

Prof. Dr. Juan Brüggen

Geología de los yacimientos de salitre de Chile

Sobre los yacimientos de salitre existe una copiosa literatura y el origen del salitre, especialmente, ha atraído la atención de numerosos investigadores. En casi todas las publicaciones referentes a esta materia se nota que los autores no se han dado cuenta del desarrollo geológico moderno del norte de Chile.

De los trabajos más importantes sobre salitre merece citarse la obra de Semper y Michels, a pesar de que ellos se refieren especialmente al punto de vista técnico-económico. Un trabajo que se basa en las ideas modernas de la Geomorfología es la publicación de Whitehead, que contiene numerosas observaciones de importancia. La composición mineralógica de los yacimientos salitrales, desconocida casi en absoluto hasta hace poco, ha sido ampliamente estudiada por Wetzel.

Pero detrás de estas cuestiones mineralógicas y morfológicas, que se relacionan con la repartición y composición de los yacimientos salitrales, están los problemas fundamentales, de cómo se originaron estos yacimientos, de dónde proviene el nitrógeno y cuáles han sido los procesos que intervinieron en su combinación como nitrato. El geólogo debe limitarse solamente a escoger aquella de las teorías formuladas que más se adapte a sus observaciones, y la demostración definitiva, en caso de ser posible, tendrá que ser el resultado de las investigaciones de los especialistas en Bacteriología, Meteorología, Química, etc.

Haremos en primer lugar una corta reseña descriptiva de los depósitos, para tratar en seguida las diversas teorías formuladas hasta ahora. Como base de esta descripción nos servirán nuestras observaciones sobre la geología del norte de Chile, que hemos expuesto más arriba.

A) DESCRIPCION DE LOS YACIMIENTOS DE SALITRE DEL NORTE DE CHILE

LA REPARTICIÓN DE LOS DEPÓSITOS

En un mapa de los yacimientos de salitre de Chile salta a la vista una pronunciada regularidad en la distribución de los depósitos explotables. En aquella parte en que existe el gran valle Longitudinal, entre el interior de Pisagua y El Toco, los depósitos de salitre están en la falda oriental de la Cordillera de la Costa. Al norte de Pozo Almonte, o en El Toco, donde los cerros de la costa suben lentamente en forma de terrazas rocosas o de superficies de antiguos bolsones, comien-

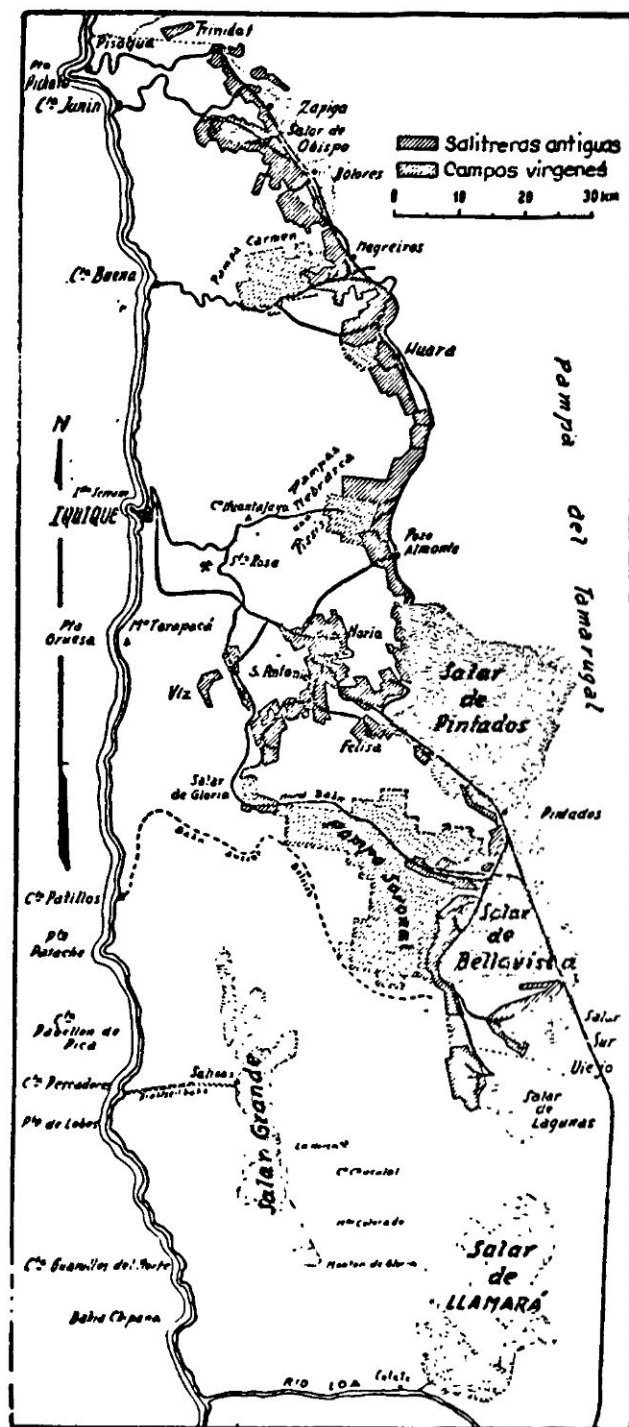


Fig. 1.—Mapa de las salitreras de Tarapacá

zan los yacimientos a pocos metros o directamente sobre los sedimentos modernos de la Pampa del Tamarugal y se extienden a menudo por cientos de metros y a veces por varios kilómetros hacia el oeste, llegando a alturas entre 50 y 100 metros sobre el suelo de la Pampa. Pero donde los cerros de la costa se elevan con declive más fuerte, la zona de yacimientos explotables que se presenta al pie de dichos cerros, es muy angosta. Las faldas abruptas, como por ejemplo aquellas situadas en el borde occidental del Salar de Pinchados, son desfavorables.

Anteriormente al relleno actual del Valle Longitudinal los campos de salitre deben haberse extendido más al este, como queda comprobado por los yacimientos ubicados en las colinas que se hallan antepuestas como islas a la Cordillera de la Costa, de la cual han sido separadas por el relleno moderno (Fig. 3).

Fuera de esta zona principal se encuentran yacimientos importantes también en el interior de la Cordillera de la Costa, en depresiones sin desagüe, que frecuentemente no están en comunicación con el Valle Longitudinal. Como ejemplo de este caso se pueden citar los campos de Viz, Gloria, Cóndor, etc., o aquellos que están separados del Valle Longitudinal

por la falla del pie oriental de la Cordillera de la Costa, como ocurre con una parte de la Pampa del Soronal, al S. E. de Iquique, o la Pampa Pissis al E. de la

misma ciudad. En forma parecida a los campos de la ladera oriental de la Cordillera de la Costa, se presenta en estas pampas el caliche explotable en forma de grandes manchas irregulares, pero sin estar ligado a puntos determinados por su geología o morfología (Fig. 4).

En las pequeñas depresiones sin desagüe, con fuertes pendientes, se observa la disposición ya mencionada, de un salar central ocupando la parte más baja de la depresión, y en los faldeos que la circundan aparecen los depósitos de salitre. Yacimientos explotables existen hasta 10 kms. de la costa, como en la antigua Oficina Viz de Iquique. En los yacimientos vecinos de Providencia y La Unión no se han formado las costras de sal en el piso de la depresión sino que solamente una capa de salitre rica en sal (Fig. 1).

Los depósitos salitrales no se limitan a la Cordillera de la Costa, pues los encontramos también, aunque pobres para ser explotados, al pie de la Alta Cordillera. En el año 1891, una comisión fiscal reconoció cierta zona salitral entre los valles de Soga y Aroma, con 16 kms. de largo y 8 kms. de ancho. La potencia era solamente de 10 a 30 cms. y las leyes variaban entre 2 y 18%, llegando a veces hasta 30%. Por el norte, esta zona se extiende hasta el valle de Chiza, un afluente del río Camarones.

También la zona principal de campos salitrales, situada al pie de la Cordillera de la Costa, se puede seguir hacia el norte mucho más allá de los yacimientos conocidos desde antiguo y que terminaban al norte de Zapiga, en la Oficina Trinidad. Así se han descubierto ricos yacimientos cerca de la quebrada de Tana, en superficies planas, que se inclinan desde la cordillera hacia el norte, lo mismo que ocurre en la zona principal que se encuentra más al sur.

En la parte más septentrional, al norte de Zapiga, la pampa salitrera sigue sin interrupción desde los cerros de la Cordillera de la Costa hasta la Cordillera de los Andes, donde continúa como superficie del gran plano inclinado formado por la Formación Liparítica. Mientras que más al sur, esta superficie antigua queda cubierta por los sedimentos recientes de las quebradas andinas. La antigua superficie del valle longitudinal de Tana está cubierta por innumerables millones de placas discoidales de anhidritina, debajo de las cuales existen pequeñas cantidades de salitre con leyes alrededor de 6%. Una concentración algo mayor se observa solamente en una grada tectónica del llano, inclinada hacia el este y que se encuentra más o menos en el medio de la pampa.

La conservación del caliche en esta situación se debe al hecho que los esteros andinos alcanzan el mar por los profundos cañones y dejan sus sedimentos en el mar y no en el valle longitudinal, como lo hacen las quebradas de Aroma, Tarapacá, etc.

Esta distribución de los yacimientos pobres y ricos demuestra que antes de la depositación de los sedimentos modernos del Valle Longitudinal existía una capa uniforme de salitre, desde el pie de la Alta Cordillera hasta la costa.

Al sur del grado 21 de latitud, que pasa por el Salar de Lagunas, se encuentra una larga interrupción en la zona salitrera que abarca casi 100 kms., que se debe probablemente a una exploración deficiente de esta zona muy apartada. Pero es posible también que aquí la terraza antepuesta al pie oriental de la Cordillera de la Costa, donde se encuentran los campos principales, se haya hundido a un nivel

más bajo que en el norte y por lo tanto quedaría cubierta por los sedimentos modernos, con lo cual se destruyen los depósitos de salitre.

A continuación sigue el llamado Toco, donde hay condiciones muy parecidas a las de Tarapacá, con la diferencia que la Formación Liparítica representada por la

«coba» roja avanza mucho hacia los cerros de la costa, tal como ocurre también en la Pampa del Soronal, al S. E. de Iquique. En gran extensión, la coba, es decir las tobas liparíticas rojas, están cubiertas por una capa delgada de rodados de la Cordillera de la Costa. El límite entre el suelo de relleno nuevo de la Pampa y el de la terraza baja antepuesta a la costa, aparece muy borrado debido a que el valle del Loa, que corre por el centro del Valle Longitudinal, ha impedido desde mucho tiempo que los sedimentos provenientes del Este se hayan depositado sobre la terraza con salitre. Los sedimentos modernos provenientes de la Cordillera de la Costa son insignificantes.

En el pie de los cerros que se levantan como islas sobre los sedimentos modernos, como por ejemplo el cerro Joya situado en la ribera oriental del Loa, existen grandes yacimientos de salitre. También llevan salitre los antiguos conos de rodados provenientes de la Cordillera Central y que han sido fuertemente corta-

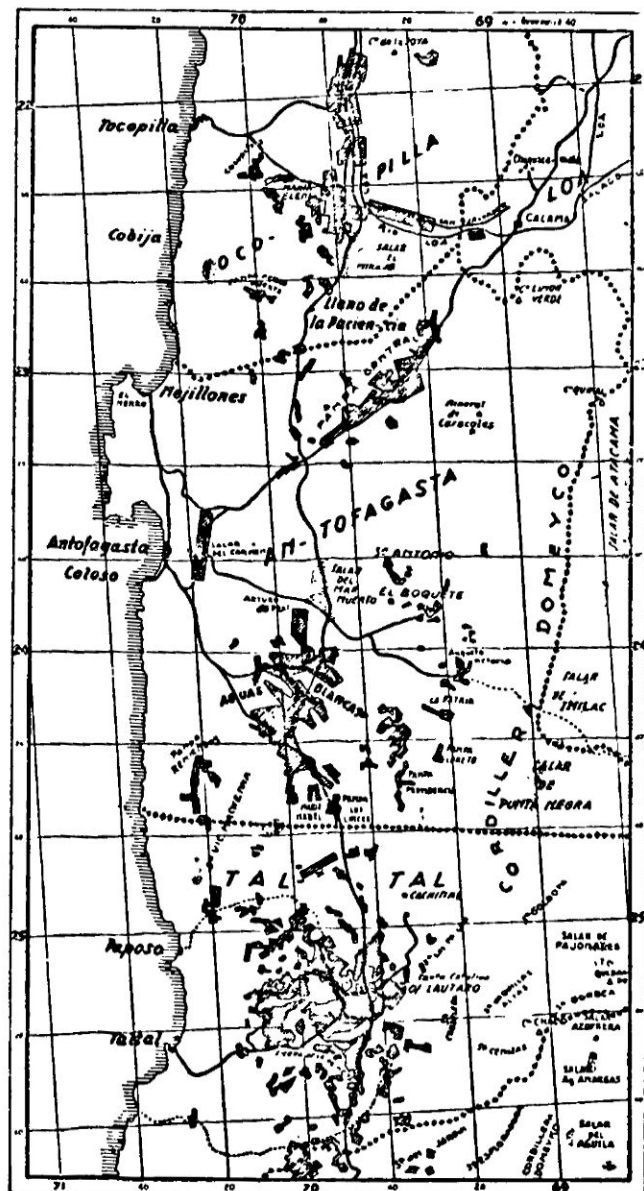


Fig 2.—Las salitreras del Toco, Antofagasta y Taltal

dos por la erosión; el salitre se halla en la antigua superficie del cono que no ha sido alcanzado por la erosión. Estos yacimientos ocupan una posición geológica semejante a los situados al pie de los Andes de Tarapacá. L. Sundt ha observado en los cerros de Chuquicamata pequeñas cantidades de salitre.

Tanto en el distrito del Toco, como también algo más al sur, en Taltal, se encuentran varios depósitos salitrales cercanos a la costa. Pero en estos lugares, lo mismo que en Iquique, el salitre no aparece en los cerros situados en la inmediata vecindad del mar, porque las nieblas frecuentes han disuelto las sales solubles.

En Antofagasta y Taltal falta un valle longitudinal bien formado. Los depósitos de salitre se encuentran principalmente en anchas pampas encerradas entre cerros más altos. En vista de la ausencia de lluvias, el salitre desciende hasta las partes centrales de estas pampas, cuya semejanza con el valle longitudinal de Tana queda subrayada también por la presencia de numerosas concreciones discoidales de anhidritina, aunque de dimensiones más reducidas. En el gran valle de dirección N. E.—S. O. recorrido por el ferrocarril de Antofagasta a Calama, los campos salitreros de Pampa Central llegan hasta el centro de la cuenca, dejando libre solamente las partes más bajas, por donde corre agua ocasionalmente, lo mismo que los pocos valles secos que le caen a esta cuenca desde los cerros vecinos.

En Taltal, según Darapsky, el salitre no se encuentra en el fondo de las hoyadas, sino en sus bordes y aparece con frecuencia acompañando las faldas de los cerros y cadenas de lomas. A juzgar por los planos y fotografías de la Plancha XIII que acompaña Darapsky, parece que el salitre explotable prefiere los altos márgenes exteriores de las extensas pampas cercanos a los cordones de cerros, pero en la falda misma, donde aparece la roca firme, termina el caliche.

De especial importancia para todas las teorías que se relacionan con el origen de los nitratos es el cerro Peineta, situado al sur de la estación Refresco, el que tiene yacimientos de salitre en su cumbre, a 2,280 m. de altura. También más al sur, en Morros Blancos, se encuentran yacimientos con buenas leyes a 2,000 m. de altura.

Más al sur se conocen algunos yacimientos inexplotables en el pequeño fragmento del Valle Longitudinal de Pueblo Hundido. Para el problema de la génesis son importantes los yacimientos situados al pie de los volcanes apagados del Toro, Azufre y otros ubicados en la vecindad del Salar de Maricunga. Se trata de volcanes pertenecientes al Cuaternario y al Plioceno, lo que demuestra la edad bastante moderna del salitre que se encuentra en las grietas superficiales.

En los grandes campos salitrales de las zonas descritas brevemente más arriba, el caliche explotable, o sea la mezcla de sales que contiene el nitrato, no forma capas continuas, sino que aparece en manchas irregulares de mayor o menor extensión. Donde los cerros de la costa se levantan como en la fig. 3, en forma de un lomaje irregular sobre el piso de relleno moderno de la pampa, que en el plano está cubierto por el Salar de Pintados, se observa una concentración de las manchas de caliche al pie de las lomas; pero muchas se extienden también hasta las cumbres de los cerros. El mapa permite reconocer que el piso de las quebradas relativamente anchas está exento de caliche, lo mismo que la planicie antepuesta sedimentada por ellas. Allí el caliche ha sido lavado a mayor profundidad, y al mismo tiempo su potencia ha disminuído rápidamente, como lo indica el cuadro siguiente:

	POTENCIA		Contenido de nitrato
	Pendiente estéril	Caliche	
Pto. 35.....	3,20 m.	0,15 m.	40,2%
" 151.....	2,40	0,15	15,1
" 306.....	1,90	0,45	10,9

Además, el plano indica que las pequeñas lomas en forma de islas que se levantan sobre el piso de relleno, conservan su campo de nitrato.

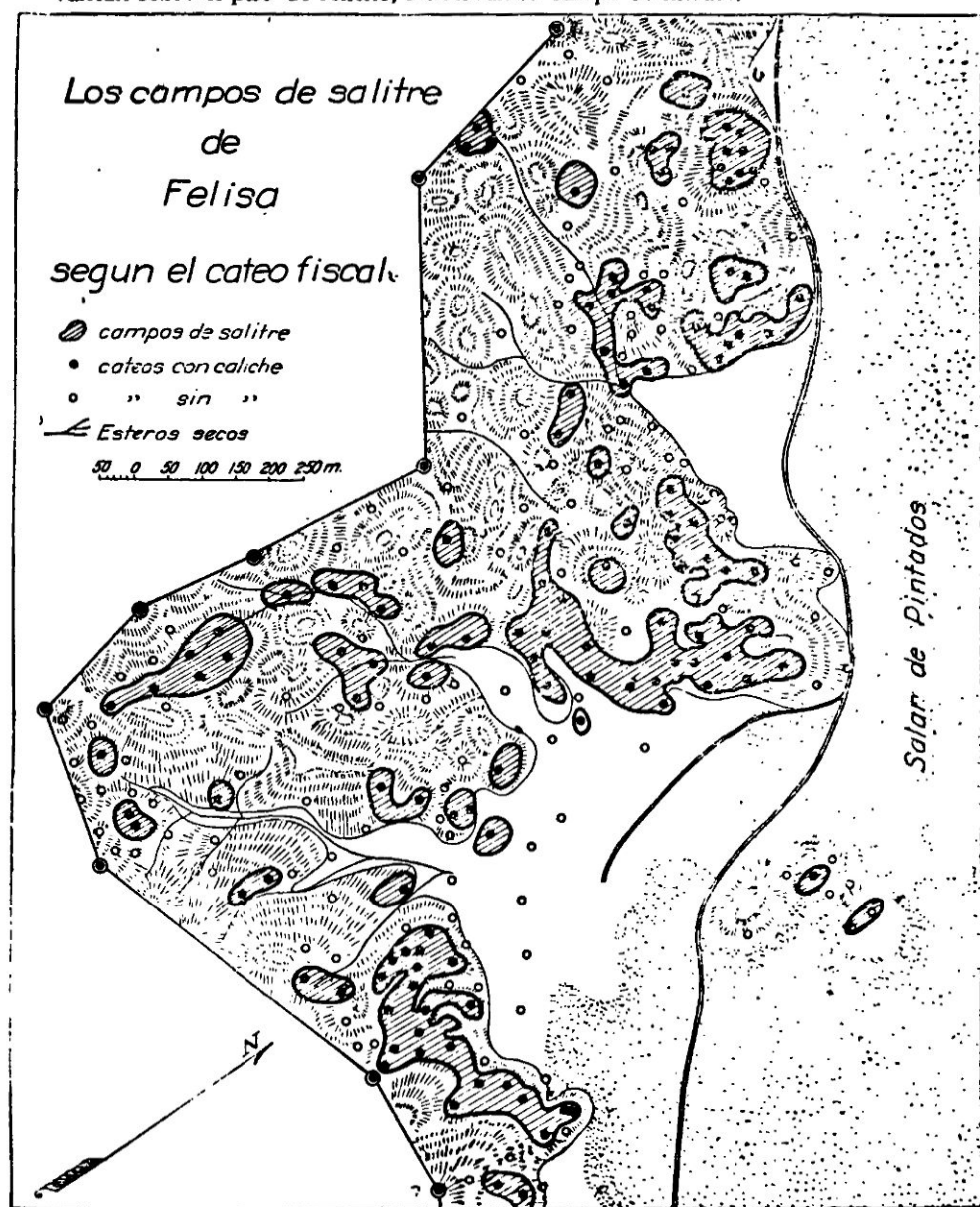


Fig. 3

También en las extensas planicies de muchos kms. cuadrados de superficie, intercaladas entre los cerros de la costa, como las pampas de Soronal, Pissis y Nebraska, la repartición de los yacimientos de salitre explotable es muy irregular, como

se deduce de la Fig. 4. En lugares no explotables el caliche tiene o muy baja ley o reducida potencia, o está a gran profundidad.



Fig. 4

Parte del mapa de cateo de las Pampas Pissis y Nebrasca, Iquique.

- a = cateos en campo explotable;
- b = cateos con caliche no explotable, pero de más de 10%;
- c = cateos con ley inferior a 10%;
- d = cateos sin caliche.

El plano muestra que lo normal es la irregularidad en la distribución del nitrato, aun donde toda la superficie dé la impresión de una gran uniformidad. La irregularidad en la distribución del nitrato y de las sales que lo acompañan se observa también en los componentes clásticos del subsuelo, como arenas, arcillas y rodados, los que están distribuidos sin ningún orden y mezclados entre ellos, lo que no puede sorprender en vista de su origen como sedimentos desérticos.

EL PERFIL DE LOS MANTOS SALITRALES

La composición petrográfica del subsuelo no tiene influencia en la distribución del salitre, encontrándose éste, lo mismo que las sales acompañantes, en las más diversas clases de rocas, sean porfiritas, granodioritas, cales, rodados, escombros de falda, arenas o arcillas.

En las rocas firmes, excepción hecha de las calizas el salitre puede existir sólo en las grietas producidas por la descomposición superficial. Estas grietas se ensanchan por la fuerza de cristalización del nitrato y de las sales acompañantes y se observa a menudo que trozos esquinados están sumergidos totalmente en la masa salina. En general, los yacimientos de esta clase son poco importantes, ya que las grietas terminan a pequeña profundidad.

En las explotaciones antiguas de Zapiga se observan capas aun con 30 cm. de espesor de salitre puro, que se extienden en la roca hasta unos 4 m. bajo la superficie. A veces corresponden a planos de estratificación; pero, en general, se trata de grietas más o menos inclinadas. También en ellas se observan trozos esquinados bien delimitados que corresponden a menudo a calizas sumergidas en el salitre. Es poco probable, que a mayor hondura se hayan abierto grietas de ese ancho por efecto sólo de la presión de cristalización. Los límites claros y planos de las guías, también en las calizas, están en contraposición con una substitución metasemática, a pesar de que podría ocurrir por la gran solubilidad del carbonato de calcio. La vecindad de las dislocaciones que acompañan el pie oriental de la Cordillera de la Costa hace más probable un destrozamiento tectónico de las calizas y porfiritas, especialmente en sus afloramientos, lo que ha dado lugar a una migración posterior del salitre a mayor profundidad. Debido a que en los comienzos de la industria salitrera se trabajaba sólo caliche con una alta ley de nitrato, se seguían de preferencia esas grietas que tenían nitrato casi puro.

En la vecindad de Zapiga el salitre se encuentra a menudo en unos bancos de pizarras arcillosas verdes intercaladas en todas las calizas; la pizarra aparece bien foliada y entre las hojas existen capitas delgadas de sales blancas. Los rajos de explotación, a veces bastante grandes, que siguen el afloramiento de la pizarra, lo mismo que la ausencia de desmontes, muestran un importante enriquecimiento superficial en las pizarras arcillosas.

Por excepción aparece el nitrato de sodio en los salares de las depresiones sin desagüe de la Cordillera de la Costa, como en el Salar del Carmen, en la cercanía de Antofagasta. Este salar forma el término del gran valle cubierto por campos salitreros, por el cual corre el ferrocarril de Antofagasta a Calama. Pero esto no es de extrañar que en este salar el salitre se renueve con el tiempo por lixiviación de los nitratos existentes más valle arriba, que son transportados al salar por la escasa corriente de agua subterránea.

Los yacimientos principales de salitre constituyen zonas irregulares cementadas por nitratos y otras sales, en los escombros de faldas o en rodados y arenas que rellenan las grandes depresiones de la Cordillera de la Costa.

Los obreros salitreros del norte distinguen varias capas en la explotación: superficialmente se encuentra la *chuca*, generalmente porosa; mas abajo sigue la *cos-*

tra, pobre en salitre; esta costra es dura y debe ser retirada para alcanzar la capa explotable, que es el *caliche*; bajo ésta sigue el *congelado* y por fin la *coba*, que es una tierra rojiza porosa, a menudo un poco húmeda, con pequeñas cantidades de sales.

La *Chuca* es la tierra arenosa, porosa, de la superficie del desierto mezclada con piedras; ésta es pobre en sales y tiene un espesor desde pocos cms. hasta 40 cm. En su parte inferior aparecen sulfatos como Thenardita, yeso y blodita.

Whitehead da los siguientes análisis de las sales de la chuca:

1. Soluble:

CaO y MgO	14,3	15,3
K ² O	6,2	7,5
Na ² O	24,9	20,9
SO ⁴	30,4	46,5
N ² O ³	5,9	—
P ² O ⁵	2,9	3,9
I ² O ⁵	0,3	—
HCl	10,6	4,2
Humedad	4,7	2,1
Total	100,2%	100,4%

2. Insoluble:

79,3% 89,3%.

Puede verse que predominan en ella los sulfatos, especialmente en comparación con los cloruros; el salitre aparece ya en cantidades pequeñas. También los análisis efectuados por Semper y Michels en el sur de Tarapacá dan las mismas características, es decir, 3-4 veces más ácido sulfúrico que clorhídrico. Notable es el alto contenido de ácido fosfórico.

La *costra*, que aparece debajo de la chuca, forma con el caliche un solo banco cementado por sales, en el cual el contenido en nitratos aumenta hacia abajo, de modo que no hay límite hacia el caliche. En realidad se explotan hoy muchos caliches que hace 20 años eran considerados como costra. Todo el banco cementado por sales alcanza espesores de 1-4 m., en el cual la capa explotable varía entre 0,5-2 m.

Análisis típicos de la costra son, según Semper y Michels, los siguientes:

	I	II	III	IV
NaNO ³	14,6	13,6	6,1	8,8
KNO ³	1,7	1,3	—	—
NaCl	27,2	19,3	18,0	29,2
Na ² SO ⁴	—	6,7	20,0	—
CaSO ⁴	3,8	2,7	6,8	—
MgSO ⁴	7,5	9,7	—	—
MgCl ²	0,4	—	—	—
Na ² I ² O ⁸	0,1	0,1	—	0,1
Humedad	2,6	2,4	—	—
Insoluble	42,2	44,0	52,0	no determ.
Total	100,1	99,8	102,9	

Las muestras I y II provienen de la Oficina Alianza, Tarapacá.

Al comparar los análisis anteriores con los del caliche, vemos que en la costra predominan los cloruros en comparación con los sulfatos; pero ya aparecen cantidades considerables de nitratos, aumentando éstos hacia el caliche. Según esto, tenemos una distribución general de las sales según su solubilidad entre 10-20°C, de los cuales los menos solubles están arriba y los más solubles abajo.

No podemos esperar una separación perfecta según la solubilidad, pues no se encontraba nunca al mismo tiempo en estado de solución toda la cantidad de las sales, sino que sólo pequeñísimas cantidades de ellas. Desde que las sales del caliche alcanzaron sus puntos actuales, han sido humedecidas innumerables veces por las lluvias, aunque escasas, y por las frecuentes neblinas.

Con esto las sales solubles, especialmente los nitratos, han emigrado hacia abajo, lo mismo que el cloruro de sodio, mientras que los sulfatos poco solubles se han mantenido en las zonas superiores, en las que el yeso forma una capa continua o se halla en innumerables concreciones superficiales de anhidrita que por su forma han recibido el nombre de «panqueque».

La mineralogía de los yacimientos de salitre ha sido conocida por las investigaciones de Wetzel. Se trata principalmente de yeso y anhidrita, cloruro de sodio, glauberita, blodita, chile-loeweyta, tenardita, ulexita, salitre sódico, darapskita. Sobre los minerales raros como yodatos, cromatos, etc., se encuentran informaciones en Semper y Michels, Ochsenius y otros autores. Especial importancia tienen los percloratos y yodatos, pues indican un medio fuertemente oxidante en la formación del salitre.

Una gran importancia práctica tiene el contenido de potasio del caliche; en los análisis se ha calculado corrientemente como nitrato o cloruro; sin embargo, según las investigaciones de von Arends, no aparece en esta última forma y en forma de nitrato sólo como mineral secundario. La forma principal es, según, el sulfato de potasio, además un sulfato doble de potasio y magnesio y probablemente también la glaserita; además habría polialita y un borato doble de potasio y magnesio totalmente insoluble.

La polialita estaría unida siempre con la bloedita y el salitre; forma nódulos blancos, duros, que alcanzan hasta 5 cm. de diámetro, envueltos por las otras dos sales. Por la humedad, la polialita estaría descompuesta en mayor o menor grado y el potasio se ha transformado al estado de sulfato o nitrato.

Los yacimientos de salitre de Tarapacá, hasta Lagunas, son los más ricos en potasio; hay pampas completas que tienen hasta 7% de potasio calculado como salitre y al lado de ellos otras con 2,3 y 4,5%. El extremo sur de la zona salitrera, en la cercanía de Taltal, es especialmente pobre en potasio, lo mismo que Antofagasta y el Toco. La repartición tiene cierto interés debido a que el contenido de potasio indica relaciones con las liparitas de la alta cordillera, tal como se observa en los salares. Como no es posible un transporte por agua subterránea hacia el caliche, se podría pensar en una influencia de la toba liparítica de la Cota, que forma el piso de muchos campos de salitre. Desgraciadamente faltan todavía investigaciones coordinadas de naturaleza geológica y química en los distritos salitreros.

ANÁLISIS DE CALICHE

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
NaNO ₃	28,54	51,50	22,73	27,08	34,20	34,40	43,30	39,44	34,80	52,20	41,12	61,97	24,90	27,08
KNO ₃	ind	17,25	1,65	1,34	1,60	No determi.					3,43	5,15	2,50	1,34
NaCl	17,20	21,28	41,9	8,95	32,0	4,0	ind	4,18	41,50	30,1	3,58	27,55	24,50	8,95
CaCl ₂	..	..	..	5,25	..	..	..	..	..	..	..	..	..	5,25
MgCl ₂	..	..	..	0,18	..	..	..	3,87	..	..	..	..	..	0,18
KClO ₄	ind	0,73	ind	ind	No determi.	..	..	..	..	..	0,75	0,21	ind	ind
Na ₂ SO ₄	5,40	1,93	0,94	..	8,4	1,6	25,3	..	10,8	16,9	ind	2,13	6,50	
MgSO ₄	3,43	1,35	3,13	..	2,0	5,4	..	3,97	ind	..	10,05	0,15	6,50	
CaSO ₄	2,67	0,48	4,8	2,89	6,3	1,6	30,9	3,25	2,9	..	3,86	0,41	4,50	2,89
Na ₂ B ₄ O ₇	0,49	0,56	0,53	0,52	..	..	..	..	..	..	0,20	0,43	0,15	0,52
NaJ	0,047	..	..	..	..	..	J	0,053	0,198					
Na ₂ JO ₃	0,033	0,01	0,07	0,08	0,2	..	..	..	..	..	0,05	0,94	0,054	0,08
NH ₄	ind	ind	ind	..	..	..	..	..	..	..	ind	ind	ind	ind
Insoluble	40,39	2,07	22,50	47,34	14,0	49,69	0,4	45,24	0,2	0,6	31,86	0,79	28,40	47,34
H ₂ O	1,88	0,70	1,75	6,37	1,1	..	..	..	1,5	..	5,00	0,67	2,00	6,37

Análisis 1-4 según Whitehead sin indicar procedencia

5-7 según Semper sin indicar procedencia

8 según Darapsky, explotado en Febrero de 1893
en la Oficina Lautaro, Taltal

9 según Darapsky, Oficina Esmeralda, Aguas Blancas

10 según Darapsky, Salitre fibroso

11-14 según Penrose, Oficina Alianza

La información citada por Semper y Michels respecto al descubrimiento de Uranio en el caliche, hecho por Ochsenius es un error. En el índice del libro de Ochsenius se encuentra equivocadamente la palabra *Uran* (uranio) en vez de *Urao*, un carbonato de sodio. La presencia de muchos elementos como Ti, Mn, Mo, etc., no puede sorprender, debido a que las sales del caliche en su paso subterráneo por los rodados y escombros de falda han atacado las rocas eruptivas y han entrado en solución pequeñas cantidades de esos elementos. Las frecuentes vetas e impregnaciones de cobre con ley de oro en las zonas del salitre explican la presencia de estos metales, como compuestos accidentales en el caliche.

Hacia abajo el caliche presenta una separación bastante brusca de los escombros o rodados del yacente; pero en ellos pueden aparecer otros bancos cementados por sales que reciben el nombre de *congelo*. Se trata de bancos irregulares; y a menudo solamente de masas de sal concrecionarias.

La composición es, según *Semper y Michels*, la siguiente:

CaSO ⁴	3,30
MgSO ⁴	10,60
Na ² SO ⁴	11,70
NaCl	50,40
Insoluble	23,14
Humedad.....	1,30

La coba ha sido descrita ya en el capítulo de la geología del norte de Chile, como capa areno-arcillosa de color rojizo, equivalente de la liparita. Muchos yacimientos de salitre, especialmente en el Toco, quedan sobre ella; pero en otros campos salitreros importantes no se conoce la coba.

INDICACIONES SUPERFICIALES DE SALITRE

Al entrar por primera vez a un terreno salitrero, llaman la atención los numerosos rodados de calcedonia y ágata, que se consideran como un indicio favorable de la presencia de salitre en el subsuelo. Se ha buscado el origen de las calcedonias en los poros de gas de las rocas porfíricas. Pero su forma exterior indica más bien un origen concrecionario. En realidad las «almendras» de las porfiritas, que observé en la región salitrera son mucho más pequeñas que los rodados de ágata. *Ochsenius* menciona que esta clase de ágatas se encuentra también lejos del distrito salitrero, en los salares de Ascotán y Polapi. Su origen lo busca él en la lixiviación de la sílice bajo la influencia de soluciones salinas. Según ésto el ágata no tendría relación directa con la formación del salitre, pero sería un indicador de concentraciones salinas en el subsuelo.

Otro indicio favorable para la existencia de salitre se me mostró en la Oficina Cecilia, en Antofagasta, Consiste en pequeñas filas de piedras que forman en la superficie una red poligonal irregular, entre las cuales la superficie es bastante escasa en piedras. A veces, se puede reconocer que las piedras están colocadas sobre delgadas grietas que atraviesan la costra y el caliche. El obrero salitrero llama «tabla» a la capa dura cementada por sal, y a la parte cercana a la grieta le da el nombre de «borde de tabla» en cuya cercanía se observa a veces un fuerte enriquecimiento en nitrato. El enriquecimiento se puede explicar por una migración secundaria del salitre por la neblina.

Las grietas mismas tienen sólo pocos milímetros de ancho, sin embargo, se puede reconocer arena introducida secundariamente, que se diferencia del caliche normal vecino por su grano pequeño. Al sacar este relleno secundario, pronto el ancho de las grietas subiría a 1-2 cm. A veces la grietas se ensanchan por disolución por las aguas de lluvias hasta 30 cm.

Se dan dos explicaciones de las grietas: se habrían formado por temblores o por contracción. Lo primero parece muy improbable, pues es difícil que temblores puedan producir grietas poligonales de algunos cms. de ancho. Para una contracción concuerda la forma poligonal irregular, que conocemos también en la costra de sal de los salares. Por la situación bastante profunda del caliche no se puede pensar en

un origen térmico, como en la costra de sal, sino en una contracción al perder los bancos cementados por sales el último resto de humedad.

B)—YACIMIENTOS DE SALITRE FUERA DE CHILE

Como continuación directa de los yacimientos chilenos de salitre debemos considerar los de la zona de la costa del Perú, que han sido descritos por el señor *J. M. Guzmán*. Están situados en el departamento de Arequipa, en un valle longitudinal semejante al de la Pampa de Tamarugal que tiene 300 km. de largo y 60 km. de ancho. Esta planicie está separada del mar por una cordillera de la Costa, que sube hasta 1,500 m., pero que tiene sólo 8-16 km. de ancho. La planicie sube de 1,000 m., en el S. O. hasta 2,000 m., en el N. E. y contiene en muchos lugares, sedimentaciones superficiales de yeso y otras sales. También existen en la superficie calizas cuaternarias fosilíferas, en las cuales aparece a veces el salitre. El nitrato se encuentra en algunos casos asociado a las sales como componentes sin importancia, en otros aparece en forma más pura pero con un espesor mínimo y a mayor profundidad. A pesar de que tanto el Gobierno como los particulares han explorado más de 1,500 km², no se han encontrado yacimientos explotables.

Semper y *Michels* mencionan yacimientos de salitre en varios puntos de la Puna de Atacama argentina; sin embargo, en los trabajos nuevos, como el de *Stappenbeck*, no se dan informaciones sobre estos yacimientos. En Ojo de Agua, en el Departamento Minas de la provincia de Córdoba, existe según *Beder* una tierra que contiene más o menos 4% de salitre. Se trata de eflorescencias en el Salar que se refinan en forma primitiva. El nitrato de potasio parece predominar en comparación con el nitrato de sodio. El origen debe buscarse en los excrementos de los numerosos animales que vienen desde lejos para beber agua.

Muy poco clara es la descripción que da *Sacc* de un yacimiento de nitrato en la vecindad de Cochabamba en Bolivia.

En Ecuador describe *Wolff* un pequeño yacimiento en la Salina de Latacunga, al sur de Quito, que consiste en eflorescencias salinas superficiales, que fueron beneficiadas primitivamente. Se trata de salitre potásico que impregna el piso formado por arenas de piedra pómez.

En Colombia hay, según *Zaracristi*, un yacimiento de salitre en el valle del río San Sebastián, a 100 km. de la ciudad San Juan que, entre 2,5-8 m. de profundidad, contiene 11,4% de nitrato de sodio, además lleva 20% de sulfato de calcio y 32% de carbonato de calcio.

Grandes expectativas se cifraron hace muchos años en los yacimientos de salitre descubiertos en el Oeste de Norteamérica; pero todos estos campos que en parte se conocían desde mucho tiempo, resultaron inexplotables. En California se conocen extensos yacimientos que en la capa superficial descompuesta tienen 1-2% de nitrato. También en Colorado aparece esta clase de yacimientos, cubriendo a menudo muchas hectáreas, en la superficie contienen hasta 6,5% de nitrato, pero ya a 5 pulgadas de profundidad esta ley baja a 2,6%.

También en Egipto hay yacimientos de salitre situados en el Nilo, a 760 km. al sur del Cairo. Las capas de escombros formadas por la destrucción de las pizarras de

Esneh, tienen en la superficie un contenido de nitrato de sodio de 13-18%; pero ya a 30 cm. de profundidad, donde la roca no está descompuesta, la ley baja a 3%. Lo mismo debe ocurrir también en los yacimientos descubiertos hace un par de años en la antigua Africa alemana sur occidental, al este del Mariental, que contienen 2-20% de nitrato en el yacimiento primario y hasta 86% en el secundario.

En Algeria, en la vecindad del oasis de Touat, aparece salitre en forma de eflorescencias sobre las costras arenosas de sal. Los nitratos se renuevan con especial intensidad después de lluvias fuertes caídas en los cerros vecinos. Estos yacimientos, que carecen de importancia práctica, tendrán su origen en la lixiaviación de los nitratos superficiales existentes en los cerros.

Los yacimientos de salitre potásico situados en el borde de los pantanos húngaros, lo mismo que los yacimientos de Bengala, deben tener su origen en la descomposición de restos orgánicos producida por bacterias. En Bengala, el suelo está cubierto en tal forma por materias orgánicas en descomposición, que hasta hoy se efectúa una explotación económica de ellos. A este grupo corresponden también los yacimientos de salitre potásico que se encuentran en cuevas o bajo paredes de rocas sobresalientes, y que se han formado por descomposición de excrementos de animales.

Esta corta relación de los numerosos yacimientos de salitre que existen fuera de Chile es suficiente para demostrar que la presencia de salitre no es un privilegio del desierto del norte de Chile, aunque los únicos yacimientos importantes son los de Chile.

C)—TEORIAS SOBRE LA FORMACION DEL SALITRE

En los párrafos sobre la Geología del Norte de Chile, hemos visto que esta región no ha estado cubierta por el mar desde el Cretáceo Inferior y que ha predominado desde el Terciario Medio un clima seco. Las repetidas informaciones sobre la presencia de caracoles marinos en el Salitre se refieren siempre a fósiles mesozoicos encontrados en los escombros de falda, que naturalmente no tienen importancia en lo que se refiere el origen del Salitre.

Por esta razón se pueden eliminar todas las teorías que suponen la presencia del mar para la formación del Salitre. En primer lugar, esto vale para la teoría de las algas de *Nöllner*. Según ella, el Valle Longitudinal debe haber estado cubierto por un brazo de mar y en las bahías que penetraban en los cerros de la costa se encontraban grandes cantidades de algas muertas que, por descomposición, se transformaron en amoníaco, el cual, en presencia del cloruro de sodio, proveniente del agua de mar que se secó en ese intervalo, se transformó en nitrato de sodio.

La teoría de *Nöllner* tiene la ventaja de explicar en forma sencilla el contenido de yodo en el caliche y por esto encontró numerosos partidarios. Pero, desgraciadamente no conocemos sedimentaciones del supuesto brazo de mar considerado; no se pueden tomar en cuenta los caracoles marinos cuaternarios del Sur del Perú, pues quedan muy lejos de los yacimientos principales. Además, la teoría de *Nöllner* que considera existente la superficie actual ya en la época de formación del nitrato, no puede explicar la presencia de yacimientos de salitre a 2,000 metros de altura en los cerros de la costa, ni tampoco los situados al pie de los volcanes al interior de Copiapó.

Las mismas observaciones se pueden hacer a las diversas teorías del guano, sea

que se trate según *Forbes* de yacimientos de guano situados al borde de lagos salados, o según *Penrose*, que las zonas salitreras fueron primitivamente fondo de mar. Estas teorías se pueden refutar especialmente citando el hecho que en las cercanías de los yacimientos de salitre no existen yacimientos de guano. Los lugares aislados en que aparece guano se reducen a nidos de aves marinas que aun hoy de día anidan en la zona salitrera, a veces en grandes multitudes. Pero el guano superficial es más nuevo que el salitre, que se encuentra a profundidad.

La mayor dificultad estriba en explicar dónde quedó la gran cantidad de fosfatos que deben haberse liberado después de la lixiviación y transformación en nitrato de las combinaciones amoniacales del guano. Fosfatos no se encuentran en las cercanías de los yacimientos de salitre; tampoco se puede tomar en cuenta el contenido relativamente alto en fósforo de las sales de la Chuca y de la Costra, pues son muy pequeñas en comparación con las cantidades de salitre.

Esta dificultad la trata de subsanar la teoría de *Ochsenius*, aunque sus ideas sobre el sollevamiento de la Cordillera y la formación de lagos con aguas madres en las cuencas sin desagüe no se pueden aceptar. El amoníaco que transformó las aguas madres lo hace provenir *Ochsenius* de los yacimientos de guano de la costa, cuyas partes más livianas, ricas en nitrógeno, habrían sido transportadas por el viento, mientras que las más pesadas, con mayor contenido en fósforo, habrían quedado atrás.

En realidad la existencia de ricos yacimientos de guano en la costa constituye una de las características esenciales de los desiertos salitreros y por ella se diferencian de todos los otros desiertos del mundo. Esto se podría considerar como un antecedente para explicar la procedencia de las grandes cantidades de nitrógeno. Los yacimientos de guano de Mejillones, según sus relaciones con las terrazas marinas, deben tener edad cuaternaria antigua o pliocénica, es decir, que ellos podrían relacionarse con el salitre que también es de edad relativamente moderna. Fuera de Mejillones, existen numerosos otros yacimientos de guano a lo largo de la costa, que han sido explotados en el siglo pasado.

El más importante de estos yacimientos, el de Mejillones, contiene un guano casi libre de nitrógeno; se encuentra en una península sobresaliente que no ha desaparecido bajo el mar cuando su continuación septentrional y austral se hundió. Se puede suponer que anteriormente existía un gran número de otros yacimientos de la misma clase en la continuación de la península de Mejillones, los que han desaparecido por el hundimiento de la costa terciaria.

Ochsenius supone que el nitrógeno fué llevado en forma de polvo de guano arrastrado por el viento, y que se produjo una separación gravitacional entre las partículas pesadas de fosfato y las partículas más livianas de guano amoniacal. Tal separación es muy poco probable, lo mismo que el transporte en forma de polvo.

Pero durante los muchos miles de años que ha durado la acumulación del guano deben haberse escapado a la atmósfera grandes cantidades de amoníaco que fueron transportadas al interior por el viento. Un ejemplo de las cantidades de gas liberadas se obtiene en Arica, donde en una isleta antepuesta a la bahía se acumulan pequeñas cantidades de guano cuyo olor fuerte molesta mucho a la ciudad, a pesar de estar a $1\frac{1}{2}$ km. de distancia.

El amoníaco arrastrado por el viento a la Cordillera de la Costa, desde los an-

tiguos yacimientos de guano, fué disuelto por las continuas nieblas y llevado al suelo, donde inorgánicamente o probablemente por influencia de bacterios, fué transformado en nitrato.

Según este origen, deberíamos esperar las mayores cantidades de nitrato en la costa, lo que en el hecho parece ser efectivo. Esto no tiene relación directa con la repartición de los yacimientos ricos, pues los yacimientos explotables se han formado por enriquecimiento secundario, mientras la formación del nitrato ha tenido lugar en toda la extensión del continente vecino a los yacimientos de guano. Un enriquecimiento secundario debe suponerse también en todas las demás teorías.

Muchos investigadores buscan el origen del salitre en el *volcanismo*, que es también una característica especial del desierto chileno y que sólo tiene semejanza con la zona seca del norte de los Estados Unidos, donde igualmente los nitratos adquieren gran extensión. *Courtenay de Kalb* trató de derivar los nitratos de los gases de los volcanes actuales de la alta Cordillera. Sin embargo, la morfología del Norte de Chile no permite que grandes cantidades de combinaciones nitrogenadas provenientes de la alta Cordillera alcancen a la zona salitrera, ya sea transportadas por el agua superficial o subterránea, o directamente por el aire. Especialmente los campos salitreros de Antofagasta están separados por altas cadenas de cerros de los volcanes situados a 150 km., al interior.

Aquí podemos citar la idea de *Stocklasa*, quien estima que la radio-actividad de las cenizas volcánicas ha impulsado fuertemente la actividad de los bacterios nitrificantes en el distrito salitrero. Pero esta clase de cenizas recientes son ajenas al salitre, pues la *coba roja* falta en la mayoría de los yacimientos salitreros. Según otros autores, la radioactividad del caliche es muy escasa y corresponde solamente a la radioactividad baja de un suelo ordinario de agricultura. Se ha hablado mucho del contenido de radio del caliche, en parte debido al error mencionado más arriba en el índice de la obra de *Ochsenius* y en parte porque el vidrio blanco de las botellas se colora de violeta en la pampa salitrera. Este fenómeno se debe a la fuerte radiación solar y se puede observar en todo el Norte lo mismo que en la alta Cordillera de Santiago.

Whitehead, a quien debemos la mejor descripción geológica de los yacimientos de salitre, busca el origen del nitrato en combinaciones nitrogenadas que habrían estado encerradas en las porfiritas mesozoicas. Se trata principalmente de cloruro de amonio y materias semejantes, las que habrían sido descompuestas y puestas en libertad por acciones químicas.

Calcula que una faja de rocas de 100 km. de largo por 18 km. de ancho y 50 metros de potencia, con una ley media de 0,02% de cloruro de amonio, contiene la misma cantidad de nitrógeno que toda la producción de salitre desde 1825. Esta clase de cálculos deja mucho que desear, aún tomando en cuenta que *Whitehead* solamente quiere dar una idea de las enormes cantidades de nitrógeno encerradas en las rocas volcánicas. Debemos tomar en consideración que el salitre explotado hasta este momento representa apenas la centésima parte del salitre existente en todo el Norte, de modo que debemos extender esa profundidad de 50 metros a la totalidad de la superficie del distrito salitrero.

Pero, fuera de ésto, en las faldas una gran parte de la roca descompuesta ha sido acarreada, en forma de rodados, que llevan encerradas las combinaciones de

amonio, de modo que sólo una pequeña parte habría quedado para la formación del salitre superficial, es decir, se necesitaría muchas veces la potencia de 50 metros considerada. Una denudación tan fuerte no ha tenido lugar en el distrito salitrero desde el Terciario Medio, como lo hemos visto anteriormente.

Nitrógeno proveniente de la atmósfera: En el año 1877, *Pissis* sentó su teoría de que el salitre proviene de pequeñas cantidades de anhídrido nitroso, anhídrido nítrico y amoníaco que se encuentran en la atmósfera. Estas se unirían con las combinaciones de sodio, originadas con la descomposición de las plagioclasas, para formar salitre sódico. Este proceso debería acelerarse especialmente por las tensiones eléctricas que acompañan a las frecuentes neblinas. *Sundt* ha desarrollado más esta teoría, atribuyéndole al suelo poroso las propiedades de un catalizador para la fijación del nitrógeno respectivamente, o para la oxidación del amoníaco. Investigaciones posteriores han demostrado que esta propiedad del suelo reside en la acción de bacterios.

Las explicaciones de *Sundt* tienen especial mérito en lo que se refiere al origen de las sales que acompañan al salitre, las que habrían alcanzado la costa en forma de espuma de mar y en seguida habrían sido transportadas al interior en forma de polvo finísimo, hasta que una de las frecuentes nieblas las haya hecho descender y pegarse en el suelo. Así se explica no sólo la presencia de una gran parte de los cloruros y sulfatos, sino que también el pequeño contenido de yodo, que nunca falta. Sobre las cantidades de sales originadas por este proceso, podemos citar las investigaciones de *M. I. Pierre*, según las cuales, en las cercanías de Caen, cada hectárea de terreno recibe anualmente 50 kgs. de cloruros y 20 kgs. de sulfato. De estas cifras se deduce un importante aumento de los sulfatos en comparación con su proporción en el agua del mar, que contiene 8 veces más cloruros que sulfatos. En el distrito salitrero podría provenir una parte no despreciable de los sulfatos de la destrucción de piritas encerradas en las rocas. La circunstancia de que en el caliche se encuentre más yodo que bromo, mientras el agua de mar contiene diez veces más bromo que yodo, no habla en contra de un origen marino de las sales, debido a que los procesos de migración de las sales nos son totalmente desconocidos. Así, por ejemplo, se puede evaporar la mayor parte del bromo, mientras el yodo puede haber entrado en combinaciones estables como en la lautarita, que es un yodato de calcio difícilmente soluble, o como en la dietzita, sal doble de cromato y yodato de cal.

Una parte de las sales puede provenir también de los yacimientos de sal de la alta Cordillera, que se encuentran en las areniscas rojas de San Pedro, como también de la desalificación de sedimentos marinos. Una procedencia del yodo de aguas termales, como lo creen algunos autores, no es posible, pues ellas no existen en los yacimientos salitreros.

Formación por electricidad atmosférica: *Pissis* y *Sundt* aceptan las combinaciones nitrogenadas como ya existentes en la atmósfera; pero mencionan también la tensión eléctrica que acompaña a las frecuentes neblinas o camanchacas como causa de la fijación del nitrógeno. En realidad los yacimientos principales de salitre están al alcance de estas nieblas costaneras. Sin embargo, esta coincidencia podría servir también para establecer un origen diverso.

Entre los empleados de la industria salitrera se encuentra muy difundida la idea de que la niebla es la causa principal de una fijación extraordinaria del nitrógeno. Las

dos observaciones hechas hasta ahora en la zona salitrera sobre esta clase de tensiones anormales, son las siguientes:

En ausencia de la neblina se observa una fácil inducción eléctrica de todos los medios, como por ejemplo, del pelo al peinarse, lo que se debe al aire extremadamente seco que transforma la superficie del cutis en un mal conductor del aire. Este fenómeno no se presenta solamente en el desierto salitrero, sino que se puede observar en todos los desiertos.

Las señales más características de una tensión anormal durante las nieblas son, según *Singewald y Miller*, las interrupciones del servicio telefónico entre las oficinas salitreras y la costa, que se producen cuando hay fuertes neblinas. Con razón ellos relacionan estos fenómenos con la capa polvorienta de sal que cubre todos los postes telefónicos, lo mismo que los aisladores, pues con la niebla esta capa se humedece y la aislación desaparece. En el hecho la aislación de las líneas es generalmente deficiente, pues con el tiempo seco normal la gran sequedad del aire constituye un aislador bastante bueno.

Knoche se refiere también a descargas silenciosas que ha observado en Bolivia, en la superficie de los bancos de nubes, donde existe una superficie de separación bien neta entre el banco de niebla muy húmedo y el aire muy seco que se encuentra encima.

Sería de desear que químicos y geofísicos investigaran la camanchaca y los fenómenos de electricidad atmosférica de la zona salitrera. Convendría establecer especialmente si la neblina contiene en verdad una proporción anormal de anhídrido nítrico o amoníaco. Se menciona frecuentemente el contenido de amoníaco de la neblina en los alrededores de París, pero éste puede explicarse más fácilmente por el humo de las chimeneas y la descomposición de sustancias orgánicas. En el desierto poco poblado del Norte la neblina podría ser hoy día pobre en nitrógeno, pues la actual formación de guano es muy pequeña.

Es poco probable la hipótesis de *Singewald y Miller* que atribuye el origen del salitre a las descargas eléctricas que se producen todas las tardes en los meses de verano en la alta cordillera, pues el agua superficial o subterránea no podría transportar las combinaciones de nitrógeno a la región de los yacimientos actuales, ni en la época cuando se formó el salitre.

Se ha supuesto también que tales tormentas eléctricas se hayan producido en la zona salitrera moderna, llamando la atención a la gran riqueza de nitrógeno de las lluvias tropicales. Sólo por las lluvias, en la isla Reunión, cada hectárea de terreno recibe anualmente, seis Kgs. de nitrógeno en forma combinada, lo que corresponde a un abono con 50 kgs. de salitre chileno. Pero según hemos visto más arriba, el Norte de Chile ha tenido desde el Terciario Inferior un clima seco.

Ultimamente *Wetzel* se ha adherido a la teoría eléctrica y dice que aun hoy día se incorpora al suelo del desierto, junto con las gotas de neblina, ácido nítrico atmosférico que descompone los silicatos sódicos que abundan en el polvo, transformándose en nitrato de sodio. En la página 409 describe las cristalizaciones muy finas en forma de gotitas entre los productos clásticos finísimos. En todas las cumbres de los cerros se encontrarían nitratos en una situación tal que deberían ser lavados y arrastrados hacia abajo con la más pequeña lluvia. Pero, en realidad, estas lluvias faltan totalmente hoy en día. Por el contrario, en la página 419 dice *Wetzel* que las migraciones se-

cundarias del nitrato duran hoy día a consecuencia del agua de las neblinas; esta agua penetra al suelo disolviendo algo de los nitratos que en seguida dan lugar a nuevas segregaciones cercanas a la superficie, cuando el sol hace salir de nuevo la humedad del suelo. Pero ya la frase siguiente de *Wetzel* considera una parte del salitre superficial como formación nueva proveniente de la neblina. Como *Wetzel* no puede distinguir ambas clases de nitratos, no le es posible la demostración de la supuesta formación nueva de salitre.

En contra de tal origen está también la circunstancia de que estas nuevas formaciones se pueden observar solamente en los cerros o directamente encima de yacimientos salitreros, pero nunca en el terreno de acarreo moderno de la pampa del Tamarugal. Entre las inundaciones provenientes de la alta cordillera, las que ocurren durante intervalos de 30, 40 y aun 100 años, habría tiempo suficiente para formar pequeñas cantidades de salitre superficial, pues la neblina no se reduce únicamente a los campos de salitre, sino que se extiende a menudo bastante en las planicies de sedimentos cuaternarios y recientes.

La fijación del nitrógeno por actividad de los bacterios ha sido observada ya en los años de 1877 y 79 por *Müntz* y *Schlossing* en los suelos europeos y fué extendida pronto a los yacimientos de salitre chileno. *Newton*, *Plagemann* y otros han sido partidarios de esta teoría. En vista de la sequedad del distrito salitrero, estos investigadores suponen que en la época de la formación del nitrato había un clima tropical-húmedo en el interior, especialmente en la alta cordillera y en la altiplanicie de Bolivia. Por la descomposición de las materias vegetales que cubrían el suelo, se formó gran cantidad de salitre debido a la acción de los bacterios. Los nitratos fueron lixiviados por la acción de las aguas-lluvias y transportados a la región de la cordillera de la costa, que ya entonces era bastante seca.

En contra de esta suposición hay varios hechos. Hemos visto más arriba que en el Norte de Chile y en Bolivia ha predominado desde el Terciario Medio, un clima seco y que los restos de mamíferos y plantas mencionados por *Plagemann*, no revelan un clima más húmedo que el actual. Si la suposición de *Plagemann* fuera exacta, deberían generarse grandes yacimientos de salitre en aquellos lugares donde existen condiciones climáticas semejantes, como por ejemplo en la cuenca del lago Tschad, que recibe las aguas de los bosques tropicales africanos. Parece que la abundante vegetación no solamente absorbe totalmente la gran riqueza en nitrógeno de las lluvias tropicales, sino que también la del suelo, originada por la acción de los bacterios.

Las observaciones de los geólogos norteamericanos en el distrito desértico de Colorado tienen gran importancia porque los nitratos de esa región se han formado por la acción de los bacterios. Los suelos contienen allí, en la capa superficial, hasta 6,5% de nitrato; a 5 pulgadas de profundidad el contenido es 2,6%.

Headden llegó a los siguientes resultados: El nitrato de esta región no ha sido lixiviado de puntos cercanos ni tampoco traído de otra parte por el agua subterránea. No depende de ninguna manera de la composición geológica del subsuelo. El agua de riego, sea que provenga de ríos o de embalses, no contiene cantidades anormales de nitratos, sólo hasta 0,5 millonésimas partes. La fijación tiene lugar muy rápidamente. El resultado mayor, alcanzado en 27 días de observación, corresponde a 5,616 libras de nitrógeno por acre-foot en el año, o sea 2 toneladas en 1,200 metros cúbicos, en número redondos, lo que corresponde a 17,5 toneladas de materias proteicas. Tam-

bién la nitrificación es muy fuerte. En los 48 días se observó un aumento máximo de 138% con relación al nitrógeno que existía al comienzo del experimento, lo que corresponde a una formación anual de 5 toneladas de nitrato de sodio por acrefoot.

Es también de especial importancia que los bacterios nitrificantes, extienden su poder oxidante no solamente a la materia orgánica, sino que también a yoduros que se transforman, por ejemplo, en yodatos, los que existen en el caliche chileno y que, lo mismo que los percloratos, demuestran fuertes acciones oxidantes durante la formación del caliche.

El clima de los yacimientos de nitrato del Colorado es muy seco, pero no tanto como el del desierto del salitre chileno. En los meses de invierno caen en Colorado precipitaciones regulares que permiten la existencia de una pobre vegetación de arbustos.

Según esto, debemos suponer que durante la época de la formación del salitre chileno, reinaba un clima algo más húmedo que el actual y talvez se podría pensar en las épocas glaciales, pues el salitre es sin duda una formación muy nueva. En todo caso, es más moderno que la *coba* sobre la cual descansa y, que es contemporánea con las liparitas del Terciario Medio. Pero existe un hecho que habla en favor de una edad pre-glacial del salitre, y es su presencia en un antiguo cono de rodados que viene de la Cordillera Central frente al Cerro Joya (Toco). Este cono de rodados está fuertemente dividido por una serie de quebradas que provienen de la alta Cordillera Media y que deben haberse formado por las abundantes precipitaciones de las épocas glaciales. Pero también en el pie de la cordillera debe haber caído mayor cantidad de lluvias, porque existe un gran número de pequeñas quebradas que nacen en el mismo cono de rodados. En cierta zona la superficie del cono de rodados se ha reducido a delgados filos que separan las quebradas y que en parte se han transformado en pirámides de tierra. Tanto en estos filos, como en la parte superior de las pirámides se encuentran restos de caliche.

Debido a que hoy día no caen lluvias en la falda de la Cordillera Media, debemos considerar las quebradas nuevas como cuaternarias y el salitre sería entonces preglacial y coincidiría, por lo tanto, con la edad pliocénica de los principales yacimientos de guano de la costa.

Por otra parte, no se encuentra en el distrito salitrero propiamente tal ningún indicio de una época diluvial rica en lluvias, aun en las escarpadas pendientes de falla de la Cordillera de la Costa faltan absolutamente los surcos y quebradas excavadas por las lluvias. Debemos suponer, pues, que el clima más húmedo del Plioceno se debió a un aumento muy fuerte de las neblinas. En realidad, la neblina permite hoy día el desarrollo de una vegetación pobre en los cerros vecinos de la Costa. Durante el Plioceno, cuando el terreno se encontraba 500 m. más abajo, esta vegetación, favorecida por la neblina, debió extenderse más al interior, sobre todo en los cerros de la costa. En el suelo prosperó una rica flora de bacterios que no solamente transformó en nitrato a los escasos restos vegetales, sino que tomó también directamente el nitrógeno del aire, pero especialmente oxidó las grandes cantidades de gases amoniacales provenientes de los yacimientos de guano de la costa. En la época pliocénica existía probablemente una cadena casi continua de estos yacimientos a lo largo de la costa.

El clima húmedo de aquel tiempo, en la vecindad de los campos salitrales, se

asemejaba más al de la región costanera situada más al sur, en la cual se pueden esperar hoy condiciones favorables para el trabajo de los bacterios. Desgraciadamente me faltan observaciones en las vecindades de Chañaral, pero en Vallenar, donde la precipitación anual es de 10 cm., las vertientes se caracterizan por una gran riqueza en ácido nítrico, lo que me hizo notar mi colega Dr. P. Krassa: Los análisis de aguas efectuados por él dieron los siguientes resultados en mgr. por litro.

Substancia seca	I 766	II 933
CaO	147	174
MgO	48	62
SiO ₂	30	30
SO ₄	74	98
Cl ⁻	184	234
N ^o	31	23
N ^o	0,3	—

Estas determinaciones se refieren a las vertientes de Maitencillo, cuyas aguas no están contaminadas con las aguas de riego, provienen de una corriente de agua subterránea que se ha formado en los cerros de la costa, en una hoya hidrográfica extensamente ramificada.

Ni aquí, ni en las zonas de transición los desiertos del Norte se forman mayores cantidades de salitre; se debe ésto posiblemente a que el guano se acumula hoy en la costa sólo en muy pequeña cantidad, pues desde el cuaternario el hombre no ha dado el reposo necesario a las aves para su incubación.

El salitre originado por la acción de los bacterios formó una capa que cubrió cerros y valles, especialmente en los cerros cercanos a la costa, pero que alcanzó, con pequeñas leyes, bastante hacia el oriente, hasta la alta Cordillera. La neblina favoreció la nitrificación, no sólo manteniendo húmedo el suelo, lo que para los bacterios es de importancia, sino también disolviendo los gases amoniacales que existían en el aire, conduciéndolos al suelo.

Además, las pequeñas gotitas caídas de la neblina lixiviaban el salitre formado en la superficie y los concentraban al pie de los cerros. Los procesos de concentración descritos por *Whitehead* deben haber comenzado al mismo tiempo que la formación del salitre y terminaron casi totalmente con la época más húmeda; hoy día se realizan sólo en muy pequeño grado.

La mayor parte de las lloviznas penetraron en el suelo seco y poroso, disolvieron los nitratos superficiales y seguían falda abajo a pequeña profundidad.

Después que terminó la llovizna que generalmente era de poca duración, comenzó de nuevo una fuerte evaporación y el agua que recién entraba al suelo, se evaporaba en seguida. Los nitratos disueltos se precipitaron a pequeña profundidad al desaparecer el resto del agua; pero con este proceso habían migrado un poco falda abajo. Por numerosas repeticiones de este fenómeno la totalidad del nitrato formado en la falda pasó al pie de los cerros, donde cambió la dirección del transporte. Pues debido al gran espesor que tiene la capa muy permeable de escombros en el pie de los cerros, el agua ya no corría lateralmente sino que tomaba una dirección más vertical dentro de la capa porosa.

Durante las lluvias, el agua con los nitratos bajaba, pero al cesar éstas, el agua subía por la fuerte evaporación. La transición se produce paulatinamente con la disminución en la inclinación de la falda. La consecuencia de este proceso fué un enriquecimiento del nitrato fácilmente soluble en la parte inferior, mientras los sulfatos poco solubles quedaron en las regiones superiores. Donde había un desagüe aunque sólo sea subterráneo, se perdieron naturalmente cantidades enormes de salitre.

Según comunicación verbal del señor F. Low, él pudo observar en los cateos fiscales efectuados en las extensas depresiones de la Cordillera de la Costa en Iquique, que se encuentran mayores concentraciones de nitrato al término de pequeños lechos secos de la pampa. También debajo de los lechos secos se encontró salitre; mientras normalmente en terrenos quebrados el nitrato ha sido lixiviado debajo de barrancos secos.

Por lo general falta en las anchas pampas un enriquecimiento secundario, de manera que la ley media es comúnmente baja. Por tal motivo, estos campos no han sido desarrollados hasta ahora y la explotación se limitó en los primeros años a las concentraciones secundarias, especialmente ricas, situadas al pie de las faldas de los cerros y se extendió en seguida a los yacimientos situados en las planicies de pequeña inclinación.

Los procesos descritos más arriba sobre las concentraciones secundarias del salitre en los yacimientos explotables son esencialmente diferentes a los supuestos por *Wetzel*.

A base de sus observaciones microscópicas, que son de gran mérito, trata de diferenciar las sales más nuevas y más antiguas. Se apoya para ésto en parte en el desarrollo más o menos idiomorfo de los cristales, en parte en su posición estratigráfica en el perfil. Así habla de una época de glauberita, considera el yeso como el compuesto más antiguo, etc. En la mezcla de sales de los yacimientos de salitre, no debemos considerar la idiomorfía de ciertas sales en el mismo sentido que cuando se trata de rocas eruptivas, sino más bien como si se tratara de pizarras cristalinas. En los procesos de migración secundaria, pequeñísimas cantidades de las diferentes sales estaban al mismo tiempo en solución y se precipitaron más o menos simultáneamente; y este proceso se ha repetido mil veces durante la migración. Por ésto, las sales de mayor fuerza de cristalización se presentan como idióblastos, y encierran también a otras sales, como la sal gema al salitre.

El error principal de *Wetzel* está en su idea de que los escombros de falda y también las masas de los extensos abanicos de rodados se hayan formado junto con las sales que ellos contienen. Escribe en la página 428 que la zona de concentración de los yacimientos de salitre se compone de una complicada estructura de capas lenticulares, y que cada una de estas capas corresponde a un proceso especial de sedimentación desértica y su cementación siguiente.

Así dice en la pág. 420 que cada una de estas capas se haya movido como corriente de barro por algunos cientos de metros, hasta que llegó al reposo, porque enriqueciéndose de material clástico fino se puso más y más viscoso. Inmediatamente después habría principiado la cementación de la corriente de escombros por medio de las sales en solución que se precipitaron.

En realidad los grandes abanicos y conos de rodados existían ya mucho antes que se formaran el salitre y las sales que han inmigrado en ellos posteriormente.

Si el salitre hubiera estado relacionado con las corrientes de barro, sería incomprensible que existieran nitratos ricos en las faldas por donde nunca ha pasado una corriente de barro ni se ha depositado.

D) LA EXPLOTACION Y LAS RESERVAS DE SALITRE

Se dice que ya en los antiguos documentos peruanos del año 1528, se habla de salitre. Su explotación estaba estrictamente controlada y prohibida a las personas no autorizadas. A mediados del siglo XVIII, los enviados españoles *Jorge y Juan Ulloa* mencionaron en sus «Informes Secretos» un fuerte contrabando de pólvora en el distrito salitrero principal. Sobre el primer descubrimiento del salitre circular muchas versiones que en su mayor parte parecen muy improbables. Según una, un tal Negreiros, portugués, habría descubierto el salitre, por la explosión repentina de su fogata, encendida sobre un suelo salitroso.

Debido a que el salitre sódico no proporcionaba una pólvora buena para las armas, se dirigieron al naturalista alemán *Thadeus Haencke*, establecido en Bolivia, y quien en 1809 descubrió un procedimiento para transformar el salitre natural en salitre potásico por la acción de cenizas de madera. Como en el norte no había vegetación, se enviaba el salitre a Talcahuano, donde tenía lugar la elaboración.

Las primeras oficinas fueron construídas en Tarapacá en los años 1810-12; se trataba sin embargo, de industrias muy sencillas. En capachos de cuero, el caliche era transportado por los trabajadores a las llamadas «paradas» como se llamaban los sitios de detención, donde se cocía en vasijas de cobre de 250 litros de capacidad. Después del asentamiento del residuo insoluble se hacía cristalizar el salitre en las «bateas». Como combustible se empleaba la madera subfósil, frecuente en el suelo arenoso de la Pampa del Tamarugal.

El gran adelanto en el proceso de la industria salitrera tuvo lugar cuando *Liebig* demostró el valor del nitrato para la agricultura y después con la introducción del sistema *Shank* para su elaboración.

El rápido aumento de la explotación del salitre lo muestran las siguientes cifras, que dan la producción por decenios y en millones de toneladas:

1830-1839	0,05	1880-1889	5,54
1840-1849	0,18	1890-1899	11,01
1850-1859	0,41	1900-1909	16,69
1860-1869	0,81	1910-1919	25,04
1870-1879	2,46	1920-1929	21,77

Hasta el año 1858 se conocían sólo los yacimientos de salitre de la antigua provincia peruana de Tarapacá; en ese año se descubrieron los depósitos situados en el interior de la provincia de Antofagasta, que pertenecía a Bolivia; siguió después el descubrimiento del yacimiento de Taltal en el año 1876 y en 1879, el del Toco. Con la guerra de 1879-81 quedó todo el distrito salitrero en territorio chileno.

Durante muchos decenios el salitre fué lixiviado por el procedimiento *Shank*, en el cual el caliche se cocía en grandes estanques, llamados «cachuchos», calentados por vapor. La solución de nitrato se separaba por decantación y se hacía cristalizar al aire libre en los estanques de cristalización llamados «bateas».

La explotación en el campo se hacía arrancando la capa dura de caliche por medio de pequeñas perforaciones que se tronaban con pólvora negra, preparada en la misma Oficina. Por escogido a mano se obtenía un material con una ley media de 14%, que era transportado a la Oficina por medio de pequeñas líneas Decauville. La pérdida en la explotación alcanzaba a 15%; y la elaboración siguiente tenía una recuperación de 65-80%. El residuo lixiviado llamado «ripio» iba al desmonte con una ley de 3 a 5%.

Las grandes variaciones en la recuperación dependen en primer lugar de la mayor o menor cantidad de «borra», que es la arcilla coloidal contenida en el caliche, y que impide una lixiviación perfecta del nitrato.

El Procedimiento Guggenheim, introducido en los últimos años, no es diferente en su fundamento al antiguo sistema. También se trata de una lixiviación y una cristalización subsiguiente por enfriamiento, aunque a temperatura más baja. La lixiviación se hace a 40°-50° y la cristalización a 9°C., pues las temperaturas más bajas que se emplearon en un comienzo, produjeron dificultades por la precipitación de otras sales.

Este sistema permite, junto con otras reformas, una explotación del caliche en gran escala, por medio de palas a vapor. La única selección tiene lugar en el tamizado, que en la misma oficina separa el polvo fino, proveniente en parte de la destrucción de grandes bloques durante el transporte. Este polvo fino, que es arrojado al desmonte, consiste en gran parte de borra, contiene un promedio de 3% de nitrato y corresponde más o menos al 20% del material explotado. El caliche restante es chancado a un tamaño de $\frac{1}{2}$ pulgada y llevado a los grandes estanques de lixiviación; éstos son de concreto y tienen en la Oficina Pedro de Valdivia una profundidad de 5,95, un ancho de 33,5 y un largo de 48,8 metros; su capacidad es de 11,500 toneladas. En ellos se lixivia el caliche a la temperatura mencionada de 44-50°C.

El calor necesario para la operación proviene de tres fuentes: Del agua de enfriamiento de los motores Diesel, del agua de enfriamiento de los gases de escape de los motores y del agua de enfriamiento de los aceites lubricantes. La instalación Diesel de Pedro de Valdivia, tiene cinco unidades de 5,600 HP. cada una.

El salitre cristalizado a 9° en instalaciones especiales, se seca en centrífugas y va en estado aún húmedo a las instalaciones de granulación. Aquí se funde a 550° y se inyecta en forma de gotas finísimas a una cámara de fierro por la cual circula una corriente de aire ascendente. El salitre se solidifica en forma de pequeños granitos débilmente lenticulares. La granulación, es favorable porque evita cementaciones posteriores.

La ventaja del sistema Guggenheim está en que se pueden beneficiar caliches con un promedio de 8%, contra 14% que necesita al sistema Shank.

El costo de instalación de la Oficina Pedro de Valdivia que trabaja según el procedimiento Guggenheim, fué de 32 millones de dólares, para una producción mensual de 60,000 toneladas. El costo de la Oficina Chacabuco, que es una de las más modernas que trabaja según el sistema Shank, fué de 5 millones de dólares con una producción mensual de 10,000 toneladas.

A principios del presente siglo se discutió mucho el problema de las *existencias de salitre de Chile*, ya que la agricultura de todo el mundo dependía en alto grado de

este importante abono. Con la instalación de diversas fábricas de abonos nitrogenados sintéticos, esta cuestión ha perdido mucho su valor, aunque siempre es para Chile de gran importancia.

Con la consolidación de casi toda la industria salitrera en la Compañía de Salitre de Chile, llamada según su dirección cablegráfica COSACH se han hecho cálculos muy exactos de las existencias, las que en todo caso han sobrepasado por mucho en exactitud las estimaciones anteriores, debido a que la mayor parte de los cálculos se basan en extensos cateos.

Para este cálculo los campos salitreros se han dividido en varios distritos, en que se proyectaban instalaciones de grandes oficinas. Las cifras siguientes se refieren al salitre recuperable, distinguiendo entre el salitre explotable por las Oficinas actuales, según el antiguo procedimiento y el salitre que se puede obtener según el sistema Guggenheim por una explotación con palas a vapor.

DISTRITO	EN MILES DE TONELADAS			
	Explotable con Oficinas existentes	Explotable con Oficinas proyectadas según el sistema Guggenheim		
		Con pala a vapor	A mano	Total
Norte de Tarapacá	6,828	16,029	2,226	18,255
Pampas de Pissis-Nebrasca	15,892	30,842	1,062	31,904
Soronal	12,229	28,147	1,620	29,767
Iquique, Total	34,949	75,018	4,906	79,926
Antofagasta	13,125	16,339	3,013	19,359
Taltal	5,886	8,729	1,349	10,078
Aguas Blancas	1,011		1,298	1,298
Boquete	1,898		2,439	2,439

TOCOPILLA

	Explotable con Oficinas existentes			Explotable con Oficinas por proyectar según sistema de Guggenheim		
	Con pala	Mano	Total	Con pala mecánica	Mano	Total
N. Tocopilla	2,480	7,822	10,302	11,818	3,798	15,616
María Elena	16,985	3,725	20,710	23,594	220	23,814
Pedro de Valdivia	13,250	6,126	19,376	19,935	2,605	22,540
Tocopilla, Total	32,715	17,673	50,388	55,347	6,623	61,970

Estas cifras dan un total de 173.765,000 toneladas. Pero, en este tonelaje se han considerado solamente las Oficinas Salitreras que han ingresado en la COSACH

mientras que otras Oficinas no han entrado a la COSACH en parte voluntariamente, en parte porque la COSACH no se interesaba por la situación desfavorable de sus campos. Agregando estos campos y redondeando las cifras, el señor *E. López*, profesor de salitre en la Universidad de Chile, obtuvo las siguientes cifras, por cuya comunicación le quedo especialmente agradecido.

Zona de Iquique	90 millones de toneladas
Zona de Tocopilla	70 millones de toneladas
Zona de Antofagasta	25 millones de toneladas
Zona de Aguas Blancas	3 millones de toneladas
Zona de Taltal	12 millones de toneladas
Total	200 millones de toneladas

Según esto, para una producción anual de 2 millones de toneladas, las reservas de salitre reconocidas hasta ahora alcanzarían para 100 años. de manera que un agotamiento de los campos salitreros no es de temer en un plazo corto. Además existen extensas zonas en el Norte que esperan todavía una investigación más exacta.