCHC-0031-00

Informe preparado para  
CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN

NOVIEMBRE 2013

0	25/11/2013	USO CLIENTE	SMP	GPM	GPM	RVA	RVA	
C	23/08/2013	USO CLIENTE	SMP	GPM	GPM	RVA	RVA	
B	20/08/2013	REVISIÓN CLIENTE	SMP	GPM	GPM	RVA	RVA	
A	12/08/2013	REVISIÓN INTERNA	SMP	GPM	GPM	RVA	RVA	
REV N°	FECHA EMISIÓN	EMITIDO PARA	POR		REVISADO POR:	APROBADO POR	APROBADO POR	
TIPO	INFORME GEOTÉCNICO		CMGI LTDA				C.Ch.C.	
MECANICA DE SUELOS APLICADA A SUELOS SALINOS Cámara Chilena de la Construcción							REV. 0	

## RESUMEN EJECUTIVO

En el Norte Grande existen extensos depósitos de suelos con altos contenidos de sales solubles, cuya génesis obedece a la particular aridez de la zona, que condiciona la evaporación de la humedad aportada por la camanchaca en la zona costera y de los flujos de agua provenientes, principalmente, de la zona del Altiplano. Estos depósitos de suelos, en condiciones específicas, tienen la singularidad de variar drásticamente su rigidez y resistencia al disolverse las sales por la presencia de agua, generándose así asentamientos diferenciales del terreno que pueden ser superiores a los admisibles para una estructura. Por esta razón en la zona norte del país se tienen innumerables antecedentes de edificaciones que han sufrido serios daños estructurales, debido a repentinos asentamientos diferenciales del terreno por efecto de la aparición de agua.

Los depósitos de suelos salinos, en general, presentan una distribución de las sales en profundidad (perfil de salinidad), que sigue un patrón característico, desde la superficie aumenta con la profundidad hasta alcanzar un valor máximo, "costra salina", bajo la cual la situación se revierte y el contenido de sales disminuye con la profundidad. Este patrón facilita geotécnicamente el tratamiento de estos suelos, puesto que siempre existe una profundidad bajo la cual la salinidad es lo suficientemente baja para su uso como terreno de fundación. Por lo tanto, desde un punto de vista técnico siempre existe una solución factible, la que se centra en lograr compatibilizar la solución con los recursos disponibles para el desarrollo del proyecto determinado.

La práctica ingenieril y constructiva sobre suelos salinos ha definido un criterio que permite establecer cuando se deben adoptar medidas para evitar la generación de asentamientos por disolución de sales. Este criterio de origen empírico establece un valor crítico de 3% de contenido de sales solubles. Sobre este valor se considera que se está en presencia de un suelo salino, que potencialmente puede desarrollar asentamientos por una eventual aparición de agua que disuelva dichas sales.

Con respecto a los ensayos de caracterización geotécnica, se debe tener presente que todos aquellos que utilicen agua en sus procedimientos (granulometría, Límites de Atterberg, Peso Específico y otros), proporcionan resultados que deben incorporar el fenómeno de disolución de sales.

Un estudio de Mecánica de Suelos de un terreno en el norte de Chile debe considerar la obtención del perfil de salinidad, en una profundidad mínima de 5 m. De existir contenidos de sales solubles sobre un 3%, se recomienda determinar el grado de colapso que presenta el sitio en estudio, mediante ensayos de placa de carga, que incorporen cargas cíclicas y proceso de inundación.

Existen diferentes soluciones constructivas que permiten controlar el tema de asentamientos. Conceptualmente, éstas se pueden agrupar en cuatro concepciones básicas: evitar los aportes de aguas de mayor probabilidad de ocurrencia, disponer el sello de fundación por debajo de la costra salina, impermeabilizar el terreno de fundación y ejecutar un mejoramiento del terreno, incluyendo las posibilidades de retirar y reemplazar el suelo.

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1.- INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2.- ANTECEDENTES TÉCNICOS UTILIZADOS .....</b>	<b>8</b>
<b>3.- DESCRIPCIÓN DE SALES SOLUBLES .....</b>	<b>9</b>
3.1.- Sales.....	9
3.2.- Solubilidad .....	10
<b>4.- FACTORES CONDICIONANTES DE DEPÓSITOS SALINOS .....</b>	<b>12</b>
4.1.- Proceso de Formación Geológica .....	12
4.2.- Condiciones Geográficas.....	15
4.3.- Aspectos Climáticos .....	18
4.4.- La Camanchaca .....	22
<b>5.- DEPÓSITOS DE SUELOS SALINOS DEL NORTE GRANDE.....</b>	<b>24</b>
5.1.- Generalidades .....	24
5.2.- Génesis de la Presencia de Sales Solubles .....	25
5.2.1.- Procesos Evaporíticos Antiguos. ....	25
5.2.2.- Depositaciones Marinas Recientes .....	25
5.2.3.- Movilidad Salina Superficial y Subterránea .....	26
5.2.4.- Depositaciones Provenientes de la Atmósfera.....	26
5.3.- Concentraciones Salinas Típicas .....	27
5.4.- Perfil de Salinidad.....	28

---

<b>6.- SUELOS SALINOS COMO TERRENO DE FUNDACIÓN.....</b>	<b>31</b>
6.1.- Problemática de los Suelos Salinos del Norte Grande .....	31
6.2.- Fuentes de Aporte de Agua.....	32
6.3.- Asentamiento y Colapso.....	33
<b>7.- PARTICULARIDADES DE ENSAYOS EN SUELOS SALINOS .....</b>	<b>36</b>
<b>8.- CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELOS SALINOS. ....</b>	<b>37</b>
8.1.- Consideraciones para la Definición de la Campaña de Exploración .....	37
8.2.- Definición del Perfil de Salinidad .....	37
8.3.- Ensayos de Placa de Carga In-situ .....	38
<b>9.- ALTERNATIVAS DE SOLUCIONES DE FUNDACIÓN EN SUELOS SALINOS</b>	
.....	<b>39</b>
9.1.- Contenido de Sales Solubles Crítica .....	39
9.2.- Alternativas Conceptuales de Solución .....	39
9.3.- Alternativas de Solución .....	41
9.3.1.- Protección de Cañerías.....	41
9.3.2.- Sello de Fundación por Debajo de la Costra Salina.....	42
9.3.3.- Impermeabilización del Terreno de Fundación .....	44
9.3.4.- Mejoramiento del Terreno .....	46
<b>10.- CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>

## 1.- INTRODUCCIÓN

En el país existen diversos suelos de propiedades singulares, cuya génesis está asociada a las particularidades tectónicas y climáticas del territorio. En la caracterización geotécnica de estos suelos no es suficiente la aplicación de la Mecánica de Suelos clásica, requiriéndose de un enfoque diferente que incluya los conceptos específicos que hacen cada suelo singular.

Por ejemplo, en el sur de Chile es común la presencia de depósitos derivados de cenizas volcánicas (trumaos), con densidades secas menores a la unidad, humedades sobre el 100%, fuerte variación de sus propiedades al secarse al horno y de resistencias sensibles al nivel de perturbación. Estos suelos responden a la interacción de un importante volcanismo y alta pluviometría, característicos de la zona entre Chillán y Puerto Montt.

Por otra parte, en el Norte Grande existen extensos depósitos de suelos con altos contenidos de sales solubles, cuya génesis obedece a la particular aridez de la zona, que condiciona la evaporación de la humedad aportada por la camanchaca en la zona costera y de los flujos de agua provenientes, principalmente, de la zona del Altiplano. Estos depósitos de suelos, en condiciones específicas, tienen la singularidad de variar drásticamente su rigidez y resistencia al disolverse las sales por la presencia de agua, generándose así asentamientos diferenciales del terreno que pueden ser superiores a los admisibles para una estructura.

La directa dependencia de los depósitos de suelos singulares con las condiciones específicas del entorno climático, geológico y geomorfológico, hacen que su extensión se enmarque siempre en un contexto regional. Por esto comúnmente se les denominan suelos regionales, condición que en muchos casos limita el nivel de conocimiento que de ellos se tiene, esto precisamente debido a su condición local (no generalizada a lo largo del país) y además, por ser, en muchas ocasiones, estudiados desconociendo sus singularidades.

Al abordar el estudio geotécnico de un depósito de suelos “regional”, se requiere reconocer a priori sus singularidades, de forma de orientar, tanto la exploración del terreno como los ensayos, a la verificación y cuantificación de dichas singularidades, pudiendo desarrollarse así las soluciones geomecánicas que garanticen el adecuado comportamiento de las diferentes obras de cada proyecto.

En el caso específico de los depósitos de suelos salinos que existen en el norte de Chile, la problemática de ingeniería civil se centra en la súbita aparición de asentamientos del terreno, gatillada por la disolución de sales, generada por la presencia de agua. La magnitud de estos asentamientos está relacionada principalmente con la cantidad de sales solubles, su distribución en profundidad, tipo de suelo y modo del aporte de aguas. Por lo tanto, todo estudio geotécnico que se realice en el norte de Chile debe perentoriamente en su inicio descartar, o confirmar, la existencia de suelos salinos. Para este último caso, en el presente documento se proporcionan metodologías de análisis y se proponen alternativas de soluciones geotécnicas.

Es importante mencionar que existe un fenómeno de erosión, que muchas veces se mal interpreta, asimilándolo con la problemática de suelos salinos. Arenas de todo tipo, frente a escurrimientos de agua de mediana a alta energía, potencialmente sufren el fenómeno erosivo de arrastre de partículas del suelo, pudiéndose así generar importantes pérdidas de material granular, con el consiguiente desarrollo de asentamientos de estructuras apoyadas inmediatamente sobre la zona erosionada.

---

## 2.- ANTECEDENTES TÉCNICOS UTILIZADOS

Durante la elaboración del presente documento se han utilizado los siguientes antecedentes técnicos:

- Skorin, A. (1971). “Efectos de los Suelos Salinos sobre Estructuras”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Tamblay, G. (1983). “Comportamiento de Fundaciones Apoyadas en Suelos Salinos”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Olgún, R. (2006). “Geotécnica de los Suelos Salinos del Norte de Chile”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Corvalán, J, Hervé, F. (1982). “Origen Geológico de Chile”. Chile Esencia y Evolución. Instituto de Estudios Regionales de la Universidad de Chile.
- Petruki, V.P. (1993). “Construction of Structures on Saline Soil”. A.A. Balkema.
- Ortlieb, L. (1995). “Paleoclimas Cuaternarios en el Norte Grande de Chile”. Cambios cuaternarios en America Latina, J. Argollo & Ph. Mourgariat Eds.
- Suarez, M., Naranjo J.A., Puig, A. (1985). “Estratigrafía de la Cordillera de la Costa al Sur de Tal-Tal Chile: Etapas Iniciales de la Evolución Andina”, Revista Geológica de Chile No. 24
- Paskoff, R. (1978). “Sobre la Evolución Geomorfológica del Gran Acantilado Costero del Norte Grande de Chile”. Norte Grande, Instituto Geográfico Univ. Católica.
- Makshev, V. (2001) “Deposito de Nitratos”. Apuntes curso de Metalogénesis GL54A. Universidad de Chile.  
[www.cece.uchile.cl/~vmakshev/nitrator%20y%20salares.pdf](http://www.cece.uchile.cl/~vmakshev/nitrator%20y%20salares.pdf).
- Procedimiento de ensayo LNV 8-84. “Determinación de sales solubles en agregados pétreos empleados en pavimentos flexibles”. Laboratorio Nacional de Vialidad.

### 3.- DESCRIPCIÓN DE SALES SOLUBLES

#### 3.1.- Salas

Una sal se define como el compuesto químico que se ha formado a causa del enlace iónico entre un anión y un catión. Se dice que una sal es *soluble* cuando es capaz de pasar de un estado sólido a uno líquido al entrar en contacto con un *solvente* para constituir finalmente una *solución acuosa*.

En los depósitos salinos del norte de Chile es posible encontrar los aniones y cationes típicos que se indican en la Tabla No. 3.1. Al enlazarse estos iones se generan, de manera natural, las sales solubles que habitualmente se encuentran en los depósitos salinos del Norte Grande.

Tabla 3.1.- Resumen de aniones, cationes y sales típicos del Norte Grande

Aniones	Cationes	Sales
Cloruros $\text{Cl}^-$	Sodio $\text{Na}^+$	Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ ): Halita o sal común
Sulfatos $\text{SO}_4^{2-}$	Calcio $\text{Ca}^{2+}$	Sulfato de Calcio ( $\text{CaSO}_4$ ): Yeso y Anhidrita
Carbonatos $\text{CO}_3^{2-}$	Magnesio $\text{Mg}^{2+}$	Nitrato de Sodio ( $\text{NaNO}_3$ ): Salitre
Nitratos $\text{NO}_3^-$		Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ): Calcita

La formación y configuración de la estructura cristalina de cada tipo de sal hace que éstas tengan características y propiedades tanto químicas como físicas particulares y distintivas, como son por ejemplo la forma, color, dureza, peso específico y solubilidad. De estas propiedades, la solubilidad, es la que presenta mayor efecto en las anomalías observadas en edificaciones del Norte Grande.

### 3.2.- Solubilidad

La solubilidad se define como una medida de la capacidad que tiene una determinada sustancia (soluta) de disolverse en un medio determinado (solvente). En consecuencia, corresponde a la máxima cantidad de soluto disuelto en una cantidad dada de solvente, a una temperatura fija, o equivalentemente, se establece como la cantidad de soluto que produce la saturación del solvente.

Basado en el grado de solubilidad en agua, las sales presentes en depósitos de suelos pueden ser clasificadas como:

- **Fácilmente solubles:**  
Corresponden generalmente a cloruros ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) y Sulfatos ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ) y Carbonatos de Sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- **Moderadamente solubles**  
A profundidades medias corresponden principalmente a yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  o anhidrita  $\text{CaSO}_4$
- **Difícilmente solubles**  
Carbonatos como calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) y magnesita ( $\text{MgCO}_3$ )

Por otra parte, los principales parámetros que condicionan la solubilidad corresponden a:

- **Temperatura del solvente.** Generalmente, en la medida que aumenta la temperatura del solvente aumenta también la solubilidad. Un caso particular lo constituyen las Halitas, cuya solubilidad es invariante a los cambios de temperatura.
- **Composición química del solvente.** Un determinado tipo de sal puede presentar distinta solubilidad frente a distintos solventes. Por ejemplo, la

calcita tiene una muy baja solubilidad en agua, sin embargo, ésta aumenta considerablemente frente a la acción del ácido clorhídrico (HCl).

- **Grado de cristalinidad de la Sal.** En la medida que la sal presente un mayor grado de cristalinidad, es decir, un mayor ordenamiento molecular, es más dificultosa su disolución.

En la Tabla No. 3.2 se indican los valores de solubilidad de los tipos de sales más comunes del Norte Grande.

Tabla No. 3.2.- Solubilidad de sales más comunes del Norte Grande

Tipo de Sal	Fórmula Química	Solubilidad [g de sal / 100 g de agua]
Carbonato de Calcio (Calcita)	CaCO <sub>3</sub>	1.3 x 10 <sup>-3</sup>
Sulfato de Calcio (Yeso)	CaSO <sub>4</sub>	2.2 x 10 <sup>-1</sup>
Nitrato de Calcio	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.0 x 10 <sup>2</sup>
Cloruro de Sodio (Halita)	NaCl	3.6 x 10 <sup>1</sup>
Nitrato de Sodio (Salitre)	NaNO <sub>3</sub>	8.2 x 10 <sup>1</sup>
Cloruro de Magnesio	MgCl <sub>2</sub>	2.8 x 10 <sup>2</sup>
Nitrato de Magnesio	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2.2 x 10 <sup>2</sup>

---

## 4.- FACTORES CONDICIONANTES DE DEPÓSITOS SALINOS

### 4.1.- Proceso de Formación Geológica

Para comprender la génesis de los depósitos de suelos salinos del Norte Grande, entendiendo esta región como el tramo de Chile al norte del paralelo 27° (Copiapó), es necesario conocer la interacción del continente con el paleo-océano Pacífico y los efectos que ésta tuvo en la formación y depositación de los actuales macizos rocosos y depósitos de suelos.

De acuerdo a Corvalán y Hervé (1982), la evidencia más antigua de la interacción corresponden a los esquistos de Belén, emplazados en un cinturón de 30 km de largo y 3 km de ancho ubicado entre las localidades de Belén y Tignamar, en la pre cordillera de la región de Arica y Parinacota, con edades de formación de al menos 1000 millones de años. Esta formación constituye el remanente de la base sobre la que se desarrollaron depósitos sedimentarios de ambientes marinos de baja profundidad.

Posteriormente, se estima que durante el Periodo Triásico (~215 a 195 millones de años) la actividad tectónica disminuyó fuertemente, lo que favoreció los procesos de erosión y desgaste de las montañas paleozoicas, permitiendo el avance del océano en la zona oeste del territorio, generando bahías de baja profundidad donde se desarrollaron depósitos marinos, que se evidencian en la actualidad en los depósitos fósiles que se reconocen en la Cordillera de la Costa en la zona central de Chile. (Fig. 4.1)

Hacia fines del Triásico e inicios del periodo Jurásico comienza una serie de eventos sedimentarios, magmáticos y estructurales que constituyen lo que se conoce como el ciclo andino. En este periodo, al norte del paralelo 39° (30 km al sur de Temuco), se inicia un hundimiento en dirección norte sur del territorio, generándose una cuenca que facilitó el ingreso masivo del paleo-océano hacia el territorio, inundando esta zona por un periodo aproximado de 50 millones de años,

lo que generó depósitos marinos de gran espesor (Fig. 4.1). En la zona oeste de la cuenca, aproximadamente en la actual línea de costa, la sedimentación marina fue complementada por un intenso volcanismo andesítico cuyos derrames avanzaron localmente hacia el Este bajo condiciones de depositación marinas.

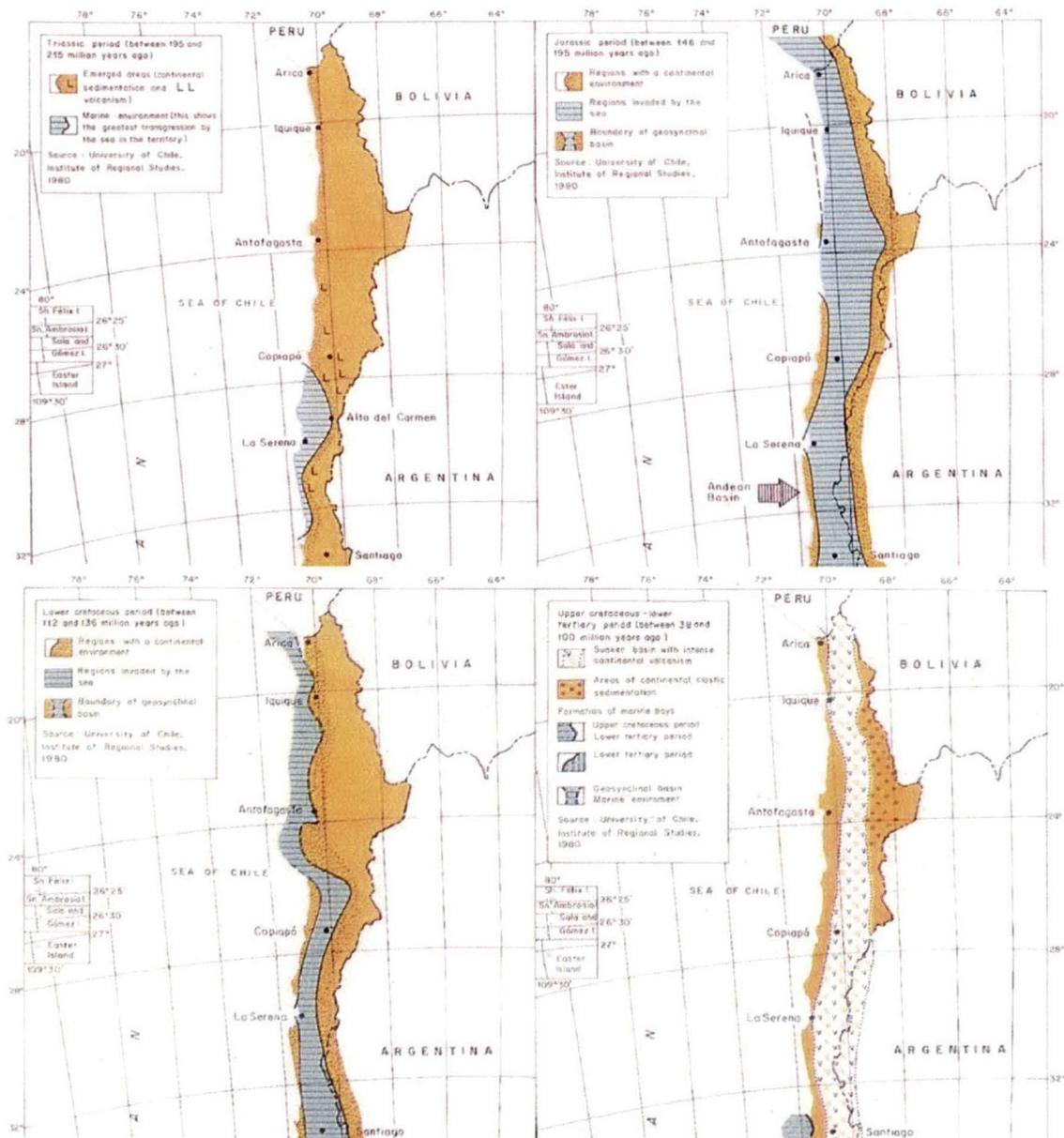


Fig.4.1.- Procesos de avance y regresión del paleo-océano pacífico (Corvalán y Hervé, 1982)

Hacia el final del periodo Jurásico (~150-140 millones de años) se inicia gradualmente la retirada del océano hacia el Oeste, permitiendo nuevamente condiciones de desarrollo continental. Durante este proceso es donde se presume se generan los extensos depósitos evaporíticos de la zona andina central y norte, constituidos principalmente por anhidritas y yeso. Este relieve continental que estuvo expuesto aproximadamente 6 millones de años, fue nuevamente inundado por el océano, alcanzando la zona que en la actualidad ocupan la Cordillera de la Costa y la de los Andes, por lo que dicha zona formó parte del fondo marino y por tanto, sobre él se desarrollaron potentes depósitos sedimentarios y andesíticos volcánicos. Al retirarse esta segunda inundación, la región pasa definitivamente a ser un territorio continental.

Hacia el término del Cretácico y tempranas etapas del periodo Terciario (~90 a 45 millones de años), se desarrollan importantes fenómenos de tectonismo compresional. En el extremo norte, este fenómeno sería el generador del importante levantamiento de la Cordillera de la Costa y de lo que hoy se conoce como Cordillera de Domeyko, favoreciéndose la conformación de numerosas cuencas cerradas que darían pie a la formación de los salares pre-andinos y los depósitos salinos de la Pampa.

Durante este mismo periodo en la zona de la planicie costera se desarrollan una serie de depósitos marinos y continentales intercalados, condicionados principalmente por las variaciones que sufre la ubicación del borde costero en este periodo.

La morfología actual del continente se inicia luego del Mioceno (~2 millones de años). En este periodo se concentran los movimientos ascendentes de las masas que constituyen la Cordillera de la Costa y de los Andes. El crecimiento de las montañas y el enfriamiento global del clima terrestre favoreció el nacimiento de glaciares cordilleranos inclusive en el extremo norte de Chile.

Durante el Cuaternario se desarrollaron importantes cuencas cerradas de drenaje interno, las que fueron rellenadas por agua salada, generándose imponentes lagos salobres. A medida que el clima se fue tornando cada vez más árido, se favoreció la evaporación del agua y con ello la precipitación de las sales, generándose los importantes salares del norte grande y los depósitos de suelos salinos hacia el oriente de la cordillera de la costa.

#### 4.2.- Condiciones Geográficas

Las sucesivas inundaciones marinas del continente no solo afectaron al extremo norte, por lo tanto la depositación en condiciones marinas al interior del continente por si solas, no logran explicar completamente la formación de los depósitos de suelos salinos. Otro aspecto relevante es la morfología del terreno, puesto que ésta condiciona los movimientos de aguas superficiales.

En la actualidad (geológicamente hablando corresponde a los últimos 2 millones de años) en el Norte Grande de Chile, es posible distinguir las siguientes cinco zonas geográficas características, enumeradas de Oeste a Este:

- Planicie Costera
- Cordillera de la Costa
- Valle Central
- Precordillera o Cordillera de Domeyko
- Cordillera de los Andes

En la Fig. 4.2 se presentan cinco perfiles característicos que muestran la evolución norte-sur de las cinco zonas geográficas mencionadas. Como se advierte, en el extremo norte el levantamiento de la cordillera de la costa es de menor magnitud al que se desarrolla entre las ciudades de Iquique y Antofagasta, implicando que la planicie costera, donde se emplaza la ciudad de Arica, tenga una mayor extensión.

En la medida que se avanza hacia el Este en el primer perfil, la depresión intermedia prácticamente no existe, observándose un progresivo aumento de cotas hasta alcanzar la Cordillera de los Andes. Esta configuración permite el desarrollo de importantes cuencas que conducen superficialmente aguas desde el altiplano hasta la costa. Ejemplo de esto son los ríos Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, ubicados en la Región de Arica y Parinacota. La última de éstas quebradas hacia el sur la constituye la Quebrada de Tana, cuya desembocadura se encuentra a unos 75 km al norte de Iquique.

Avanzando desde Iquique hacia el sur, se advierte que la planicie costera disminuye en extensión producto del levantamiento abrupto de la Cordillera de la Costa, generándose lo que se conoce como el Farellón Costero. En el límite norte de la ciudad de Iquique, este solevantamiento ocurre en el contacto con el borde marino, eliminando totalmente la presencia de la planicie costera. Esta condición acota la zona de influencia directa de los aportes de salinidad oceánica, delimitándola principalmente al margen occidental de la cordillera de la costa. Cabe mencionar que es precisamente en la planicie costera donde se ubican los principales centros urbanos del Norte Grande, como es el caso de las ciudades de Tal-Tal, Antofagasta, Tocopilla, Iquique y Arica.

En el tramo Iquique-Antofagasta, se advierte que el Valle central se ensancha considerablemente, quedando confinado entre ambas cordilleras, conformando una extensa franja de varios kilómetros de ancho, con una elevación promedio de 600 m.s.n.m. Posee una leve pendiente creciente hacia el oriente. La Pampa del Tamarugal es una zona característica de este sector.

Entre las ciudades de Calama y Antofagasta se observa que en la precordillera se desarrolla un cordón montañoso intermedio que corresponde a la Cordillera de Domeyko, con alturas medias entre los 2000 y 3000 m.s.n.m., lo que genera una zona de cuencas endorreicas, vale decir, que no tienen desagüe superficial hacia la zona de menor altura. Esta condición favorece la generación de depósitos

salinos al oriente de este cordón cordillerano, puesto que al no desarrollarse el flujo superficial prevalecen la evaporación y el drenaje subterráneo.

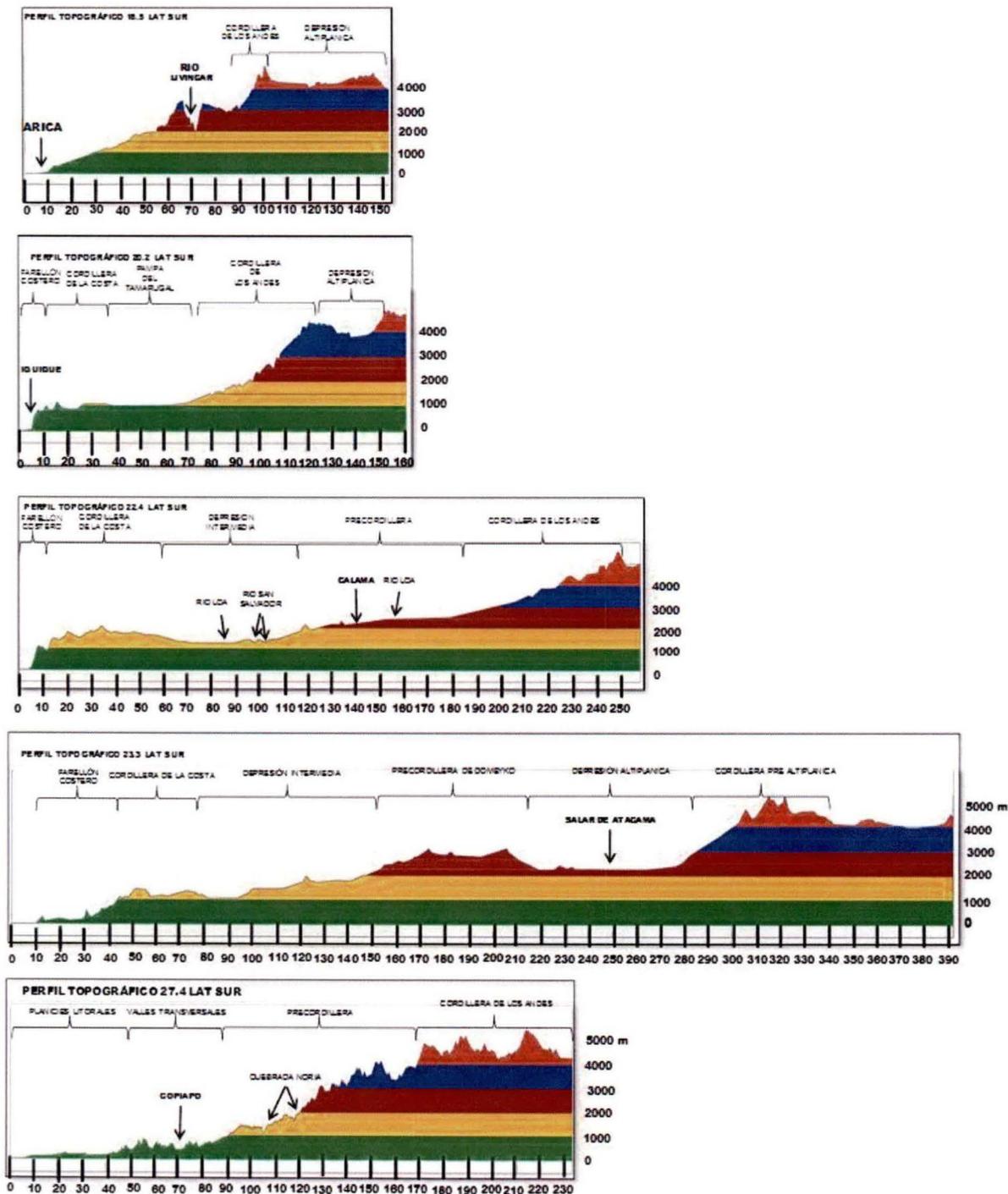


Fig. 4.2.- Perfiles topográficos del Norte Grande

Otro efecto importante que se advierte desde Iquique hacia el Sur, asociado probablemente al mayor levantamiento de la Cordillera de la Costa, es la ausencia de quebradas. En efecto, en el tramo entre la Quebrada de Tana (al norte de Iquique) y el Río Copiapó, solo existe un flujo superficial que cruza desde el valle central, hasta desembocar en el mar, que corresponde al Río Loa. El resto de quebradas que alcanzan el borde costero obedecen a cuencas que se desarrollan principalmente en el lado oeste de la Cordillera de la Costa. En consecuencia, el escaso aporte de aguas en esta zona sigue un drenaje principalmente subterráneo, favoreciendo la generación de depósitos salinos concentrados en el lado Este de la Cordillera de la Costa.

En resumen, en este tramo existen dos fajas norte-sur, donde se desarrollan cuencas de tipo endorreicas, que favorecen la generación de depósitos salinos emplazados principalmente en el margen oriental del cordón cordillerano de la Costa y de Domeyko. Ejemplo de esta condición de depositación son el Salar Grande, ubicado al sur de Iquique; en el margen oriental de la cordillera de la costa y el salar de Atacama, entre la cordillera de Domeyko y de los Andes.

Al finalizar el tramo, es decir, llegando a la zona norte de Copiapó, la morfología sufre un fuerte cambio. Desaparece la zona del cordón precordillerano y los valles tienden a orientarse en dirección Este-Oeste, iniciándose lo que se conoce como los valles transversales del Norte Chico, en donde los depósitos salinos prácticamente desaparecen, debido al drenaje existente hacia el mar y el cambio de condiciones climáticas.

#### 4.3.- Aspectos Climáticos

Desde finales del Eoceno existe predominio de las condiciones de aridez en el desierto de Atacama. La ausencia de importantes incisiones fluviales, la baja erosión de rocas pertenecientes al Mioceno y la preservación de los depósitos cupríferos, confirman que las fases pluviales que hayan ocurrido fueron de

intensidad y duración limitadas, esto en el transcurso de los últimos 10 millones de años. En la Pampa del tamarugal (Depresión Intermedia) existen evidencias de que tales episodios lluviosos llegaron a formar sucesivamente varios lagos. Se infiere que los factores oceánicos y/o atmosféricos debían ser distintos de los actuales durante estas fases fluviales.

De los posibles paleo lagos existentes durante el Pleistoceno Inferior, el más estudiado de ellos corresponde al Lago Soledad, alimentado principalmente por los deshielos de las nieves andinas, cubriendo las áreas actualmente ocupadas por los salares Grande y Llamara. Otros dos posibles paleo lagos, contemporáneos y comparables en términos de extensión con el anterior son los Lagos Philippi y Taltal (Fig. 4.3).

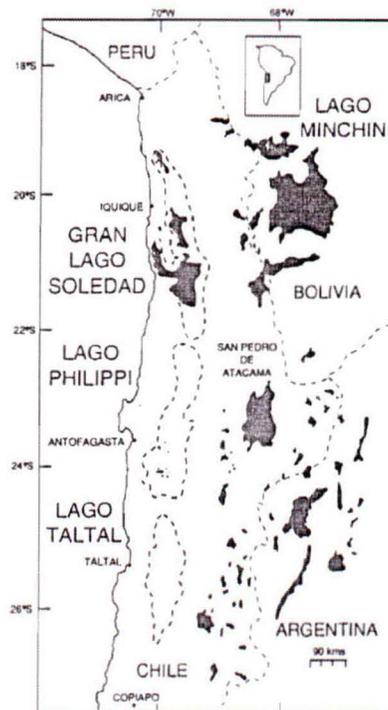


Fig. 4.3.- Potencial ubicación de los grandes lagos del Pleistoceno inferior.  
(Ortlieb 1995)

Hacia el Pleistoceno Medio y Superior, la carencia general de evidencia geológica de precipitaciones en la depresión central y, por otro lado, la preservación de los

nitratos de diversos depósitos evaporíticos en el Desierto de Atacama, sugieren cierta permanencia de la aridez. Después de las fases pluviales, el clima fue prácticamente tan árido como hoy en día, al menos en la depresión central.

La actual aridez del Desierto de Atacama, parece haberse instalado hace aproximadamente 3000 años, condicionada al escaso a nulo aporte de humedad proveniente del Océano Pacífico, debido principalmente al efecto de la inversión térmica continental que bloquea el avance de masas de aire oceánico hacia el continente. Este fenómeno oceanológico-climático está controlado por la presencia de la Corriente de Humboldt y del permanente anticiclón del Pacífico sur oriental.

El mapa climático actual del sector del Norte Grande identifica cuatro clasificaciones principales en función de la aridez que presenta, las que se indican en la Fig. 4.4. La descripción más detallada de los subtipos climáticos se entrega a continuación.

1).- *Clima Desértico Costero Nuboso.*

Se localiza en el sector de la Planicie Costera, presenta abundantes y espesas nieblas matinales, fenómeno denominado localmente “camanchaca”, originada por la corriente fría de Humboldt. Las temperaturas medias anuales resultan en torno a los 18° C, presentando reducida variación entre máximas y mínimas a lo largo del año. Las máximas precipitaciones anuales registradas en la Planicie Costera han alcanzado 2,6 mm, en tanto que la cantidad de agua caída en un año normal no supera el milímetro.

2).- *Clima Desértico Interior*

Se desarrolla principalmente en el Valle Central, esto es en la Pampa, a una altura por sobre los 1.000 m.s.n.m. y no se ve influenciado por el océano. Por esto, se caracteriza por ser un clima de extrema aridez, en donde las precipitaciones anuales son nulas y las temperaturas medias alcanzan los 18° C, presentando una humedad relativa promedio del 50%. El gradiente

de temperatura es muy alto, alcanzando los 35° C de día y bordeando los 0° C por la noche.

3).- *Clima Desértico Marginal de Altura*

Se localiza por sobre los 2.000 m de altura, las temperaturas son más atenuadas presentando una media anual de 10° C. El gradiente diario de temperatura alcanza un valor significativo. Las lluvias fluctúan entre los 50 y 100 mm anuales, concentrándose en los meses de verano asociado al fenómeno climático del “invierno boliviano”, en donde intensas tormentas eléctricas y precipitaciones se desarrollan sobre la Cordillera de Los Andes y el Altiplano Boliviano, en el periodo noviembre-abril las precipitaciones mensuales pueden alcanzar máximos de 80 mm, mientras que entre los meses de mayo y octubre, éstas son prácticamente nulas.

4).- *Clima de Estepa en Altura*

Se localiza en el sector altiplánico y Cordillerano del Norte Grande, por sobre los 3.000 m de altura. La principal característica es el aumento de las precipitaciones, que alcanzan 300 mm de agua caída al año, las que se concentran principalmente en los meses de Enero y Febrero producto del ya mencionado “invierno boliviano”. Durante la noche, las temperaturas descienden varios grados bajo cero, mientras que por el día no superan los 20° C. La temperatura media anual es de 9° C.

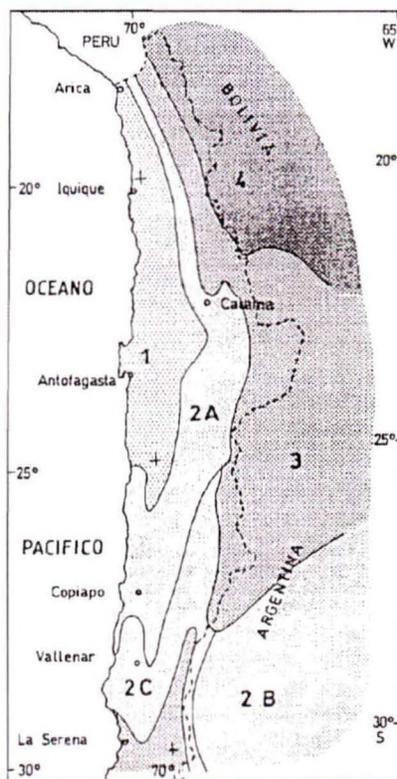


Fig. 4.4.- Mapa Climático actual del Norte Grande (Ortlieb, 1995)

#### 4.4.- La Camanchaca

La “camanchaca” genera un fenómeno consistente en el “levantamiento” y transporte desde el Océano Pacífico, de iones (que darán origen a sales) disueltos en gotas de neblina. Durante la mañana, la “camanchaca” se desvanece dando paso a los efectos de la radiación solar. Este ciclo se repite prácticamente a diario, humedeciendo la superficie del terreno por las noches y secándola durante el día. La radiación solar que aparece durante el día evapora estos pequeños volúmenes de agua infiltrada, originando la cristalización de sales. La Tabla 4.1 muestra un análisis químico de la camanchaca realizado en la ciudad de Antofagasta, donde queda en evidencia que los aniones de cloruros (Cl), sulfatos (SO<sub>4</sub>) y nitratos (NO<sub>3</sub>), y cationes sodio (Na) y calcio (Ca), se encuentran presentes en relativa abundancia

Es necesario hacer notar que si bien las concentraciones de iones pueden ser bajas, si se comparan con la que se encuentran en otras muestras de agua, por ejemplo en el agua potable, su relevancia está asociada al efecto que genera el aporte diario durante miles de años, lo que en definitiva genera un importante grado de concentración de iones generadores de sales solubles, principalmente del tipo Cloruros.

Tabla 4.1.- Resultados de análisis químicos a muestras de agua condensada de "Camanchaca" (Olguín, 2006)

IONES	CONCENTRACION (mg / l)
Ca <sup>2+</sup>	12
Mg <sup>2+</sup>	6.1
Na <sup>+</sup>	30
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	32
Cl <sup>-</sup>	46
NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	19
Otros	17.3
Total sólidos disueltos	154
pH a 23°C	6.80

---

## 5.- DEPÓSITOS DE SUELOS SALINOS DEL NORTE GRANDE

### 5.1.- Generalidades

Respecto de la acumulación de sales en depósitos de suelos sedimentarios, se reconoce que éstas pueden tener principalmente dos orígenes:

- Marino
- Continental

En el caso particular de los depósitos del Norte Grande, estos orígenes se superponen, puesto que existe evidencia geológica del avance del borde costero hacia el continente, favoreciendo el desarrollo de depósitos marinos, que actualmente afloran en zonas continentales y además, las condiciones climatológicas generan los niveles de evaporación que se asocian a un origen continental.

Las condiciones geológicas, geográficas y climáticas sugieren una clasificación condicionada por el efecto marino reciente, el cual como se ha descrito se circunscribe a la zona de la planicie costera y al margen occidental de la cordillera de la costa, hasta niveles típicos en torno a los 800 m.s.n.m. Bajo esta perspectiva, los depósitos salinos asociados a condiciones marinas corresponden a lo que en trabajos anteriores se ha denominado como la costra salina de la planicie costera. Por otra parte, los depósitos asociados a un ambiente continental, corresponderían a los depósitos de nitratos y sales, emplazados desde el margen oriental de la cordillera de la costa hasta el altiplano chileno. La distribución característica de estos depósitos se presenta en la Fig. 5.1.

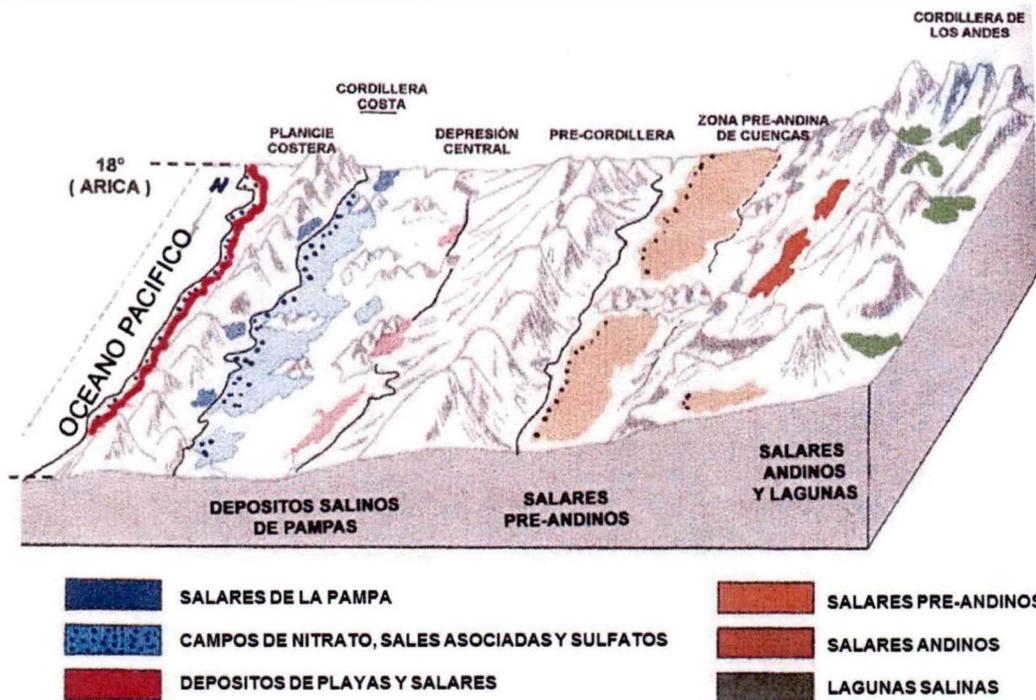


Fig. 5.1.-Distribución espacial de depósitos salinos. (Tamblay 1983, Olgúin 2006)

## 5.2.- Génesis de la Presencia de Sales Solubles

### 5.2.1.- Procesos Evaporíticos Antiguos.

En la Era Jurásica, la retirada del océano del continente, luego de haber inundado gran parte de la actual depresión central del país, favoreció la formación de depósitos de suelos y rocas sedimentarias con sales, esto producto de la importante radiación solar que potenció la evaporación de aguas saturadas de sales.

### 5.2.2.- Depositaciones Marinas Recientes

La actual presencia del Océano Pacífico actúa como un aporte directo de sales solubles al continente, siendo la zona de la Planicie Costera la más afectada. Este

aporte se puede dividir en dos mecanismos principales de traslado e inclusión de sales a los depósitos de suelos del continente. El primero a través de la neblina o “camanchaca” y el segundo mediante la salinización debido al ascenso capilar desde el nivel freático que lleva frentes de humedad hacia la superficie, donde al alcanzar mayores temperaturas ésta se evapora precipitando las sales.

### 5.2.3.- Movilidad Salina Superficial y Subterránea

Consiste en el transporte de sales disueltas en las aguas de cauces superficiales y subterráneos y luego depositadas en cuencas endorreicas con alta tasa de evaporación. Estas aguas, al escurrir preferentemente de Este a Oeste, van salinizándose debido a la lixiviación y disolución de las sales presentes en rocas fracturadas de origen volcánico, rocas carbonatadas y otras formaciones sedimentarias evaporíticas existentes a lo largo de su cauce.

### 5.2.4.- Deposiciones Provenientes de la Atmósfera

Estudios recientes han demostrado que fenómenos meteorológicos también originan la precipitación de sales solubles, específicamente nitratos. Durante el invierno altiplánico y a causa de las intensas tormentas eléctricas que se producen en el Altiplano, el nitrógeno y el oxígeno que se encuentran en la atmósfera en estado gaseoso se enlazan químicamente debido a la elevada energía desarrollada en la atmósfera durante estos eventos climáticos. Así, la nueva sucesión de reacciones químicas atmosféricas darían como resultado valores de concentraciones de nitratos suficientes para que ellos precipiten y sean transportadas a través de cauces superficiales o subterráneos.

### 5.3.- Concentraciones Salinas Típicas

Dependiendo del origen y del proceso de depositación, Skorin (1971) propone diferenciar los tipos de concentraciones salinas que pueden ser encontradas en el Norte Grande, según los siguientes grupos:

- Afloramientos Salinos sobre lagos de agua salada secos  
Constituyen el estado inicial de concentración de sales, se originan de los lagos de agua salada que fueron confinados en el interior del continente por movimientos tectónicos (ejemplo: Salar de Atacama).
- Afloramientos salinos sobre lagos subterráneos  
La fuerte evaporación en grandes superficies ha obligado a las aguas a mantener su nivel de equilibrio a varios metros de profundidad bajo la superficie del suelo. En estas condiciones las sales afloran a la superficie principalmente en zonas de menor cota. Este caso de concentración de sales se presenta claramente en la Pampa del Tamarugal.
- Costra salina en depósitos de nitratos  
Las sales solubles que están disueltas en aguas de lagos cordilleranos o que están cristalizadas en formaciones montañosas elevadas son arrastradas hacia niveles inferiores. Adicionalmente las transformaciones químicas con participaciones del nitrógeno atmosférico producen grandes concentraciones salinas en que predominan los nitratos. Estas concentraciones se forman generalmente en superficies de topografía plana como es el caso de las pampas salitreras.
- Costras salinas en rellenos coluvial-aluvional  
Este tipo de concentraciones salinas se encuentran generalmente encima de los conos de deyección de las desembocaduras de las quebradas costeras. Su aspecto es el de una roca sedimentaria debido a la gran

dureza que origina la “cohesión salina”. También se observan desplazamientos en los granos del suelo ocasionado por el crecimiento de las sales al recristalizar. Se presentan cohesionando suelos de origen coluvial-aluvional formados principalmente por arenas y gravas.

- Costras salinas en estratos arenosos eólicos

En estas costras salinas, las sales solubles se encuentran cohesionando arenas finas de origen eólico. De este modo se forman capas horizontales de espesores de salinidades semejantes a las costras de depósitos de arenas gravosas de origen coluvial-aluvional.

- Costras salinas en depósitos marinos

El proceso de regreso de las sales solubles hacia el mar ha formado costras salinas en depósitos de conchuelas marinas de distintos grados de molienda. Este caso se observa en los suelos situados cerca de la costa, encima de la roca basal que aflora en diversos puntos.

- Incrustaciones salinas en rocas agrietadas

Esta concentración de sales se presenta únicamente en rocas, ocupando las grietas de éstas. Su salinidad es la más alta de todos los casos mencionados, siendo casi siempre sal pura (salinidad infinita).

#### 5.4.- Perfil de Salinidad

Desde el punto de vista del desarrollo de ciudades y zonas industriales del Norte Grande, las nuevas estructuras tienden a concentrarse en zonas correspondientes a costra salina en depósitos de nitratos, costras salinas en rellenos coluvial-aluvional y costras salinas en estratos arenosos eólicos.

Es importante destacar que para estos tres tipos de costras salinas, se tiene que la distribución de las sales en profundidad (Perfil de Salinidad) sigue un patrón

característico, como el que se muestra en los esquemas de la Fig. 5.2. En ellos se advierte que existe una distribución tal, que desde la superficie aumenta con la profundidad hasta alcanzar una valor máximo, típicamente a profundidades entre 0.5 m y 4.0 m. Pasado el valor máximo, la situación se revierte y el contenido de sales disminuye con la profundidad, pero con una tasa de variación bastante más suave.

El horizonte donde se concentran los mayores contenidos de sal corresponde a lo que se denomina “Costra Salina” y normalmente presenta espesores que van desde los 0.5 m a 1.0 m.

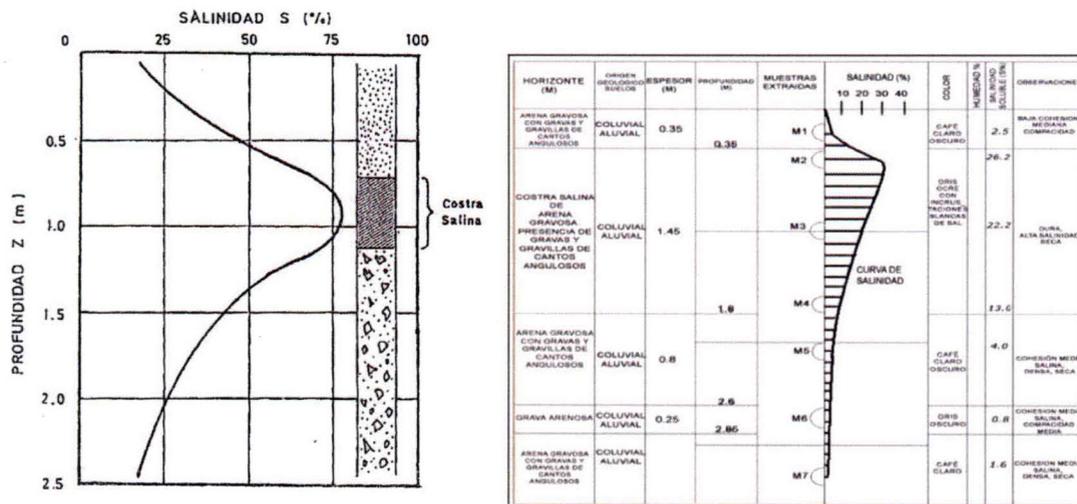


Fig. 5.2.- Perfiles de salinidad característicos (Skorin, 1971; Tamblay, 1983)

La salinidad de la costra salina presenta una alta variación, que depende entre otras cosas de las características de la formación salina. El rango de variación observado alcanza hasta un 110%, donde las mayores concentraciones de sal se han registrado en formaciones del tipo evaporítico marino. Para la costra salina de la “Planicie Costera”, la salinidad presenta típicamente valores entre 20 y 70%.

Adicionalmente, análisis químicos realizados a muestras de suelos salinos obtenidas desde diferentes sectores de la zona norte de Chile permiten establecer que en los suelos de la “Planicie Costera”, las sales presentes se encuentran

---

predominantemente constituidas por cloruros, mientras que hacia la precordillera se observa una mayor concentración de sulfatos.

La distribución en profundidad de las sales facilita geotécnicamente el tratamiento de estos suelos, puesto que siempre existe una profundidad bajo la cual la salinidad es lo suficientemente baja para su uso como terreno de fundación. Por lo tanto, desde un punto de vista técnico existe una solución factible y el problema se concentra en compatibilizar la solución con los recursos disponibles para el desarrollo del proyecto determinado.

---

## 6.- SUELOS SALINOS COMO TERRENO DE FUNDACIÓN

### 6.1.- Problemática de los Suelos Salinos del Norte Grande

En la zona norte del país, que abarca desde las regiones de Arica-Parinacota hasta la de Atacama, se tienen innumerables antecedentes de edificaciones que han sufrido serios daños estructurales, inclusive llegando al colapso de algunas de ellas. El factor común de estas anomalías es la presencia de depósitos de suelos con contenidos de sales y la presencia no esperada de agua, que en definitiva se tradujo en importantes deformaciones, o asentamientos del terreno.

Un depósito de suelos salinos en su condición natural, vale decir, en condiciones de muy baja humedad o seco, presenta en general, una apreciable competencia geomecánica, caracterizada por una importante rigidez y una elevada resistencia al corte. En ocasiones esta alta competencia puede ser tal, que resulten difíciles los trabajos de excavaciones y movimientos de tierras, requiriéndose el uso de maquinaria pesada de excavación y/o explosivos.

Dicha competencia geomecánica se genera a partir del efecto cementante que tienen las sales en el esqueleto granular del suelo. Los cristales de sal inmersos en el material se encuentran adheridos a los granos, o en los contactos entre partículas, generando una unión cementada de gran resistencia. Sin embargo, un aporte de agua en el espacio intersticial de la estructura granular, ya sea como un frente de humedad o un flujo, genera la disolución de los cristales de sal, reblandeciendo en primer término la condición de cementante y finalmente eliminando los cristales.

Al romperse la ligazón salina en los contactos entre partículas de suelo, la rigidez y resistencia del terreno es aportada exclusivamente por el esqueleto granular, por lo que este último debe reordenarse hasta compatibilizar su empaquetamiento con el nivel de carga aplicado. Este reordenamiento se genera producto de la variación volumétrica del material y se traduce en deformaciones, cuya magnitud depende

principalmente de la estructura suelo-sal y nivel de ordenamiento original o densidad inicial.

Como ya se indicó, las condiciones climáticas del Norte Grande, caracterizados por un ambiente desértico, hacen que las fuentes naturales de agua sean escasas a nulas, por lo tanto las fuentes principales de flujos gatillantes del proceso de dilución son de origen antrópico, por lo que, en general, son evitables si se toman los resguardos y acciones adecuadas.

## 6.2.- Fuentes de Aporte de Agua

Existen diversas fuentes de aportes de agua, cuyos resultados en depósitos de suelos salinos pueden ser importantes asentamientos del terreno. En el primer grupo se encuentran las más comunes y que por lo tanto deben tenerse siempre presentes:

- Filtraciones de cañerías de agua potable (matriz o domiciliaria)
- Filtraciones de tuberías de alcantarillado (colector o domiciliaria)
- Riego de jardines
- Lavado de autos, mascotas u otros
- Filtraciones y derrames desde piscinas
- Choques contra grifos
- Aumento de lluvias debido a cambio climático

En un segundo grupo de fuentes aportantes de agua, cuya ocurrencia es menos probable, se encuentran las siguientes:

- Extinción de incendio
- Derrame de agua desde camiones aljibes
- Derrame de agua desde industrias



Como se observa, en la fase de carga para la condición natural del terreno, la magnitud de las deformaciones son reducidas, inclusive el vibrado en condición de terreno natural, genera una deformación prácticamente nula. Sin embargo, al incorporar el proceso de inundación, y con ello la disolución de sales, el nivel de deformaciones aumenta considerablemente, aun cuando no se varía la carga solicitante. Más aun, en el caso del ejemplo, también se generan deformaciones importantes por la aplicación de vibración, lo cual da cuenta de un proceso de reacomodo de las partículas constituyentes del suelo.

A partir de los resultados de este tipo de ensayos, es posible confirmar que el comportamiento final del depósito no está controlado solo por la magnitud y tipo de sales solubles presentes en un determinado depósito salino, sino que también es relevante la estructura granular que presenta el material. En este contexto, resulta útil tener en consideración que a igualdad de sales solubles, la estructura del suelo puede hacer la diferencia entre un terreno colapsable a otro de limitado asentamiento. Por ejemplo, en depósitos salinos, un suelo fino de baja permeabilidad, en general, por su estructura (Fig. 6.2) tiende a una respuesta de limitado asentamiento; en cambio, un suelo arenoso suelto, puede desarrollar un importante colapso producto de la disolución de sales y abrupto reacomodo de partículas (Fig. 6.3).

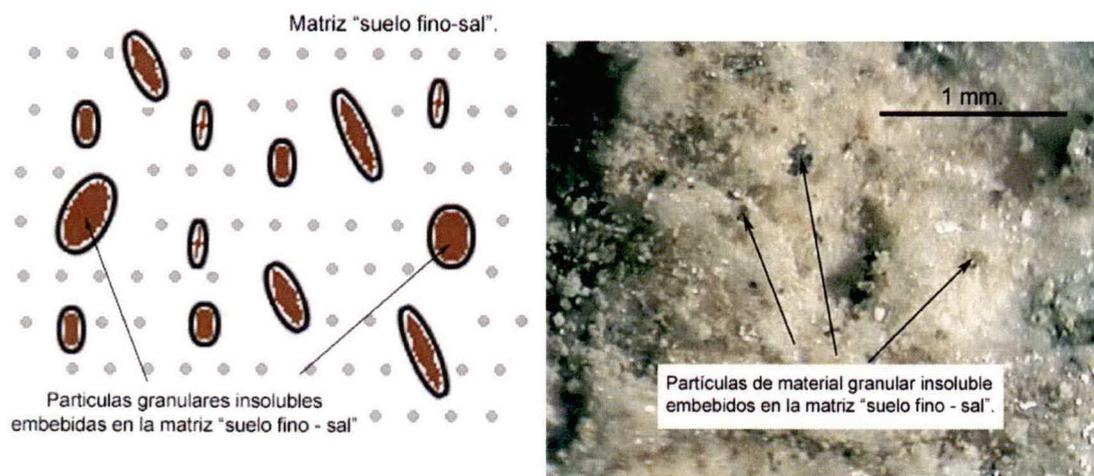


Fig. 6.2.- Condiciones asociadas a una estructura de limitado asentamiento (Olguín, 2006).

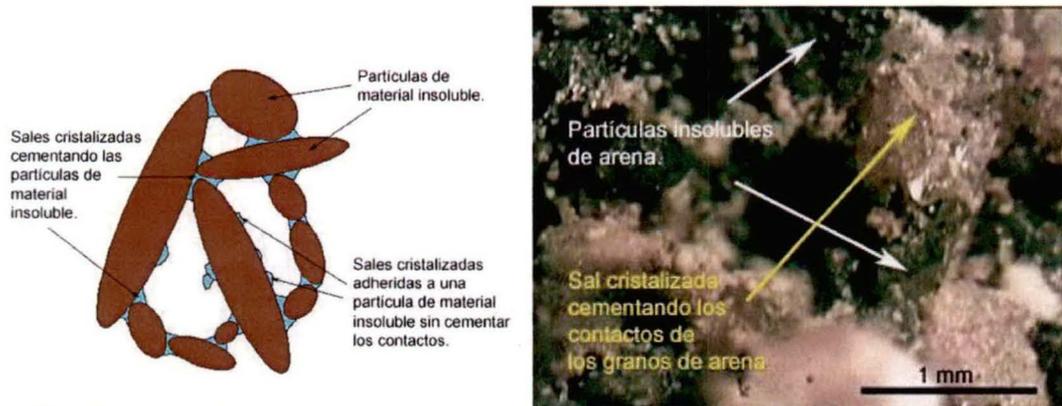


Fig. 6.3.- Condiciones asociadas a una estructura colapsable (Olguín, 2006).

---

## 7.- PARTICULARIDADES DE ENSAYOS EN SUELOS SALINOS

En la determinación de las propiedades índices de suelos salinos existen dificultades al aplicar los procedimientos convencionales, debido a que el agua utilizada en su ejecución modifica el material original, al disolverse las sales de la muestra. Consecuentemente, los ensayos deben tener presente esta condición.

Por ejemplo, el ensayo granulométrico debe ser realizado con lavado de la muestra y con corrección del peso total de dicha muestra, según la cantidad de sales solubles previamente medida en el mismo material.

Por otra parte, los ensayos de peso específico de los sólidos (material no soluble) deben ser realizados con el material previamente lavado y secado. Valores característicos de los suelos nortinos varían entre 2.6 y 2.7.

Mediciones de densidad también pueden ser objeto de corrección por contenido de sales solubles. En este caso la densidad corregida representa el nivel de densificación real del terreno y está asociada a la condición teórica de igual estructura granular sin sales solubles.

No está demás señalar que la caracterización clásica de suelos, a través de propiedades índices, en el caso de suelos salinos no permite visualizar las complejidades geomecánicas de estos materiales. Por esto, la caracterización geotécnica de suelos salinos debe ser realizada mayoritariamente en base a establecer el perfil de salinidad y la evaluación directa de la colapsabilidad, o nivel de asentamiento por disolución de sales.

---

## 8.- CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELOS SALINOS.

### 8.1.- Consideraciones para la Definición de la Campaña de Exploración

Para llevar a cabo el estudio geotécnico del terreno de emplazamiento de un proyecto u obra de ingeniería, es necesario identificar previamente las características y condicionantes del proyecto, tales como área de influencia y dimensiones de las estructuras, entre otras. A partir de ésta información es posible definir la campaña de exploración geotécnica, la que debe cumplir con los requisitos mínimos establecidos en la norma chilena NCh1508Of2008.

Teniendo en consideración por una parte que las costras salinas de la planicie costera se encuentran típicamente entre los 0.5 y 4 m de profundidad, y por otra que la profundidad de influencia de estructuras comunes (ej. viviendas, industrias menores) puede extenderse hasta los 3 a 4 m, es recomendable considerar una profundidad de exploración mínima de 5 m.

La exploración del subsuelo se puede efectuar a través de calicatas, zanjas y, en caso de requerir mayores profundidades de exploración, mediante sondajes. Si se considera el uso de estos últimos como elementos de prospección, en suelo salinos se deben considerar técnicas de perforación sin agua. Esta restricción evidentemente complejiza la ejecución de sondajes.

### 8.2.- Definición del Perfil de Salinidad

El conocer la distribución del contenido de sal en profundidad permite optimizar la definición y diseño de la solución de fundación a adoptar, en términos de determinación de la profundidad de sello y tipo de sistema de fundación.

Para la determinación del perfil de salinidad en profundidad se recomienda llevar a cabo, desde cada prospección geotécnica, un muestreo secuencial cada 0.5 m de

profundidad, determinando el contenido de sales solubles totales de acuerdo con la norma LNV 8-84 "Determinación de sales solubles en agregados pétreos empleados en pavimentos flexibles".

### 8.3.- Ensayos de Placa de Carga In-situ

Los resultados de la campaña de exploración geotécnica y la obtención del perfil de salinidad del terreno, permiten reconocer el marco general de la problemática del suelo salino que se está enfrentando, pero no permiten estimar el nivel de asentamientos en condición seca e inundada. Por este motivo se recomienda llevar a cabo ensayos de placa de carga in-situ a nivel de sello de fundación, aplicando la carga de las fundaciones (permanente + eventual) e inundando con agua. Además, se consideran etapas de vibración y/o ciclaje para las condiciones pre, durante y post inundación. De esta manera es posible cuantificar directamente el comportamiento tensión-deformación del terreno de fundación, lo cual permitirá definir una solución de fundación compatible con la eventual colapsabilidad del terreno.

---

## 9.- ALTERNATIVAS DE SOLUCIONES DE FUNDACIÓN EN SUELOS SALINOS

### 9.1.- Contenido de Sales Solubles Crítica

En base a la práctica ingenieril y constructiva sobre suelos salinos se ha definido un criterio que permite establecer cuando se deben adoptar medidas para evitar la generación de asentamientos por disolución de sales. Este criterio de origen empírico establece un valor crítico de 3% de contenido de sales solubles. Sobre este valor se considera que se está en presencia de un suelo salino, que potencialmente puede desarrollar asentamientos por una eventual aparición de agua que disuelva dichas sales.

En consecuencia, una vez obtenidos los resultados de los ensayos de laboratorio y definido el perfil de salinidad, se debe identificar si en la profundidad de influencia de las fundaciones existen estratos con salinidad mayores a 3%. Para zapatas aisladas y corridas estas profundidades son 2 y 3 veces el ancho menor, respectivamente. De confirmarse contenidos de sales solubles sobre el 3% se deben adoptar las medidas de mitigación para evitar asentamientos generados por la disolución de las sales.

### 9.2.- Alternativas Conceptuales de Solución

En caso de enfrentarse a suelos salinos con una salinidad mayor a la crítica, las posibles soluciones, desde un punto de vista conceptual, se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Evitar los aportes de aguas definidos como comunes (acápite 6.2)
- Disponer el sello de fundación por debajo de la costra salina
- Impermeabilización del terreno de fundación
- Mejoramiento del terreno

La primera alternativa consiste básicamente en proteger, por ejemplo con el uso de doble tubería, las redes domiciliarias de agua potable y alcantarillado y matrices y colectores. Adicionalmente, se debe instruir debidamente a los propietarios para evitar riegos y todo tipo de derrame de aguas en el entorno de la vivienda.

La segunda opción es válida para los suelos salinos de la planicie costera, en donde se observa la presencia de una costra de sal que se encuentra típicamente a una profundidad entre 0.5 y 4 m, bajo la cual la salinidad disminuye progresivamente con la profundidad. En este contexto, una alternativa para la fundación de estructuras es disponer el sello de fundación a un nivel tal que la salinidad en la profundidad de influencia de la fundación sea menor a la salinidad crítica (3%).

La tercera alternativa consiste en evitar cualquier infiltración de agua o fluidos solventes hacia el terreno de fundación. Esto se puede lograr mediante la impermeabilización de los sectores de apoyo de fundaciones, sumado a un control de las posibles aguas superficiales.

La cuarta alternativa conceptual es realizar un mejoramiento del terreno a través de la inundación previa del sector de emplazamiento del proyecto y la pasada de rodillo vibratorio de alta energía. De esta forma se induce la disolución de las sales y la densificación, con lo cual el diseño de fundaciones puede ser abordado mediante procedimientos tradicionales.

Es importante mencionar que las alternativas conceptuales anteriormente descritas no son excluyentes. Consecuentemente, dependiendo de las condicionantes de cada proyecto, es posible considerar la elección de más de una de las alternativas, con el objetivo de optimizar la solución de fundación

### 9.3.- Alternativas de Solución

#### 9.3.1.- Protección de Cañerías

Un ejemplo de la aplicación de esta alternativa es en obras de agua potable y alcantarillado. En matrices, o colectores, tal como se aprecia en la fotografías de las Figs. 9.1 y 9.2, las tuberías son recubiertas con geomembranas. Otra opción es considerar doble tubo.



Fig. 9.1.- Instalación de membranas impermeables en ductos de agua (Olguín, 2006).



Fig. 9.2.- Tuberías recubiertas con membranas impermeables (Olguín, 2006).

En obras que involucren la conducción de líquidos solventes se debe tener especial atención en la materialización de las uniones tanto de tuberías como de las membranas de recubrimiento, debido a que son puntos en los cuales se podría generar la filtración de fluidos.

### 9.3.2.- Sello de Fundación por Debajo de la Costra Salina

Tal como ha sido expuesto en capítulos anteriores del presente documento, los suelos salinos de la planicie costera presentan una concentración de salinidad, o costra salina, que se encuentra típicamente a una profundidad entre los 0.5 a 4 m. Bajo esta costra, la salinidad de las unidades de suelo disminuye progresivamente con la profundidad. En este contexto, una alternativa para la fundación de estructuras es disponer el sello de fundación por debajo de la costra salina, a un nivel tal que la salinidad en la profundidad de influencia bajo la fundación, sea menor a 3%, que corresponde al valor definido como salinidad crítica.

De esta forma, los grandes asentamientos del terreno producidos por la eventual disolución de las sales se generarían por sobre el nivel de apoyo, y por tanto no afectarían la integridad de la estructura. En la Fig. 9.3 se presenta un ejemplo de fundación mediante zapata corrida tradicional utilizada en la población “Eduardo Frei” de Antofagasta.

Esta solución de fundación es menos conveniente, desde un punto de vista económico, a medida que la costra salina se encuentre a mayor profundidad. En estos casos, para lograr fundar sobre unidades de suelos con salinidades adecuadas, es decir menores a 3%, es recomendable considerar el uso de micropilotes o pilas de fundación, tal como se esquematiza en la Fig. 9.4.

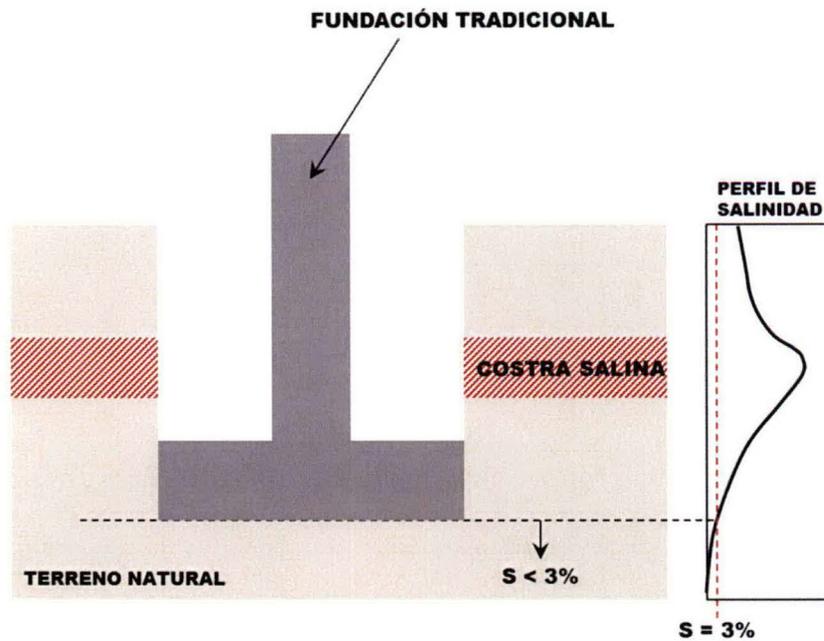


Fig. 9.3.- Fundación apoyada por debajo de la costra salina.

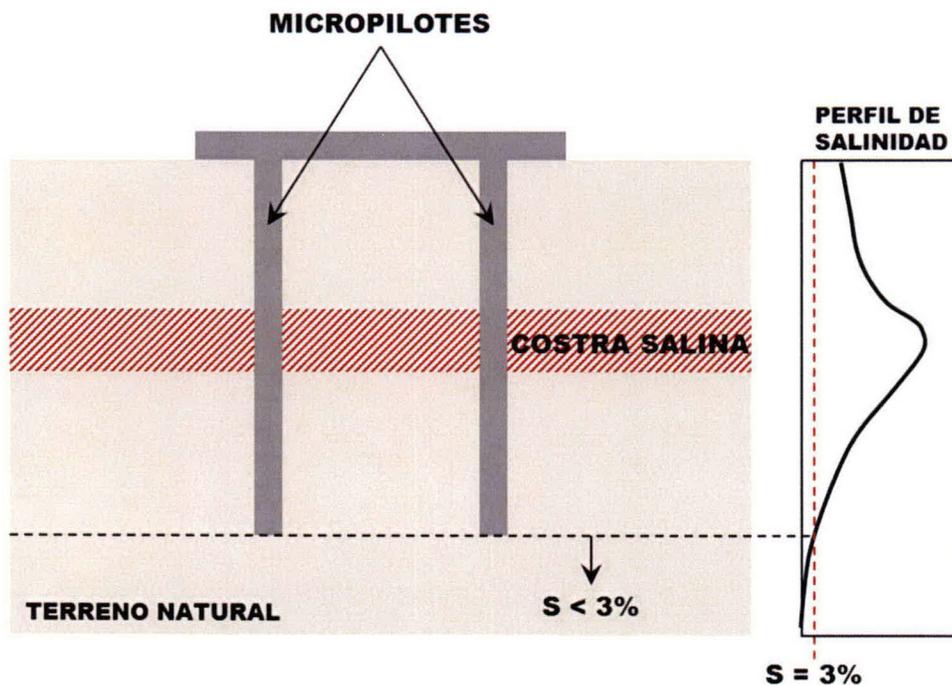


Fig. 9.4.- Uso de micropilotes apoyados por debajo de la costra salina.

Una limitación de esta alternativa de solución es que asentamientos de elementos no-estructurales de la vivienda pueden ocurrir. Por ejemplo, los radieres pueden sufrir agrietamiento. Esto puede ser evitado utilizando losas armadas que descarguen en las fundaciones. Dependiendo de la topografía que presente el

terreno está la alternativa de generar una plataforma mediante una excavación masiva que alcance una elevación por debajo de la costra salina.

### 9.3.3.- Impermeabilización del Terreno de Fundación

Una tercera alternativa es evitar la infiltración de líquidos solventes hacia el terreno de fundación mediante la implementación de sistemas de captación y drenaje de aguas y fluidos e impermeabilización del sector de influencia de las fundaciones o estructuras.

Una ventaja de esta alternativa es que es de fácil implementación, no obstante, es una alternativa vulnerable si no se realiza con el adecuado control y con materiales de calidad.

Para el caso de fundaciones de estructuras convencionales, por ejemplo casas, bodegas, etc., en la Fig. 9.5 se presenta una alternativa de impermeabilización del sello de fundación utilizando geomembranas.

Tal como se observa en la Fig. 9.5, la impermeabilización abarca toda la zona de edificación con el fin de evitar la infiltración de líquidos que pudiesen provenir desde la estructura misma. Para el diseño final de la solución particular de fundación se deberán identificar las posibles infiltraciones provenientes desde fuentes externas con el objetivo de complementar la solución indicada en la Fig. 9.5.

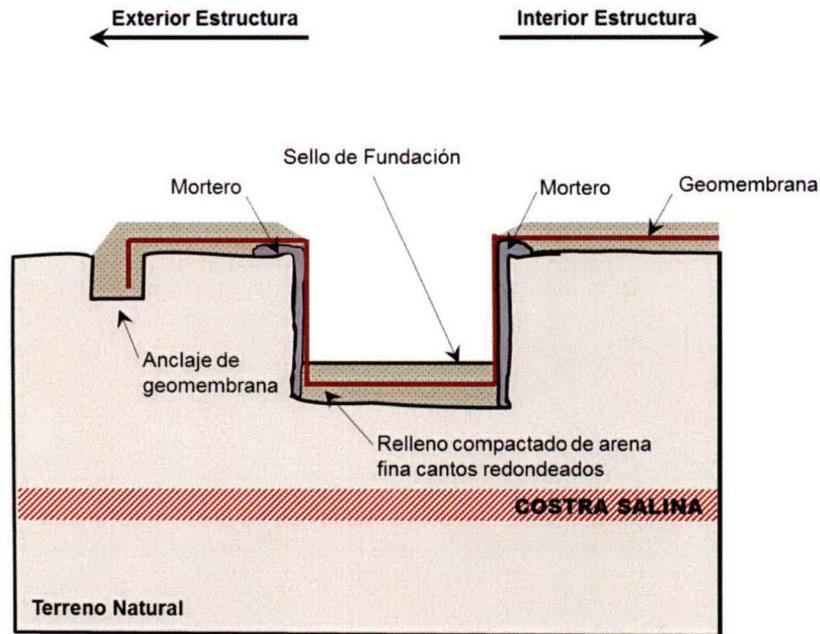


Fig. 9.5.- Impermeabilización del terreno de fundación de estructuras convencionales (modificada de Olguín, 2006).

Por otra parte, en sectores donde se producirá el escurrimiento superficial de fluidos, como por ejemplo en pavimentos y patios de lavado, además de la impermeabilización de la estructura misma, se recomienda considerar un sistema de colección y conducción de los líquidos, tal como se esquematiza en la Fig. 9.6.

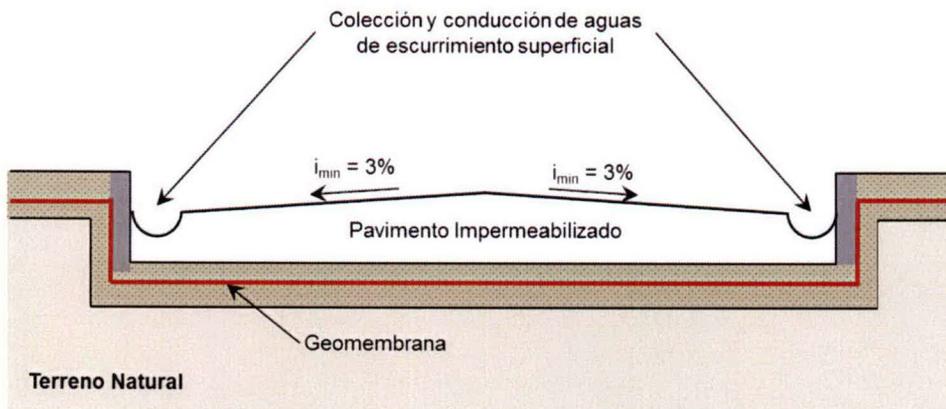


Fig. 9.6.- Sistema de colección de líquidos de escurrimiento superficial sobre pavimentos (Modificada de Olguín, 2006)

---

#### 9.3.4.- Mejoramiento del Terreno

Debido a que los mayores problemas asociados a los suelos salinos son la generación de importantes asentamientos provocados por la disolución de las sales, una alternativa de mejoramiento de esta condición es inducir previamente la destrucción de la cementación generada por las sales mediante la inundación del terreno. Esta inundación debe ser posteriormente acompañada por una compactación enérgica de la superficie, mediante el paso de rodillos vibratorios, con el objetivo de reorganizar la estructura interna del suelo hasta una condición de mayor compacidad. El peso del equipo y número de pasadas dependerá del grado de compactación y profundidad de mejoramiento que se quiera alcanzar.

La aplicación de esta alternativa de mejoramiento debe tener presente que una inundación no controlada podría gatillar la generación de asentamientos en los terrenos aledañas a la zona del proyecto.

Alternativamente, es posible considerar el mejoramiento de terreno a través del procedimiento convencional de retiro del suelo salino y posterior reemplazo con material seleccionado en un espesor de al menos dos veces el ancho menor de la zapata de fundación considerada.

## 10.- CONCLUSIONES

- Al abordar el estudio geotécnico de un depósito de suelos “regional”, se requiere reconocer a priori sus singularidades, de forma de orientar, tanto la exploración del terreno como los ensayos, a la verificación y cuantificación de dichas singularidades, pudiendo desarrollarse así las soluciones geomecánicas que garanticen el adecuado comportamiento de las diferentes obras de cada proyecto.
- En el caso específico de los depósitos de suelos salinos que existen en el norte de Chile, la problemática de ingeniería civil se centra en la súbita aparición de asentamientos del terreno, gatillada por la disolución de sales, generada por la presencia de agua. La magnitud de estos asentamientos está relacionada principalmente con la cantidad de sales solubles, su distribución en profundidad, tipo de suelo y modo del aporte de aguas. Por lo tanto, todo estudio geotécnico que se realice en el norte de Chile debe perentoriamente en su inicio descartar, o confirmar, la existencia de suelos salinos. Para este último caso, en el presente documento se proporcionan metodologías de análisis y se proponen alternativas de soluciones geotécnicas.
- El horizonte donde se concentran los mayores contenidos de sal corresponde a lo que se denomina “Costra Salina” y normalmente presenta espesores que van desde los 0.5 m a 1.0 m.
- En la zona norte del país, que abarca desde las regiones de Arica-Parinacota hasta la de Atacama, se tienen innumerables antecedentes de edificaciones que han sufrido serios daños estructurales, inclusive llegando al colapso de algunas de ellas. El factor común de estas anomalías es la presencia de depósitos de suelos con contenidos de sales y la presencia no

esperada de agua, que en definitiva se tradujo en importantes deformaciones, o asentamientos del terreno.

- Existen diversas fuentes de aportes de agua, cuyos resultados en depósitos de suelos salinos pueden ser importantes asentamientos del terreno. Estas fuentes se resumen en la tabla siguiente:

<b>Frecuencia</b>	<b>Descripción del aporte de aguas</b>
más comunes	Filtraciones de cañerías de agua potable (matriz o domiciliaria)
	Filtraciones de tuberías de alcantarillado (colector o domiciliaria)
	Riego de jardines
	Lavado de autos, mascotas u otros
	Filtraciones y derrames desde piscinas
	Choques contra grifos
	Aumento de lluvias por cambio climático
menos probable	Extinción de incendio
	Derrame de agua desde camiones aljibes
	Derrame de agua desde industrias
carácter fortuito	Derrames de solventes desde industrias
	Falla de calefactores solares
	Rotura de camión aljibe (choque u otro evento)
	Rotura de estanque de agua

- La práctica constructiva sobre suelos salinos ha establecido empíricamente que alrededor de un 3% de salinidad, corresponde al valor crítico sobre el cual es esperable la generación de asentamientos importantes en caso de presencia de agua.

- En caso de enfrentarse a suelos salinos con una salinidad mayor a la crítica, las posibles soluciones, desde un punto de vista conceptual, se pueden agrupar de la siguiente forma:
  - Evitar los aportes de aguas definidos como comunes (acápite 6.2)
  - Disponer el sello de fundación por debajo de la costra salina
  - Impermeabilización del terreno de fundación
  - Mejoramiento del terreno
  
- En la determinación de las propiedades índices de suelos salinos existen dificultades al aplicar los procedimientos convencionales, debido a que el agua utilizada en su ejecución modifica el material original, al disolverse las sales de la muestra. Consecuentemente, los ensayos deben tener presente esta condición. La caracterización clásica de suelos, a través de propiedades índices, en el caso de suelos salinos no permite visualizar las complejidades geomecánicas de estos materiales. Por esto, la caracterización geotécnica de suelos salinos debe ser realizada mayoritariamente en base a establecer el perfil de salinidad y la evaluación directa de la colapsabilidad, o nivel de asentamiento por disolución de sales.