

**SEGEMAR**

SERVICIO GEOLÓGICO  
MINERO ARGENTINO

INTEMIN-INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA  
IGRM-INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

**U N S A M**

UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE GENERAL SAN MARTÍN

SEMINARIO DE ESTUDIOS SOBRE EL CICLO MINERALES - MATERIALES



# SALES



**SEGEMAR**

SERVICIO GEOLÓGICO  
MINERO ARGENTINO

INTEMIN-INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA  
IGRM-INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERA-

**U N S A M**

UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE GENERAL SAN MARTÍN

---

**SEMINARIO DE ESTUDIOS SOBRE EL CICLO MINERALES - MATERIALES**

---

**S A L E S**

**SEGEMAR**

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

SUBSECRETARÍA DE MINERÍA

SECRETARÍA DE ENERGÍA Y MINERÍA

MINISTERIO DE INFRAESTRUCTURA Y VIVIENDA

Avda. General Paz entre Albarelos y Constituyentes

C.C. 327 - (1650) San Martín

Prov. de Buenos Aires - Argentina

TEL. 5411-4754-9232/36 - TEL. y FAX 5411-4754-4070

e-mail - Postmaster: info@segemar.gov.ar

Oficina Centro: Avda. Gral. Julio A. Roca 651 - Piso 2 - (1322) - Buenos Aires

TEL. 5411-4349-3127/3257 -TEL. y FAX 5411-4349-3129

**UNSAM**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN

Calle 78 (ex Alem) N° 3901

(1653) Villa Ballester - Provincia de Buenos Aires - ARGENTINA

TEL. y FAX 4767-5675/4738-4037/4847-1582

Fotos de tapa:

*Fondo: Piletas de cristalización de sales. Salinas Grandes, Salta - Jujuy, Argentina.*

*Arriba: Cosecha de sal a partir de los cordones. Provincia de La Pampa, Argentina*

*Abajo izquierda: Microfotografía de cristales euhedrales de thenardita. Las vegas, Estados Unidos.  
(15Kv x 2,700)*

*Abajo derecha: Halita. Depósito Stassfurt, Saxiny - Anhaly, Alemania.*

ISSN N°: 0329-5230

## PRESENTACIÓN

Dentro del Convenio Marco de Cooperación firmado el 14 de agosto de 1996 entre la UNSAM - UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN y el SEGEMAR - SERVICIO GEOLOGICO MINERO ARGENTINO, se acordó, por el Acta Complementaria N° 1, la realización conjunta de un Seminario de Estudios sobre el tema: *“EL CICLO MINERALES - MATERIALES: TENDENCIAS A NIVEL MUNDIAL Y PROSPECTIVA PARA ARGENTINA”*. El objetivo de este Seminario es el de analizar las tendencias mundiales en la evolución tecnológica del ciclo:

- exploración geológica
- explotación minera
- procesamiento de minerales
- fabricación de materiales
- reciclado
- y la situación y prospectiva de nuestro país en el área de los materiales inorgánicos, tanto tradicionales como avanzados.

Las tareas de este Seminario son desarrolladas a través de dos de los institutos del SEGEMAR: el IGRM - INSTITUTO DE GEOLOGIA Y RECURSOS MINERALES, y el INTEMIN - INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA.

De esta manera ambas instituciones, el SEGEMAR y la UNSAM, buscan aunar recursos humanos y financieros para abordar la problemática del ciclo minerales - materiales, de fundamental importancia para el desarrollo tecnológico de nuestro país, a través de la investigación sobre tendencias a nivel mundial, información sobre recursos minerales, procesamiento de los mismos y fabricación de los productos finales - los materiales - sin olvidar aspectos tan relevantes como el reciclado, la salubridad y el medio ambiente. En efecto, la denominada “revolución de los materiales”, por su significación económica y estratégica, es una de las características tecnológicas más salientes del mundo de fines del siglo XX y comienzos del XXI, y nuestro país debe incorporarse en forma plena, a través de distintas vías, a la misma.

Los productos finales del Seminario serán publicaciones como la presente, que quedarán a disposición de las empresas industriales, de los organismos públicos y de los institutos de investigación, así como los archivos de la documentación básica utilizada. Toda sugerencia, aporte, crítica o comentario que sirvan para mejorar estas publicaciones serán bienvenidos.

*Ing. Jorge Mayoral*  
**Secretario de Minería de la Nación**  
Presidente SEGEMAR

*Lic. Daniel Malcolm*  
**Rector**  
UNSAM

**SEMINARIO DE ESTUDIOS SOBRE EL  
CICLO MINERALES - MATERIALES**

**GRUPO DE TRABAJO**

**RECURSOS MINERALES**

**Coordinador del tema**

*Dr. Eduardo O. Zappettini (IGRM)*

*Oswaldo Daniel Caccaglio (Becario UNSAM)*

**PROCESAMIENTO Y RECICLADO**

**Coordinador del tema:**

*Lic. Ana María Celeda (INTEMIN)*

*Erica Kober (Becaria UNSAM)*

*Maria Alcira Trinelli (Becaria UNSAM)*

**MATERIALES**

**Coordinador del tema:**

*Ing. Andrés E. Pinto (INTEMIN)*

*Lic. Martín G. Labarca (Becario UNSAM)*

**INFORMACIÓN ECONÓMICA**

**Coordinador del tema**

*Dr. Eduardo O. Zappettini (IGRM)*

*Oswaldo Daniel Caccaglio (Becario UNSAM)*

**DISEÑO PUBLICACIÓN**

**Coordinador del tema:**

*Oswaldo Daniel Caccaglio (Becario UNSAM)*

**COMITÉ ASESOR**

*Ing. Carlos Gianella (UNSAM)*

*Lic. Juan Carlos Herrero (INTEMIN)*

*Lic. Roberto Page (IGRM)*

# ÍNDICE

<b>Introducción</b>	11
<b>Capítulo 1: Yacimientos portadores de sales en la República Argentina</b>	
1.1. Generalidades	13
1.2. Estado natural	14
1.3. Tipos de depósitos	16
1.3.1. Depósitos marinos actuales	18
1.3.2. Depósitos marinos fósiles	18
1.3.3. Depósitos continentales actuales	18
1.3.4. Depósitos continentales fósiles	20
1.3.5. Depósitos de ambiente mixto	20
1.4. Las sales en el mundo	20
1.4.1. Sales de litio	20
1.4.2. Sales de potasio	20
1.4.3. Sales de sodio	21
1.4.3.1. Cloruro de sodio	21
1.4.3.2. Sulfato de sodio	22
1.4.3.3. Carbonato de sodio	22
1.5. Depósitos en la república argentina	23
1.5.1. Región NOA	23
1.5.2. Región patagonia	27
1.6. Sistemas de explotación	31
1.6.1. Explotación de sales de litio	31
1.6.2. Explotación de cloruro de potasio	31
1.6.3. Explotación de cloruro de sodio	34
1.6.4. Explotación de sulfato de sodio	36
1.7. Bibliografía	47
<b>Capítulo 2: Procesamiento de minerales portadores de boro</b>	
2.1. Procesamiento de sales de litio	49
2.1.1. Introducción	49
2.1.2. Concentración de las salmueras portadoras de litio	49
2.1.3. Obtención de cloruro de litio	50
2.1.4. Obtención de carbonato de litio	50
2.2. Procesamiento de cloruro de potasio (silvita)	50
2.2.1. Introducción	50
2.2.2. Recuperación de sales por disolución in situ (solution mining)	51
2.2.3. Eliminación de insolubles previa a la separación de sales flotación	51
2.2.4. Eliminación de insolubles en salmuera	54
2.2.5. Separación de NaCl - KCl a partir de soluciones salinas del solution mining	54
2.2.6. Obtención de KCl por flotación de silvinita	54
2.2.7. Purificación de los concentrados de flotación	57
2.2.8. Obtención de sales de potasio a partir de salmueras	57
2.3. Procesamiento de sulfato de potasio	58
2.3.1. A partir de langbeinita	58

2.3.2.	A partir de salmueras naturales .....	58
2.3.3.	Otros procesos de obtención .....	59
2.4.	Procesamiento de cloruro de sodio .....	59
2.4.1.	Introducción .....	59
2.4.2.	Métodos artesanales para la concentración de salmueras de baja ley .....	60
2.4.3.	Métodos industriales de concentración de salmueras .....	62
2.4.4.	Purificación de sal: obtención de sal de alta y muy alta pureza .....	66
2.4.5.	Purificación de salmueras .....	68
2.4.6.	Agregado de aditivos a la sal destinada al consumo humano .....	70
2.5.	Procesamiento de carbonato de sodio (sada ash) .....	71
2.5.1.	Introducción .....	71
2.5.2.	Procesamiento de trona .....	71
2.5.3.	Procesamiento de salmueras obtenidas por <i>Solution Mining</i> .....	73
2.5.4.	Procesamiento de salmueras naturales .....	73
2.5.5.	Obtención de distintos tipos de carbonato de sodio .....	74
2.6.	Obtención de sulfato de sodio .....	75
2.6.1.	Introducción .....	75
2.6.2.	Procesamiento para la obtención de sulfato de sodio decahidratado en sulfateras ..	75
2.6.3.	Procesamiento para la obtención de sulfato de sodio decahidratado en salares ..	76
2.6.4.	Procesamiento para la obtención de sulfato de sodio anhidro .....	78
2.6.5.	Procesos para la obtención de sodio anhidro de alta pureza .....	81
2.7.	Reciclado .....	82
2.7.1.	Cloruro de potasio .....	82
2.7.2.	Cloruro de sodio .....	82
2.7.3.	Carbonato de sodio .....	83
2.7.4.	Sulfato de sodio .....	83
2.8.	Salud y seguridad .....	83
2.8.1.	Sales de litio .....	83
2.8.2.	Cloruro de potasio .....	83
2.8.3.	Cloruro de sodio .....	83
2.8.4.	Carbonato de sodio .....	84
2.8.5.	Sulfato de sodio .....	84
2.9.	Bibliografía .....	84

### **Capítulo 3: Materiales y productos químicos a base de sales inorgánicas**

3.1.	Sales de litio .....	88
3.1.1.	Cloruro de litio .....	88
3.1.2.	Carbonato de litio .....	88
3.2.	Cloruro de potasio .....	91
3.3.	Cloruro de sodio .....	91
3.4.	Carbonato de sodio .....	93
3.5.	Sulfato de sodio .....	95
3.6.	Bibliografía .....	97

### **Capítulo 4: Información económica de los boratos**

4.1.	Producción y consumo .....	99
4.1.1.	Litio .....	99

4.1.2.	Potasio	99
4.1.3.	Cloruro de sodio	100
4.1.4.	Sulfato de sodio	102
4.1.5.	Carbonato de sodio	103
4.2.	Producción en la República Argentina	103
4.3.	Política Arancelaria	105
4.4.	Comercio exterior	105
4.4.1.	Exportaciones	105
4.4.2.	Importaciones	105
4.5.	Precios	108
4.6.	Especificaciones	108
4.6.1.	Litio	108
4.6.2.	Sales de potasio	108
4.6.3.	Sulfato de sodio	109
4.6.4.	Cloruro de sodio	109
4.8.	Bibliografía	110

## INTRODUCCIÓN

*“Para el año 2000 la tecnología que más influirá en otras ramas de la ingeniería será la tecnología de los materiales. Esta tecnología será también la que tendrá la repercusión externa más positiva en la industria, la energía, la vivienda, el transporte, la salud y otras esferas”.*

*Boletín ONUDI, Octubre 1995.*

Hay consenso general en que la llamada “revolución de los materiales” representa un hecho sumamente importante en la evolución actual de la sociedad mundial. Los materiales (metálicos, cerámicos, plásticos y compuestos) se fabrican con materias primas minerales, tanto inorgánicas como orgánicas. A su vez esos materiales, cumplido su **ciclo de vida**, vuelven a dispersarse en el medio ambiente, contaminándolo, o bien son reciclados volviendo a incorporarse al ciclo productivo, enfoque que cobra cada vez más importancia en el mundo (ver gráfico adjunto). El tema de este Seminario de Estudios sobre el Ciclo Minerales - Materiales es justamente analizar la situación de nuestro país en tal contexto, y en particular con respecto a las **materias primas minerales**: existen en gran variedad y muchas de ellas en abundancia, pero faltan más trabajos de exploración y relevamiento. En el otro extremo del ciclo, en particular en el caso de los **materiales avanzados**, su desarrollo se lleva a cabo mayormente en otros países, utilizando materias primas minerales procesadas de acuerdo a normas estrictas lo que significa un mucho mayor valor agregado a los productos de la minería. Pero en realidad, la actividad minera y la fabricación y uso de materiales forman parte del mismo ciclo, que se completa con los procesos de reciclado naturales y los realizados por el hombre, o la dispersión final en el medio ambiente: es el denominado **ciclo minerales - materiales**. Los estudios desarrollados en este Seminario conjunto entre el SEGEMAR y la UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN buscan ser un aporte a la comprensión de esta problemática.

La presente publicación recopila en forma ordenada la información de diversas fuentes sobre aspectos del ciclo de las **sales**. En este volumen se compilan datos sobre las **sales**, sus yacimientos en Argentina, procesamiento, obtención de materiales a partir de éstos, información económica y estadística como así también mercados y tendencias tecnológicas.

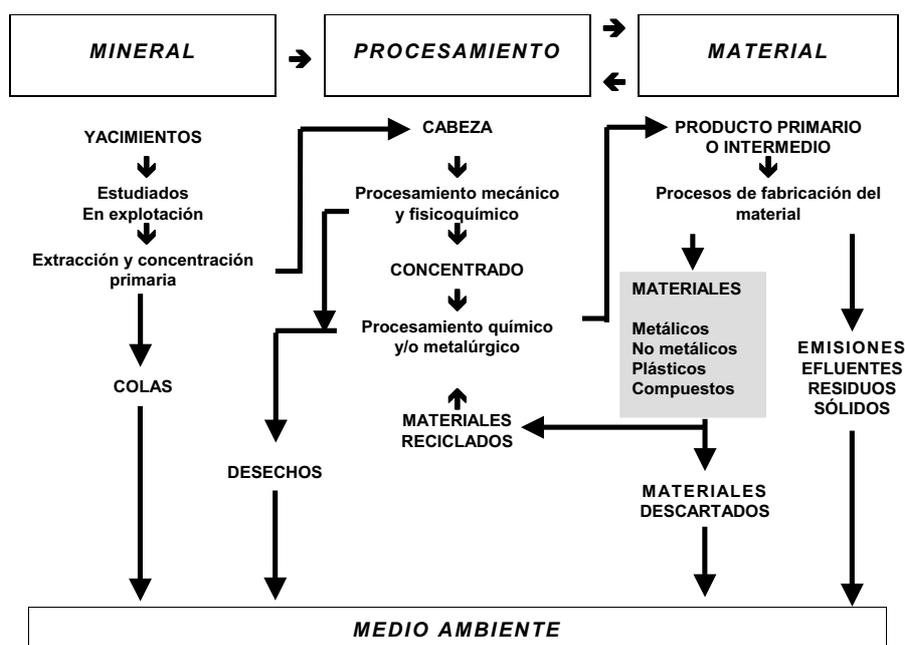
El término “sal” tiene diferentes significados y definiciones. Químicamente, es el término genérico que se usa para nombrar al producto de la reacción química entre un ácido ( sulfúrico, clorhídrico, carbónico, bórico, etc.) y una base (hidróxidos de sodio, de potasio, de litio, etc.). Para muchas personas, “sal” es el nombre común con el que se llama al cloruro de sodio.

En este capítulo, abordaremos el tema de algunas de las sales solubles en agua más comunes y más utilizadas en muy distintas aplicaciones: cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de litio, sulfato de sodio, sulfato de potasio, carbonato de litio y carbonato de sodio. Las sales del ácido bórico, genéricamente llamadas boratos, ya fueron desarrolladas en la publicación SEGEMAR-UNSAM número 8: “Boratos”.

Algunas de las sales que se describirán en este capítulo, se encuentran en depósitos en estado sólido siendo extraídas por métodos de la minería tradicional. Otras se encuentran solubilizadas en las aguas de mares, lagos, lagunas o salinas de las cuales se recuperan por distintos procesos.

No se sabe como el hombre aprendió acerca de las propiedades saborizantes del cloruro de sodio, pero ya era mencionada por los chinos hace 4700 años en sus tratados de farmacología y más recientemente, en la edad antigua citada por Plutarco y Herodoto en sus escritos, y también en más de 30 pasajes bíblicos. Hoy, además de ser un elemento esencial en la dieta no solo del ser humano, también de los animales y muchas plantas, se le conocen más de 14000 aplicaciones entre las cuales, la obtención de cloro e hidróxido de sodio es una de sus aplicaciones industriales más importantes. De manera semejante, el carbonato de sodio es una de las materias primas más importantes utilizadas en la industria química. Obtenido en la antigüedad a partir de la cenizas de la calcinación de maderas de árboles, fue posteriormente producido artificialmente por el proceso Solvay (que reemplazó al antiguo proceso Leblanc). Hoy vuelve a tomar importancia su recuperación a

### ESQUEMA DEL CICLO MINERALES - MATERIALES



que se conocieron mucho tiempo antes pero que recién después de la Primera Guerra Mundial que adquirieron importancia para la producción de aleaciones a base de plomo. Por ser la fuente de K por excelencia en la formulación de los fertilizantes del grupo NPK (nitrógeno-fósforo-potasio), el cloruro de potasio tiene y tendrá en el futuro un rol preponderante en la economía mundial.

A diferencia de las demás sales incluidas en este volumen, el sulfato de sodio tiene la particularidad de presentar solubilidad invertida (su solubilidad en agua disminuye con el aumento de temperatura). Este hecho generó problemas en los evaporadores-cristalizadores utilizados en otro tipo de sales y llevó al desarrollo y/o aplicación del proceso de combustión sumergida que tiene aplicación para la evaporación y concentración de muchos otros productos (ácido fosfórico, concentración de jugos cítricos). Por otro lado, en el desarrollo del capítulo correspondiente se verá como funciona una “poza solar” que además de usarse para la recuperación de sulfato de sodio, puede utilizarse como un acumulador de calor y fuente de energía.

Esta serie de publicaciones ofrece a los interesados en el tema - empresas productoras de materias primas minerales o de productos intermedios o finales, usuarios de los materiales o de los componentes con ellos fabricados, así como organismos públicos e instituciones universitarias y del sector científico-técnico - un conjunto articulado de informaciones que buscan satisfacer tanto un criterio de demanda (búsqueda de materias primas de origen mineral aptas para la fabricación de materiales tradicionales, avanzados, u otros productos), como de oferta e identificación de materias primas minerales de alto valor que existen en nuestro país y que no estén siendo explotadas, y que podrían ser ofrecidas (a mercados internos o externos) con algún tipo de elaboración que satisfaga los crecientes requerimientos de calidad. Estos trabajos muestran la necesidad de integración de las diversas disciplinas que tienen que ver con el estudio y desarrollo de todos los aspectos del **ciclo de los minerales - materiales**, tanto a nivel nacional como provincial, y la de un reforzamiento de las mismas especialmente en cuanto se refiere a los recursos humanos. Aprovechamos esta oportunidad para agradecer a todas las personas cuya colaboración ha sido de importancia para la concreción de esta tarea, desde los funcionarios responsables de nuestros organismos hasta nuestros colaboradores más inmediatos, y las numerosas personas que nos han ayudado en la recopilación de información.

En esta publicación, debemos agradecer especialmente la colaboración del geólogo Diego Roverano, por las fotografías aportadas de la salina del Bebedero, San Luis. Agradecemos asimismo de antemano a quienes nos señalen errores o imprecisiones en los textos para introducir, en las próximas ediciones de estos fascículos, las correcciones correspondientes.

Ana María Celeda  
 Coordinadora de Procesamiento y Reciclado

# Capítulo 1

## YACIMIENTOS PORTADORES DE SALES EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

### 1.1. GENERALIDADES

En la química moderna, la palabra sal es un término descriptivo aplicado a todo un grupo de sustancias. Una sal es un compuesto iónico que contiene un catión distinto de  $H^+$  y un anión distinto del  $OH^-$  u  $O^{2-}$  (Ej:  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $K_2SO_4$ ). La característica más importante de las sales es la disociación iónica en soluciones acuosas. Los cationes más importantes que forman sales son sodio ( $Na$ ), magnesio ( $Mg$ ), potasio ( $K$ ), calcio ( $Ca$ ) y litio ( $Li$ ). En esta publicación técnica nos abocaremos a los cationes pertenecientes a los metales alcalinos, que forman sales, el litio ( $Li$ ), sodio ( $Na$ ) y potasio ( $K$ ). Las sales de magnesio fueron tratadas anteriormente (ver Publicación Técnica SEGEMAR-UNSAM N° 3: Magnesio,). Las sales se encuentran, en la naturaleza, en estado sólido o en solución acuosa. En estado sólido están presentes en salares, salinas, formaciones geológicas sedimentarias (estratificadas) y en domos salinos; en solución se hallan en océanos, lagos, lagunas y aguas subterráneas.

El litio, sodio y potasio pertenecen al grupo I de la tabla periódica de elementos y sus respectivos números atómicos son 3, 11 y 19. Estos tres elementos, como metales alcalinos, en estado elemental o metálico ( $Li^0$ ,  $Na^0$  y  $K^0$ ) tienen lustre brillante plateado y son buenos conductores de la electricidad y el calor, no así sus óxidos o sales. Las principales características son: ser metales blandos, poseer las temperaturas de fusión más bajas y no encontrarse, en la naturaleza, en estado metálico por ser los cationes más reactivos y reaccionar con todos los no metales formando sales, óxidos, nitratos, carbonatos, boratos, sulfatos, fosfatos y silicatos. De los diferentes grupos minerales en los cuales participan, las sales son las más abundantes y tienen alta importancia económica (Maham, 1986).

El litio fue descubierto por Arfvedson en 1817 y fue aislado como metal en 1855 por

Bunsen y Matthiessen, con el método de electrólisis de cloruro fundido. Es el tercer elemento alcalino en abundancia después del sodio y el potasio, alcanzando una concentración en la corteza terrestre de 20 mg/kg (Lide, 1996). Se encuentra presente en minerales, sedimentos y salmueras asociadas a áreas termales. Los principales minerales silicáticos portadores de litio ocurren en pegmatitas y fueron la fuente tradicional para la obtención de este elemento. El descubrimiento de litio en salmueras hizo que estas pasaran a ser la principal fuente de obtención, debido a su menor complejidad en el minado y producción (Kunasz, 1994).

El potasio es el elemento alcalino más abundante después del sodio con  $2,09 \times 10^4$  mg/kg en la corteza terrestre (Lide, 1996). Se encuentra formando parte de minerales en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias como también es un catión abundante en aguas tanto superficiales como subterráneas. Los depósitos económicos de sales de potasio son depósitos estratificados de grandes volúmenes y alta ley, por ende son sujetos a explotación y tratamiento con un relativo bajo costo (Williams-Stroud *et al.*, 1994). El contenido de potasio se expresa normalmente en %  $K_2O$ , unidad que es un compuesto teórico, ya que no existe en la naturaleza ni en forma sintética (1,0%  $K = 1,2046 K_2O$ ). En 1840, investigadores alemanes probaron que el potasio era vital para el crecimiento de las plantas. Desde entonces, la utilización de potasio, en agricultura, como fertilizante superó sus aplicaciones en la industria química. Los tres elementos, potasio, nitrógeno y fósforo, forman los fertilizantes conocidos como "NPK". El 95% de la producción de potasio se destina a los fertilizantes y el 5% restante es utilizado por la industria. Los principales minerales de potasio para la fabricación de fertilizantes son la silvita ( $KCl$ ), kainita ( $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$ ) y langbeinita ( $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ ) de los cuales la silvita es el mineral con mayor ley de potasio  $K_2O$ : 63,17% (Williams-Stroud *et al.*, 1994).

El sodio es el sexto elemento alcalino más abundante en la corteza terrestre con  $2,36 \times 10^4$  mg/kg y el cuarto en abundancia en el agua de mar (Lide, 1996). El sodio se encuentra formando minerales en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, pero la fuente principal de este elemento es el cloruro de sodio (NaCl), constituyente primario de los depósitos evaporíticos. El cloruro de sodio, comúnmente llamado sal, es un componente esencial para la vida de los seres vivos. Su consumo y explotación se remonta a los orígenes de la humanidad y en épocas pasadas llegó a ser más valioso que muchos metales preciosos. Además, es un importante indicador de la actividad económica de los diferentes países en el mundo (Kostick, 2000).

## 1.2. ESTADO NATURAL

**LITIO en salmueras**  $\text{Li}^+$ . Se encuentra presente en salmueras en forma iónica (no forma compuestos). Las salmueras litíferas se constituyen a partir de soluciones termales de origen volcánico, las que se acumulan en salares y salinas, donde la solución diluida de litio fue concentrada por evaporación solar. Altas concentraciones de litio se encuentran en los salares de Argentina (Salar del Hombre Muerto: 100 a 700 ppm  $\text{Li}^+$ ), Bolivia (Salar de Uyuni: 100 a 500 ppm de  $\text{Li}^+$ ) y Chile (Salar de Atacama: 1.000 a 5.000 ppm  $\text{Li}^+$ ).

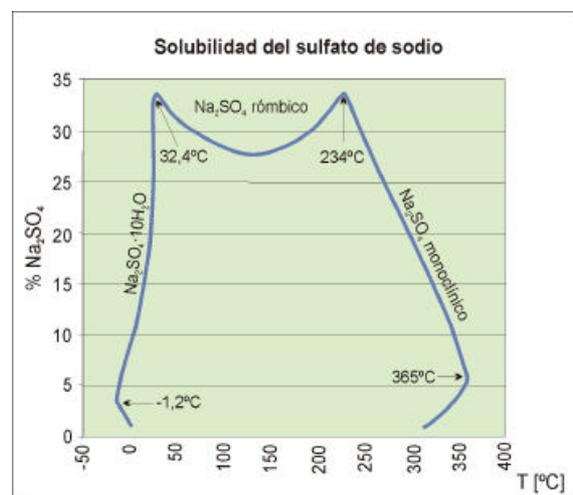
**SILVITA** KCl. Cristaliza en el sistema rómbico. Son comunes los cristales cúbicos y octaédricos combinados. En agregados granulados y terrosos, compactos, a veces con estructura estratificada. Dureza Mohs 2 y densidad  $1,9 \text{ g/cm}^3$ . Transparente si es puro. Incoloro o blanco. En variedades impuras presenta tonalidades azuladas, amarillentas o rojizas. Muy soluble en agua; sabor amargo, astringente. La composición es K: 52,4% - Cl: 47,6%. Puede tener cloruro de sodio en mezcla.

**HALITA** NaCl. Cristaliza en el sistema cúbico. El hábito de los cristales es cúbico y en forma de "tolva", raras veces octaédricos. En agregados monocristalinos o masas cristalinas granulares, compactas o fibrosos. También como eflorescencias filiformes y estalactitas. Dureza

Mohs 2 y densidad  $2,1 - 2,2 \text{ g/cm}^3$ . Fractura concoide. Transparente a translúcido. Incoloro o blanco, puede tener tonalidades amarillas, rojas, gris, raras veces azuladas y púrpura en minerales impuros. Brillo vítreo. Sabor salado. La composición es Na: 39,3% - Cl: 60,7%. Son comunes las impurezas tales como sulfatos y cloruros de magnesio y calcio. Presenta una alta solubilidad en agua, a  $0^\circ\text{C}$ : 35,7 partes en 100 partes de  $\text{H}_2\text{O}$  y a  $100^\circ\text{C}$ : 39,8 partes en 100 partes de  $\text{H}_2\text{O}$ . La halita intercalada en secuencias sedimentarias se denomina sal gema o sal de roca.

**THENARDITA**  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Cristaliza en el sistema rómbico, en forma de agregados cristalinos o como eflorescencias. Dureza Mohs 2,5. Densidad  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . Transparente a translúcido. Frágil. Blanco a incoloro. Se forma por evaporación en lagunas y salares, también como producto de exhalaciones volcánicas

**MIRABILITA (Sal de Glauber)**  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Monoclínico. Hábito prismático, cristales alargados; en costras masivas, fibrosas y eflorescencias. Dureza Mohs 1,5 y densidad  $1,49 \text{ g/cm}^3$ . Frágil. Fácilmente soluble en agua. Sabor amargo salado. Transparente e incoloro. Cuando se altera, por pérdida de agua, pasa de ser transparente e incoloro a blanco y turbio. La mirabilita tiene como característica su alta solubilidad que varía con la temperatura. Esta propiedad es importante para la obtención industrial del sulfato de sodio puro, pero resulta un inconveniente cuando hay que cubicar depósitos de dicha sal, especialmente lagunas sulfatadas (Cordini, 1967).



Variación de la solubilidad del sulfato de sodio con la temperatura.

**GLAUBERITA**  $\text{CaNa}_2(\text{SO}_4)_2$ . Monoclínico. Cristales de hábito muy variable; en agregados granulados y reniformes. Fractura concoidal. Dureza Mohs 2,5 - 3 y densidad 2,7 - 2,8 g/cm<sup>3</sup>. Transparente a translúcido. Brillo vítreo a graso. Incoloro, blanco, gris, amarillo, rojo. Poco soluble en agua. Sabor salado, amargo.

**NATRITA**  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Monoclínico. Por lo general se presenta en costras fibrosas, pulverulentas o como eflorescencias. Fractura concoidal. Densidad 1,42 - 1,47 g/cm<sup>3</sup> y dureza Mohs 1 - 1,5. Brillo vítreo. Transparente a translúcido. Incoloro, blanco amarillento a grisáceo. Se deposita por evaporación de aguas

portadoras de carbonato neutro de sodio, preferentemente en salinas, durante los meses de verano. En gran parte es el resultado de la descomposición de silicatos alcalinos o por la reacción entre el cloruro o sulfato de sodio sobre el carbonato de calcio.

**TRONA**  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Monoclínico. Se presenta con hábito prismático o tabular. Incoloro, blanco o amarillo claro. Densidad 2,17 g.cm<sup>-3</sup> y dureza Mohs 2,5 - 3,0. Frágil con clivaje perfecto. Soluble en ácido clorhídrico. Cuando se calienta pierde agua y dióxido de carbono. Las eflorescencias tienen colores terrosos por la presencia de arcillas.

**Principales sales de sulfato de sodio**

Mineral	Composición	%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Thenardita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100,00
Hanksita	9Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KCl	81,70
D'ansita	9Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> MgSO <sub>4</sub> 3NaCl	81,20
Lecontita	(Na,NH <sub>4</sub> ;K) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	<79,80
Vanthoffita	3Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> MgSO <sub>4</sub>	78,00
Hectorfloresita	7Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaClO <sub>3</sub>	74,10
Sulfohalita	2NaSO <sub>4</sub> NaCl NaF	73,90
Burkeita	Na <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )	72,80
Eugsterita	2Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> CaSO <sub>4</sub> 2 H <sub>2</sub> O	62,30
Darapskita	NaNO <sub>3</sub> NaSO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	58,00
Hidro-glauberita	5NaSO <sub>4</sub> 3CaSO <sub>4</sub> 6H <sub>2</sub> O	57,90
Glauberita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> CaSO <sub>4</sub>	51,10
Loeweita	MgSO <sub>4</sub> NaSO <sub>4</sub> 2,5H <sub>2</sub> O	46,20
Ferrinarita	3Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	45,60
Mirabilita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10H <sub>2</sub> O	44,10
Bleodita	MgSO <sub>4</sub> NaSO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	42,50
Kroehnkita	CuSO <sub>4</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	42,10
Nickelbloedita	Na <sub>2</sub> Ni(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O	40,30
Sideronatrita	Na <sub>2</sub> Fe(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) 3H <sub>2</sub> O	38,90
Caracolita	Pb(OH)Cl Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	35,40
Palmierita	(K,Na) <sub>2</sub> Pb(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	<31,90
Tychita	2MgCO <sub>3</sub> 2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	27,20
Aphthitalita (glaserita)	(K,Na) <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	21,00-38,00
Tamarugite	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 12H <sub>2</sub> O	20,30
Natrocalcita	Cu <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	18,80
Almeriita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 5Al(OH) <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	15,90
Mendozita (soda alum)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 24H <sub>2</sub> O	15,50
Natrojarosita	Na <sub>2</sub> Fe <sub>6</sub> (OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub>	14,70
Noseiita	3Na <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14,30
Slavikita	(Na,K) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Fe(OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>12</sub> 63H <sub>2</sub> O	<4,60

Principales sales portadoras de potasio		
Mineral	Composición	%K <sub>2</sub> O
Silvita	KCl	63,17
Glaserita	3K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42,51
Syngenita	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> CaSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	28,68
Schoenita	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> MgSO <sub>4</sub> 6H <sub>2</sub> O	23,39
Langbeinita	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2MgSO <sub>4</sub>	22,69
Kainita	4(KCl MgSO <sub>4</sub> ) H <sub>2</sub> O	19,26
Polyhalita	K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	15,62
Carnalita	KCl MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	16,95

Principales rocas portadoras de potasio		
Roca	Composición	%K <sub>2</sub> O
Silvinita	KCl + NaCl	10,00 35,00
Hart-Salz (sal dura)	KCl + NaCl + CaSO <sub>4</sub> + (MgSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O)	10,00 20,00

Principales sales de carbonato de sodio		
Mineral	Composición	% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>(1)</sup>
Termonatrita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	85,5
Wegscheiderita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3NaHCO <sub>3</sub>	74,0
Trona	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> NaHCO <sub>3</sub> 2H <sub>2</sub> O	70,4
Nahcolita	NaHCO <sub>3</sub>	63,1
Bradleyita	NaPO <sub>4</sub> MgCO <sub>3</sub>	47,1
Pirsonita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> CaCO <sub>3</sub> 2H <sub>2</sub> O	43,8
Tychita	2MgCO <sub>3</sub> 2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42,6
Northupita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> NaCl MgCO <sub>3</sub>	40,6
Natron	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 10H <sub>2</sub> O	37,1
Dawsonita	NaAl(CO <sub>3</sub> )(OH) <sub>2</sub>	35,8
Gaylusita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> CaCO <sub>3</sub> 5H <sub>2</sub> O	35,8
Shortita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 2CaCO <sub>3</sub>	34,6
Burkeita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 2Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	27,2
Hanksita	9Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KCl	13,6

(1): incluye bicarbonato convertido a carbonato

## 1.3. TIPO DE DEPÓSITOS

### 1.3.1. GENERALIDADES

Los depósitos salinos se clasifican, según su ambiente de formación, en tres categorías: continentales, marinos y mixtos. Tanto los depósitos continentales como marinos, a su vez, se subdividen en actuales o fósiles

Un **salar** es una cuenca en la que se han acumulado sales (cloruros, sulfatos, boratos, etc.) en cantidades económicas, pudiéndose extraer la sal por medio de labores a cielo abierto o

subterráneas. Las impurezas más comunes son sedimentos clásticos insolubles: sílice libre, silicatos, materia orgánica descompuesta o macerada. Se utiliza el término **salina** en lugar de salar cuando dentro del sistema hay predominio de cloruro de sodio (Cordini, 1967). Los salares presentan formas y tamaños diversos, como por ejemplo el salar de Arizaro (provincia de Salta) con 1.600 km<sup>2</sup> de superficie o El Pioner (provincia de La Pampa) de 2 km<sup>2</sup> de superficie. En general los depósitos salinos tienen zonación sedimentaria formada por distintas facies: costa o borde, sector de playa y el depósito interno o

central. La costa o borde está constituida por sedimentos arenosos, vegetación halófila y no contiene sales. La playa tiene sedimentos más finos en relación a la costa y sales en baja proporción. El depósito central es la zona productiva del yacimiento compuesto en su totalidad por sales. Por encima de los niveles salinos, pueden existir aguas madres o salmueras saturadas en iones, la profundidad de éstas es variable desde unos pocos a 30 centímetros (Schalamuk *et al.*, 1999). Los límites faciales no son netos, varían de un salar a otro y pueden no estar presente algunas de las zonas (Alonso, 1999 b). La mineralización de los salares no tiene un patrón definido dado que cada salar es una unidad individual aislada y recoge en sí mismo los iones y sedimentos de una cuenca particular.

El depósito central salino está conformado por la costra temporaria y la permanente. La costra temporaria de un salar o salina es aquella que se forma a partir del agua madre y será máxima cuando todo el agua se haya evaporado y mínima cuando el salar o la salina se encuentre inundada; es el depósito explotable *sensu stricto*. La costra permanente yace por debajo de la costra temporaria y esta constituida por fangos salinos, en descomposición, estratos de cloruro de sodio impuro, cristales de sulfato de sodio y hacia la base, yeso en cristales aislados o rosetas. Esta capa no llega a disolverse durante el período de inundación. La costra permanente son sedimentos cíclicos que contienen gran cantidad de materia orgánica y sedimentos clásticos muy finos (arcillas). Las intercalaciones fangosas responden a los períodos de inundación.

La **reserva de la salina** es la cantidad de sal que potencialmente contiene el depósito. La reserva se calcula evaluando los tonelajes contenidos en:

- la playa
- la costra temporaria
- la costra permanente
- los aportes

Una salina puede presentar tres modalidades de reservas (Cordini, 1967):

- **Reserva abajo**, si la costra temporaria y la costra permanente sobreyacen a las arenas que componen el piso de la cuenca. Estos depósitos forman una costra temporaria en poco tiempo y pueden dar múltiples cosechas durante el año.

- **Reserva arriba**, las costras se encuentran intercaladas en los sedimentos hacia la parte superior. Estas salinas forman la costra temporaria con mayor lentitud que las anteriores pero la sal que producen es más pura y pueden obtenerse hasta dos cosechas anuales.

- **Sin reserva**, no poseen costra temporaria. Las sales están en solución en las aguas madres y cuando éstas se evaporan se depositan en el piso de la salina como una delgada capa. Este tipo de depósitos es anómalo en el rendimiento debido a que durante años no se produce la precipitación de sales, presentan inconvenientes por la alta variación de los lugares donde precipita el depósito y también por el tamaño de grano, de medio a fino. La producción es irregular, tanto en cantidad como en calidad.

La **playa** del salar es la franja marginal de sedimentos salinizados que rodean al depósito salino. La playa es fangosa, rica en materia orgánica y no explotable por cosecha. Se la define en función de sus sedimentos y no en función del tiempo que permanece emergida ó sumergida. La playa se divide en dos áreas, la playa distal y la proximal.

La playa distal: es la región más externa con respecto al depósito salino explotable, rodea al salar y tiene pocas decenas de metros de ancho. La playa distal esta constituida por sedimentos clásticos limoarenosos, con alto contenido de materia orgánica. Las sales se encuentran en cantidades subordinadas o formando una delgada capa.

La playa proximal: se ubica entre la playa distal y el depósito explotable. Está constituida por sedimentos limoarcillosos, de coloración oscura, ricos en materia orgánica. Los sedimentos clásticos alcanzan el centro del depósito por debajo de la capa de sales o como intercalaciones entre los niveles evaporíticos. El contenido de sales es creciente hacia el centro del depósito o depocentro (Schalamuk *et al.*, 1999).

El **piso** es el conjunto costra temporaria - costra permanente. Un piso firme permite el acceso al yacimiento con máquinas pesadas; las salinas de piso blando deben explotarse con maquinarias livianas.

El piso del depósito (salina, salar, etc.) tiene que estar nivelado formando una superficie lisa y horizontal. Esto es debido a que si el piso tiene irregularidades, la cristalización de las sales, que

formarán la costra temporaria, comienza en las concavidades del mismo y adquiere allí mayor espesor. El resultado es una superficie con zonas más delgadas y por lo tanto más elásticas. Los gases producidos por la fermentación de la materia orgánica en la costra permanente ascienden a través de las partes delgadas, arrastrando impurezas y formando burbujas de hasta unos 5 cm de diámetro. Por este motivo, cuanto más horizontal es el piso, mejora la calidad química de la sal.

### 1.3.1. DEPÓSITOS MARINOS ACTUALES

Los **océanos** son la principal fuente natural de sales en el mundo. El volumen total de agua en los océanos es cercano a los  $5,3 \cdot 10^8 \text{ km}^3$ , en las cuales hay disueltas cerca de  $4,2 \cdot 10^{16} \text{ t}$  de sales. La salinidad de los océanos varía del 1 al 5% dependiendo de la ubicación (latitud - longitud), profundidad, influencias externas (desembocaduras de ríos, corrientes litorales, temperaturas, etc.); se estima el promedio mundial en 3,5 por ciento.

Un kilómetro cúbico de agua de mar contiene  $9,3 \cdot 10^7 \text{ t}$  de sales disueltas,  $7,8 \cdot 10^7 \text{ t}$  son de cloruro de sodio (halita). Si se comenzara a evaporar un kilómetro cúbico de agua de mar, la precipitación química empieza cuando el volumen es reducido a la mitad (yeso, anhidrita) y recién cuando el volumen es la décima parte del volumen original, precipita halita.

A diferencia con los salares (depósitos continentales internos), la composición de las evaporitas marinas no presentan grandes variaciones. Los principales iones que la componen son:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ . Estos depósitos constituyen las mayores reservas mundiales de sal como también de yeso, anhidrita, potasio, magnesio, bromo, iodo, rubidio, estroncio y otros elementos minoritarios (Guilbert y Park, 1986).

En las fajas (zonas) costeras yacen depósitos salinos, los cuales se generan a partir de depresiones naturales y episodios de alta marea, tormenta o aerosoles marinos. El agua de mar es retenida en estas depresiones formando lagunas costeras. Si la tasa de evaporación es alta, se producirá la reducción del volumen de agua con la consiguiente concentración de iones y posterior precipitación de sales, dando lugar a costras salinas.

### 1.3.2. DEPÓSITOS MARINOS FÓSILES

Los **depósitos estratificados** salinos o depósitos salinos fósiles se formaron desde el período Precámbrico hasta el Terciario y se originaron por la precipitación de sales a partir del agua de mar. En general, los depósitos fósiles tienen cientos de kilómetros de superficie y espesores de cientos de metros (por ejemplo: depósitos Zechtein en Europa y Huitrín en Argentina). Se explotan por métodos a cielo abierto, subterráneos o por disolución y bombeo. La principal mineralización asociada, con interés económico, corresponde a sales de potasio.

Los **domos salinos** son antiguos depósitos estratificados que debido a fuerzas compresivas fluyen plásticamente. Las fuerzas pueden ser debidas al peso de los sedimentos suprayacentes o factores tectónicos. Las sales tienden a ascender tomando forma de domos o diapiros. En general, son depósitos subterráneos pero en algunas partes del mundo alcanzan la superficie, como en la isla Avery, Estados Unidos.

### 1.3.3. DEPÓSITOS CONTINENTALES ACTUALES

Los **salares** son depósitos que yacen en cuencas endorreicas donde se han acumulado sedimentos evaporíticos químicos o sales en concentraciones económicas (Cordini, 1967).

Los salares se caracterizan por ser depósitos **efímeros**, la mayoría del tiempo se encuentran secos debido a la alta tasa de evaporación, por lo cual la salinidad de las aguas es varias veces superior a la oceánica y en ciertos casos mayor al 30 por ciento. El clima y la tasa de evaporación juegan un rol muy importante dentro de la evolución de un salar. Los cambios climáticos tienen gran influencia en este tipo de depósitos, así una laguna puede transformarse en un salar (desertización, alta tasa de evaporación) o un salar pasar a ser un lago o laguna por un aumento en la tasa de precipitaciones.

**Salinas de cosecha** es una expresión utilizada para designar una salina que, debido al régimen climático de la zona en que se encuentra ubicada, presenta dos aspectos principales durante el año. En la época de lluvias la cuenca se inunda transformándose en un cuerpo de agua temporario,

poco profundo, en el cual se disuelve el cloruro de sodio que rellena parte del **piso** de dicha cuenca. En la estación seca las aguas se evaporan, precipitando sal pura en forma de costra superficial; esto permite la recolección ( **cosecha**) valiéndose de rastras y otros dispositivos auxiliares. Todas las salinas explotables de La Pampa y de Buenos Aires pertenecen a este tipo.

Otras denominaciones son:

- **Salitral:** cuenca cuyo relleno está impregnado por un porcentaje bajo de sales solubles. En el sistema sedimento - agua - sales predomina la primera de las fases. Se explota económicamente por disolución de las sales, aprovechando aguas de la napa freática.

- **Sulfatera:** cuenca en la cual la fase principal del sistema que compone el relleno superficial está constituida por sulfato de sodio, magnesio o mezcla de ambos. No se incluyen dentro de la definición los depósitos de sulfato de potasio ni de calcio. Esta distinción es arbitraria desde el punto de vista científico, pero se la mantiene con un fin práctico dada la gran diferencia en precio y aplicaciones de las sales obtenidas.

Las sulfateras y las lagunas sulfatadas

presentan una disposición que se diferencia en parte de las salinas, fundamentalmente por el poco desarrollo o la carencia de una reserva de sales permanente, así como también por el hecho de que las aguas madres permanecen prácticamente todo el año, sin llegar a un estadio de desecación extrema. En general se trata de depresiones de tamaños más reducidos que los observados para los cuerpos evaporíticos productores de halita (Schalamuk *et al*, 1999).

Los **lagos o lagunas** saladas son acumulaciones naturales de agua **permanente** en depresiones topográficas. Al igual que los salares, la mineralización se forma a partir del aporte de iones de aguas superficiales y/o profundas. La composición y concentración de los iones en las aguas superficiales o profundas, que alimentan al lago o laguna, es directamente dependiente al tipo de rocas y/o sedimentos por los que fluyen. El tamaño de estos cuerpos de agua, con relación a los océanos, los hace sensibles a los cambios climáticos, presentando fluctuaciones en la precipitación de sales. Las sales precipitadas durante un período de contracción o sequía, pueden redisolverse durante períodos de expansión o lluvia.

Clarke (1924, en Kostick, 1994) clasificó los lagos según la mineralización dominante que presenten:



**Fotografía 1:** Vista panorámica del Salar del Hombre Muerto , provincia de Catamarca.

- Lagos salados clorados
- Lagos de aguas amargas (alta concentración de sales de magnesio)
- Lagos de aguas sulfatadas
- Lagos de aguas sulfatadas - cloradas
- Lagos alcalinos; lagos carbonaticos, carbonaticos - clorados, carbonaticos - clorados - sulfatados

En los depósitos salinos lacustres, el sodio y el calcio son los cationes más abundantes, por ende los depósitos principales son los de halita, sulfato de sodio, burkeita, gaylusita y trona.

Las **aguas subterráneas** se dividen en dos tipos, las aguas connatas y las aguas meteóricas. Las aguas connatas son todas aquellas que se alojaron en sedimentos en su momento de formación y reflejan la composición del agua en ese momento. Las aguas meteóricas, o agua de lluvia, están libres de solutos pero al ser incorporadas a los sedimentos, absorben iones. La salinidad que presentan puede ser desde cero hasta 254.000 ppm de iones.

#### 1.3.4. DEPÓSITOS CONTINENTALES FÓSILES

Los **depósitos estratificados** continentales salinos se originaron por la precipitación de sales a partir de antiguos cuerpos lacustres. Los estratos sedimentarios pueden tener desde centímetros hasta metros de potencia, esto se relaciona con el tamaño del cuerpo de agua, las condiciones climáticas, evolución de la cuenca donde yacen, etc. Se explotan por métodos a cielo abierto, subterráneos o por disolución y bombeo. Como ejemplo de este tipo de depósitos en Argentina se puede citar la F. Sijes compuesta por sal de roca, areniscas, limonitas, arcillitas, yeso, tobas, carbonatos y boratos.

#### 1.3.5. DEPÓSITOS DE AMBIENTE MIXTO

Los depósitos salinos de ambiente marino – continental tienen su génesis en pequeñas cuencas o depresiones cercanas a la costa, que se encuentran conectadas al mar por canales de marea. La desconexión de estos canales y posterior evaporación del agua, produce la precipitación de sales. Las características principales de estos depósitos son la composición de las sales semejante a las evaporitas marinas y el tamaño reducido.

## 1.4. LAS SALES EN EL MUNDO

### 1.4.1. SALES DE LITIO

Chile es el mayor productor de litio (químico) en el mundo, seguido por China, Estados Unidos, Rusia y Argentina. Australia y Canadá son los mayores productores de concentrado de litio y Estados Unidos es el principal consumidor de estos productos y productor de materiales con valor agregado.

Chile tiene las mayores concentraciones de salmueras de litio en el salar de Atacama. El origen del litio proviene de tres fuentes: 1) alteración de rocas volcánicas y transporte por los ríos que descargan en el salar de Atacama 2) existencia de sedimentos lacustres, pre-salar, ricos en litio (490 ppm de Li), que fueron identificados en formaciones subyacentes. 3) fluidos geotermales provenientes de la región norte del salar, con contenidos de 28 a 40 ppm de litio. En la región sur del salar existen lugares con anomalías geoquímicas con concentraciones de hasta 7000 ppm de litio (Kunasz, 1994).

Estados Unidos produce litio a partir de salmueras en el estado de Nevada en Clayton Valley y Searles Lake. Las salmueras de Clayton Valley se encuentran en sedimentos cuaternarios, compuestos por arcillas, arenas volcánicas, gravas, minerales salinos, yeso y halita. Las salmueras se encuentran interestratificadas dentro de los sedimentos con concentraciones variables de litio. La ley tiende a decrecer debido al bombeo, variando de 300 a 100 ppm de litio. Los recursos estimados de litio, a una profundidad de 300 m, son 115.000 t, pero recientes investigaciones han identificado un nuevo nivel aumentando las reservas. Las salmueras son concentradas hasta 12 veces por evaporación solar.

Argentina pasó a ser el segundo país productor de litio en los últimos años a partir del desarrollo del proyecto Fénix en el salar del Hombre Muerto. La producción de litio a partir de salmueras litíferas con bajo costo repercutió en el mercado mundial en el cierre de las explotaciones de China y Rusia (Ober, 2000).

### 1.4.2 SALES DE POTASIO

Los principales países explotadores de potasio

son Canadá y Rusia (Comunidad de estados independientes), ambos países, alcanzan el 89% del total mundial con reservas de potasio recuperables estimadas en  $9,3 \cdot 10^9$  t  $K_2O$ . Otros países que tienen yacimientos de potasio son: Alemania, Inglaterra, España, Italia, Francia, Estados Unidos, China, Tailandia, Israel, Arabia Saudita, Egipto, Etiopía, Brasil, Bolivia, Chile y Argentina. La producción mundial, para 1999, fue de 25,2 millones de toneladas de  $K_2O$  (Searls, 2000).

Canadá posee las más grandes reservas de silvita en el mundo con reservas estimadas de  $4.700 \cdot 10^6$  t y los más importantes yacimientos están en las provincias de Saskatchewan y New Brunswick, donde se explotan por métodos subterráneos por el sistema de cámaras y pilares. En Saskatchewan, el depósito de potasio evaporítico está formado por tres horizontes de edad devónica mineralizados por silvita y carnalita, con potencias de 20 a 25 metros. En New Brunswick, las evaporitas pertenecen al Grupo Winsor de edad mississippiana y se componen por silvita y en menor proporción, carnalita. Los horizontes tienen una ley media de 23%  $K_2O$  y se encuentran desde los 300 a 1000 m de profundidad. La producción en Canadá, para 1999, fue de 8,1 millones de toneladas de óxido de potasio ( $K_2O$ ).

Estados Unidos produce potasio a partir de salmueras superficiales y subterráneas. En el estado de Nuevo México, el distrito Carsbad posee mineralización de silvita, langbeinita y menores concentraciones de sulfatos de potasio y sodio. La producción se concentra en 5 de los 10 horizontes mineralizados. El estado de Michigan explota silvinita de la formación La Salina de edad silúrico, con un espesor total de 30 m en la parte central de la cuenca. Las leyes son erráticas alcanzando valores del 40%  $K_2O$ . Además hay yacimientos en Utah, Arizona, California y Texas. La producción total de Estados Unidos, para 1999, fue de  $1,3 \cdot 10^6$  t  $K_2O$ .

URSS tiene sus depósitos en la región centro-sur del país con diferentes edades y mineralogías. En Ucrania los depósitos tienen edad miocena y su mineralogía está integrada por langbeinita y kainita con proporciones menores de silvita, carnalita, schoenita y polyhalita. Las leyes son del 9 al 14%  $K_2O$  en la mineralización de langbeinita - kainita y del 33% en silvita. Bielorusia, en la región de Pripyat, los depósitos están compuestos por 60 horizontes la edad devónica (Frameniano) denominados

Horizonte Elets. La mineralización es de silvita y carnalita interestratificadas con halita, con un espesor total de 70 metros. Además existen depósitos en Rusia, Kazakhstan y Siberia.

En Europa, el depósito más importante es la cuenca Zechstein en Alemania, Inglaterra y Polonia. En Alemania están constituidos por cinco horizontes de carnalita, hartsalz, silvita y kieserita, explotados por medios subterráneos a profundidades que van de los 400 m a 1000 metros. Alemania durante el año 1999 produjo  $3,2 \cdot 10^6$  t de óxido de potasio ( $K_2O$ ).

Los yacimientos de potasio en América del Sur están principalmente concentrados en Brasil, Chile y Argentina. Brasil tiene depósitos pérmicos en la cuenca del Amazonas. Los depósitos se encuentran a 1.000 m de profundidad con un espesor promedio de 2,7 m y una ley media de 16,5% de óxido de potasio.

Chile tiene depósitos en salares de la región norte del país. El Salar de Atacama produce alrededor de 50 kt de KCl como un subproducto de la producción de litio (Williams - Stroud *et al.*, 1994).

### 1.4.3. SALES DE SODIO

#### 1.4.3.1. Cloruro de sodio

Los depósitos de cloruro de sodio se encuentran en todos los países del mundo y aquellos que no cuentan con éste recurso lo producen a partir del agua de mar o lagos salinos por el método de evaporación solar.

La producción mundial de cloruro de sodio para 1999, fue de  $200 \cdot 10^6$  t y las reservas son ilimitadas. Los principales países productores de cloruro de sodio son: Estados Unidos, China, Alemania, Canadá, India, Australia y México (Kostick, 1994).

Estados Unidos tiene reservas estimadas en  $5,5 \cdot 10^{13}$  t, concentradas en cuatro cuencas que cubren 1,3 millones de kilómetros cuadrados, en 18 estados. Las cuatro cuencas son: Costa del Golfo de edad permo - jurásica, Pérmica de edad pérmica, Salina de edad silúrica, Willinston, de edad ordovicica - pérmica. Las cuencas de Willinston y Salina se extienden también en Canadá. Los depósitos presentan buena calidad y espesores y son explotados por disolución o minería subterránea.

China es el mayor productor de NaCl de Asia y el segundo productor mundial después de Estados

Unidos. Las plantas de evaporación solar se encuentran en las regiones costeras desde Manchuria hasta la provincia de Kwangsi. La producción de China para 1999 fue de 31 millones de toneladas. Otros países asiáticos productores de sal de roca son India, Pakistán y Tailandia.

Alemania es el principal productor de sal en Europa, en 1999 su producción alcanzó los  $15,7 \cdot 10^6$  t de NaCl. El principal depósito de sal en Alemania es la cuenca Zechstein, de edad pérmica, que corresponden a depósitos evaporíticos marinos fósiles. Estos depósitos, se extienden desde de la región este de Inglaterra hasta el oeste de Polonia. Los países que producen cloruro de sodio a partir de evaporación solar son: Francia, Grecia, Italia, Portugal y España. La principal industria europea que consume sal es la química.

África produce sal por evaporación solar, de agua de mar y lagos salinos. Los países africanos productores de sal son Argelia, Benin, Burkina Faso, Egipto, Ghana, Libia y otros.

Canadá concentra el 85% de sus reservas en las provincias de Alberta, New Brunswick, Nova Scotia, Ontario, Quebec y Saskatchewan. Cerca del 62% de la producción de NaCl es proveniente de Ontario.

Brasil explota yacimientos constituidos por domos salinos en la cuenca Sergipe, Amazonas y costa afuera. La producción de Brasil para 1999 fue de 5,5 millones de toneladas. Otros países sudamericanos que tienen depósitos son: Argentina, Bolivia, Chile, Perú y Colombia. La mayoría de los depósitos sudamericanos son del tipo salar (Kostick, 2000).

#### 1.4.3.2. Sulfato de sodio

Los principales productores de sulfato de sodio son: México, Canadá, Estados Unidos, Rusia y España y con menor importancia Chile, Irán, Turquía, Egipto, China y Argentina. La producción mundial de sulfato de sodio natural, en 1999 fue de 4 millones de toneladas.

México es el mayor productor de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en el mundo, la producción alcanza las  $0,65 \cdot 10^6$  t de sulfato de sodio natural anual (Kostick, 1990, en Mc Ilveen *et al.*, 1994). Los depósitos evaporíticos que contienen altas concentraciones de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se ubican en Laguna del Rey, en el noreste de Coahuila. Las evaporitas tienen forma de lentes y su mineralogía es mirabilita, epsomita, glauberita y bloedita, son bancos delgados y en agregados

irregulares. El espesor promedio es de 1 a 2 m y se encuentran a 8 m de profundidad. Según análisis de diferentes muestras tienen una ley de 35% de sulfato de sodio con sólo el 1,5 a 1,8% de halita. Las reservas estimadas alcanzan los  $160 \cdot 10^6$  t de sulfato de sodio anhidro.

Canadá presenta importantes depósitos de sulfato de sodio en la región oeste del país. Se conocen 70 depósitos de  $1,00 \cdot 10^6$  t de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  cada uno. Las principales reservas las encontramos en Saskatchewan, donde las reservas alcanzan los 54,4 a  $63,5 \cdot 10^6$  t (Broughton, 1977, en Mc Ilveen *et al.*, 1994). La producción de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  natural en 1990 fue de 347 kt (Mc Ilveen *et al.*, 1994).

URSS tiene gran cantidad de depósitos ubicados en la región del Mar Muerto, en la frontera con China y en la parte central y este de Siberia. Los depósitos más importantes económicamente se encuentran en los lagos Aral y en el mar Caspio. El mar Caspio tiene el mayor depósito mundial de sulfato de sodio, en el golfo Kara - bogaz - gol, la mineralogía presente es glauberita, astracanita, halita, yeso y carbonatos.

Estados Unidos tiene depósitos de sulfato en las regiones oeste y centro del país, en los estados de California, Colorado, Nevada, Nuevo México, Oregon y otros. La producción de sulfato de sodio es de salmueras y salares. Los más importantes depósitos se encuentran en el lago Searles, California. Este yacimiento es explotado desde 1873 y la mineralización ocurre en salmueras intersticiales de la zona de playa. Existen otros depósitos en los estados de Utah, Texas, Arizona, Nevada, Nuevo México y Dacota del Norte.

España tiene depósitos de sulfato de sodio en la provincia de Toledo, donde se explota thenardita. La mineralización se encuentra con espesores de 5 a 6 m y es explotada por métodos subterráneos de cámaras y pilares. La composición de las sales es de un 70 a 75% de sulfato de sodio, 11 a 17% de sulfato de calcio, 0,4 a 0,6% de halita y un 3 a 9% de arcillas.

Argentina y Chile son los principales productores sudamericanos. Argentina tiene depósitos tanto en la Puna como en la Patagonia, mientras que Chile tiene depósitos sólo en la región Noreste del país.

#### 1.4.3.3. Carbonato de sodio

La mayoría de los depósitos de carbonato de

sodio no son lo suficientemente grandes (rentables económicamente) por lo que muchos de los depósitos son explotados para un consumo local o del propio país. La producción mundial de carbonato de sodio natural, para 1999, fue de 10,5 millones de toneladas.

África presenta dispersos por todo el continente una gran cantidad de depósitos. Muchos ocurren como depósitos lacustres aislados mientras que en la región este del continente, conocida como Valle del Rift, los depósitos se presentan formando un rosario. Los principales países productores son Egipto, Chad, Sudán, Kenia, Namibia, Sudáfrica. En 1999, la producción total de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en Kenia fue de 200.000 toneladas

En Asia, los países que presentan depósitos son China, India, Mongolia y URSS.

Turquía tiene yacimientos de carbonato de sodio en la región de Beypazari, a 30 km de Ankara. El depósito de Beypazari cubre un área de 8 km<sup>2</sup> y tiene una edad miocena superior. Los bancos mineralizados tienen un espesor que varía de 2 cm a 11,5 m, con un total acumulado de 38 metros. Las reservas son de 235 millones de toneladas.

Canadá tiene depósitos de carbonato de sodio en la región oeste del país, en el estado de British Columbia. El carbonato de sodio es encontrado primariamente en salmueras y algunos pocos bancos y costras. La reserva calculada para esta región es de 103.000 toneladas.

México tiene depósitos de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en salmueras, fuentes termales, costras y eflorescencias. Las principales mineralizaciones las encontramos en el lago Texcoco. El clima cálido de la región acelera la evaporación y concentra los solutos en salmueras. Las salmueras tienden a concentrarse en dos zonas impermeables cercanas a los 53 m de profundidad. La zona más rica en  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  contiene cerca de 120,0.10<sup>0</sup> t de recurso mientras que la otra contiene cerca de 40 millones de toneladas.

Estados Unidos tiene depósitos en Alaska, California, Colorado, Nebraska, Nevada, Oregon, Utah, Washington y Wyoming. La cuenca Green River en Wyoming es el depósito de trona subterráneo más grande del mundo. La cuenca tiene 3.200 km<sup>2</sup> y el total de recursos estimados alcanza 122.10<sup>9</sup> t de trona y trona - halita. El depósito tiene 42 bancos de trona, 25 de los cuales tienen un espesor mayor a 0,91 m y 11 de los bancos exceden 1,83 m de espesor. El yacimiento se explota por cámaras y pilares.

Sudamérica tiene depósitos en: Bolivia, Brasil, Chile, Venezuela y Perú, pero no tienen importancia económica (Kostick, 2000).

## 1.5. DEPÓSITOS EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

La República Argentina posee importantes yacimientos de sales (cloruro de sodio, sulfatos, etc.), distribuidos en la mayoría de las provincias y salmueras con litio en el noroeste del país. Los depósitos se presentan tanto como costras salinas en la superficie de los salares, precipitados en los fondos de las salinas, disueltos en salmueras o formando parte del arreglo estratigráfico en rocas sedimentarias fósiles. Las principales áreas donde se encuentran agrupaciones de yacimientos son: región NOA (Puna) y Patagonia - Comahue. La característica más importante que diferencia a estas dos regiones es la participación volcánica en los depósitos evaporíticos del noroeste, con manifestaciones y yacimientos de sales de litio y boratos entre otros.

### 1.5.1. REGIÓN NOA

La región del NOA (Catamarca, Jujuy, La Rioja, Salta y Tucumán) cuenta con importantes depósitos de cloruro de sodio (halita y sal de roca), sulfato de sodio, salmueras con litio y potasio y concentraciones menores de carbonato de sodio. Estas mineralizaciones ocurren en salares, salinas, y en estratos terciarios.

El proceso de formación de los salares en el NOA comenzó en el Terciario superior bajo condiciones climáticas húmedas, para luego instalarse un clima árido y seco con un escaso drenaje externo (cuencas endorreicas). Esto produjo un desequilibrio hídrico que dio lugar a la formación de los diferentes depósitos evaporíticos. En esta región encontramos amplias zonas de playa con precipitados salinos con una alta participación de sedimentos arenosos, arenos - pelíticos y rocas volcánicas.

Los principales salares y lagunas que se localizan en el NOA cubren una extensa superficie del orden de los 4.000 km<sup>2</sup>, destacándose por su envergadura el salar de Arizaro (Salta), con casi 1.500 km<sup>2</sup>, el salar de Antofalla (Catamarca - Salta) con 500 km<sup>2</sup> y las

Salinas Grandes (Salta - Jujuy) y Pocitos (Salta) con 300 km<sup>2</sup> respectivamente.

Las salmueras litíferas se encuentran en numerosos salares cuaternarios del noroeste argentino, como por ejemplo en el salar del Hombre Muerto, Rincón, Diablillos, Cauchari y otros. El litio en la región se vincula a la actividad volcánica y tiene una estrecha relación con el boro y el potasio. El par geoquímico boro - litio se encuentra en diferentes salares. La relación B:Li es homogénea para cada salar, pero distinta entre los salares (Alonso, 1990). Los yacimientos más importantes son el salar del Hombre Muerto y salar Rincón. En el salar del Hombre Muerto se desarrolló el proyecto Fénix - FMC para la explotación de salmueras litíferas en una superficie de 240 km<sup>2</sup> donde se realizaron 20 perforaciones a diamantina hasta una profundidad de 150 metros. La evaluación aportó valores anómalos de 700 a 800 ppm de Li y 7.000 a 8.000 ppm de K con reservas de 648 Mm<sup>3</sup>. Las reservas conservativas de salmueras recuperables alcanzan los 90 años con profundidades entre 40 y 70 metros. Se produce carbonato de litio en la Puna y cloruro de litio en la localidad de General Güemes, provincia de Salta (Alonso, 1999b).

La presencia de mirabilita y thenardita es conspicua para la mayoría de los salares de la

Puna Argentina en concentraciones discretas. Sin embargo, existen yacimientos económicos de sulfato de sodio por el volumen de sus reservas. Estos son los salares Río Grande, Pocitos, Cauchari y Laguna Socompa (Argañañaz, 1999).

El depósito evaporítico **Laguna Brava** se ubica en el departamento General Sarmiento, Prov. de La Rioja. La mineralización predominante es el sulfato de sodio, originado a partir de aguas subterráneas, ricas en sulfatos y cloruros. Las especies minerales presentes son: thenardita, mirabilita y halita. El depósito tiene un contenido promedio de 60% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, potencia media de 0,50 m y 9,5.10<sup>6</sup> t de reservas (Combina y Passarello, 1980 en Marcos, 1999).

El salar **Río Grande** se ubica en la Puna de Salta, próximo al límite con Chile, tiene una superficie de 180 km<sup>2</sup> a una altura media de 3.630 metros sobre el nivel del mar. La superficie del salar está cubierta por una costra rugosa de NaCl. En el borde occidental, medio superior, y hacia el interior del salar hay mineralización de sulfato de sodio en bolsones dentro de la masa de halita. De dichas concentraciones se ha extraído el mineral de mayor pureza. El salar presenta una salmuera superficial con un 6,3% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y el aporte del sulfato tiene su origen en diversos manantiales que recogen el lixiviado de azufre



**Fotografía 2:** Mina Fenix, Salar del Hombre Muerto, Catamarca. Planta de procesamiento de litio.

de diversos volcanes. El yacimiento de sulfato de sodio de este salar es el más importante y rico de la Puna y uno de los más importantes del país. El área mineralizada ocupa una franja central de salar, de 7 km de elongación meridiana y unas 18.000 ha, con un manto de 0,50 a 1,20 m de espesor, lo que indica reservas del orden de las  $40 \cdot 10^6$  t. Mediante sondeos se han cortado mantos de mirabilita de 14 m de espesor. Su ubicación en la parte más inhóspita de la Puna impide una explotación económica intensiva.

La halita es la evapofacies más representativa en los salares de la Puna, pero no siempre resulta de calidad económica para su explotación y muchos depósitos se encuentran en zonas inaccesibles. Las costras o capas de sal presentan espesores que varían de unos pocos centímetros a cientos de metros. Como ejemplos

pueden citarse el salar **Arizaro** de 1600 km<sup>2</sup> de superficie donde se realizó una perforación que atravesó 100 m de halita de gran pureza y el salar **Rincón** con 256 km<sup>2</sup> en el que se realizaron pozos exploratorios por parte de la Dirección de Minería de Salta atravesando un manto continuo de halita hasta los 60 m de profundidad. A pesar de lo expuesto, los únicos yacimientos de NaCl en la región del NOA que se explotaron fueron los salares de Taca Taca, Pastos Grandes y Rincón. Para el año 1999 sólo se explotaba Salinas Grandes (Alonso, 1999b).

El carbonato de sodio en el noroeste argentino es llamado “coipa” y se extrae en pequeñas cantidades de las eflorescencias de muchos salares. Las eflorescencias son blancas a níveas, friables y de sabor picante lo que constituye una característica organoléptica



**Fotografía 3:** Parvas de sal, de pequeñas dimensiones, para su purga en el noroeste argentino.



**Fotografía 4:** Explotación de sal por sistema de panes. Se puede observar los diferentes colores en los panes debido a la presencia de impurezas

distintiva. Entre las especies minerales que se han reconocido se tiene natrita, trona y pirssonita. El único yacimiento subeconómico conocido es Laguna Geschel, donde se han cubicado 12.700 t de mineral probable y 9.700 t de mineral posible con leyes medias de 20,23% de carbonato de sodio.

**Salinas Grandes** se encuentra ubicada en las provincias de Salta y Jujuy, a una altura de 3.470 metros sobre el nivel del mar. La región central de la salina tiene una costra salina, con espesores variables entre 5 y 20 cm de sal cristalina, dura compacta con niveles arcillosos. La reserva superficial de la costra salina es de aprox. 10,0.10<sup>6</sup> t de sales con contenidos que oscilan entre 95,07 y 96,39% de NaCl; 0,30 a 0,9% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y 0,16 a 0,20% de carbonato de sodio.

El Salar de **Taca Taca** presenta una capa de sal, que tiene un espesor entre 0,20 y 0,60 m en la parte central, hacia la periferia la capa se adelgaza hasta formar una delgada costra salina. El yacimiento se explota por piletas y cosecha.

El salar **Rincón** tiene una dimensión de 256 km<sup>2</sup> con un substrato de rocas metamórficas ordovícicas, rocas volcánicas (andesitas, dacitas, tobas y basaltos) y sedimentos de edad terciaria a actual. El depósito de sal está formado por una costra salina de superficie irregular y áspera. La costra salina en superficie es impura y a profundidad tiene alto grado de pureza. Los primeros 40 cm de la costra salina presentan contenidos que oscilan entre 95 y 97% NaCl y 1,0 a 3,0% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, con la participación de

cationes Li<sup>+</sup> (0,353 g/l), K<sup>+</sup> (6,57 g/l) y Mg<sup>2+</sup> (2,12 g/l). La explotación se realiza por medio de piletas, raspado de eflorescencias y arranque de panes.

Los depósitos fósiles de sal de roca localizados en el salar **Tolar Grande**, en la provincia de Salta, están compuestos por bancos de 5 a 8 m de espesor, con intercalaciones de areniscas rojas y pelitas pardo - rojizas. Éste paquete sedimentario evaporítico es de edad terciario superior (Blasco *et al.*, 1996). En la pertenencia Elena se realizó un análisis de la mineralización arrojando una ley de 91,41% NaCl y 1,64% de sulfato de sodio.

Las salmueras **El Timbó** ubicadas en el departamento Burreyacu, provincia de Tucumán, son las únicas en el país explotadas por métodos de bombeo subterráneo. El depósito está constituido por alternancia de arenas, gravas, limo y aglomerados con cuerpos salinos cristalizados, los cuales salinizan las napas de agua que lo atraviesan. La cuenca fue explorada hasta los 250 m de profundidad, con un manto principal de NaCl a una profundidad media de 70 metros y un manto secundario a 118 metros. La salmuera se extrae por medio de electrobombas sumergibles o inyectando aire comprimido. La producción mensual de los pozos es 18 a 19 millones de litros de salmuera, con una densidad media en boca de pozo de 1.190 - 1.200 g/l, con valores promedio de 280,0 g/l NaCl y 16,57% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Las reservas medidas para el año 1996 eran de 380.000 m<sup>3</sup> y las indicadas de

Composición química media de los principales salares del NOA

Salar	Provincia	Cl-%	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> %	K <sup>+</sup> %	Na <sup>+</sup> %	Li <sup>+</sup> %	Mg <sup>2+</sup> %	Ca <sup>2+</sup> %
Antofalla	Catamarca - Salta	13,8	4,30	0,39	7,20	0,03	1,70	0,00
Arizaro	Salta	15,7	1,06	0,34	0,00	0,07	0,17	0,48
Cauchari	Jujuy	15,5	1,50	0,52	9,90	0,09	0,20	0,12
Centenario	Salta	12,6	4,00	0,60	8,00	0,04	0,30	0,30
Diablillos	Salta	14,3	0,85	0,91	8,00	0,96	0,38	0,13
Hombre Muerto	Catamarca - Salta	15,0	1,20	0,50	8,00	0,07	0,20	0,31
Jama	Jujuy	14,6	2,20	0,69	9,16	0,04	0,07	0,10
Llullaillaco	Jujuy	13,5	3,00	0,85	8,00	0,02	0,40	0,22
Olaroz	Jujuy	16,0	0,88	0,56	9,10	0,09	0,18	0,05
Pastos Grandes	Jujuy	15,0	0,90	0,82	9,33	0,04	0,39	0,04
Pocitos	Salta	14,5	1,50	0,40	9,09	0,01	0,22	0,28
Pozuelos	Salta	15,0	1,20	0,45	12,00	0,03	0,25	0,19
Ratones	Salta	15,0	1,10	0,70	8,80	0,06	0,34	0,33
Rincón	Salta	14,1	4,20	0,71	8,30	0,03	0,52	0,32
Río Grande	Salta	13,6	6,30	0,79	8,30	0,03	0,42	0,55
Salinas Grandes	Jujuy - Salta	16,2	2,00	0,51	9,60	0,04	0,15	0,22



**Fotografía 4:** Salar de Taca Taca, Salta. Explotación de sal en piletas.

3,5 millones de metros cúbicos.

### 1.5.2. REGIÓN PATAGONIA

La región patagónica está integrada por las provincias de Chubut, La Pampa, Neuquén, Río Negro, Santa Cruz. Se incluye en esta región, a los fines descriptivos, la porción sur occidental de Buenos Aires.

Las sales son los recursos de más vieja data en su aprovechamiento y ocupan el primer lugar en la actividad extractiva no metalífera de la región. El total de las reservas teóricas de sal común estimadas en la capa permanente, aguas madres e incluso en el fango, asciende a una cifra superior a  $1.000 \cdot 10^6$  t, pertenecientes a las principales salinas y cuerpos de agua salinizada. El 50% de las reservas pertenecen a la provincia de La Pampa.

Las reservas estimadas para sulfato de sodio, en salinas y cuerpos de agua salinizada alcanza unos 45 millones de toneladas, el 40 - 45% corresponde a la provincia de Buenos Aires (Angelelli *et al.*, 1976).

Los yacimientos con mayor relevancia son: Salinas Chicas, Salina de Piedra y Epecuén, en la provincia de Buenos Aires; salinas de la península de Valdés, en Chubut; Salinas Grandes

de Hidalgo, Salinas Grandes (Anzoátegui), laguna Colorada Grande, laguna Larga o Colorada Chica, salina El Chanco y salitral Negro, en La Pampa; El Gualicho, en Río Negro y Cabo Blanco, Fátima II y Florentino Ameghino en Santa Cruz (Angelelli *et al.*, 1976).

En las provincias de Neuquén y Mendoza existen depósitos de sales fósiles en la formación Huitrín. La Formación Huitrín tiene cloruro de sodio dentro del Miembro Salina y cloruro de potasio en el Miembro Troncoso.

En la región pampeana los depósitos salinos presentan un importante control estructural, orientados paralelos a las fracturas regionales (ONO – ESE), que delimitan las depresiones y permiten la circulación de agua subterránea (Schalamuk *et al.*, 1999). La producción de halita y sulfato de sodio, en la región pampeana, fue afectada en los últimos 10 a 15 años por un incremento en la tasa de precipitaciones. Este incremento produjo la dilución en los cuerpos salinos, lo que determinó el abandono temporario de los yacimientos más afectados, como por ejemplo Salinas Grandes de Hidalgo, Epecuén e Hinojo (Schalamuk *et al.*, 1999).

Las **Salinas Chicas** (provincia de Buenos Aires) se caracterizan por presentar una playa distal cuyos sedimentos contienen mucho

material insoluble y donde las sales se encuentran subordinadas con respecto a los sedimentos clásticos. El cuerpo salino está integrado por: agua madre, costra temporaria y reserva permanente. El agua madre constituye una salmuera de 338,02 g/l de salinidad media. La costra temporaria o capa explotable, tiene un espesor variable entre 1 y 3 centímetros. Por debajo de la capa temporaria, yace la reserva permanente que alcanza una potencia de 1 a 4 m constituida por capas de NaCl alternadas con sedimentos clásticos y sulfatos. Cordini (1967), indica para la costra temporaria los siguientes tenores: 97,92% NaCl, 0,7058% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0,6278% CaSO<sub>4</sub> y 0,028 g/l de insolubles en agua. La reserva total del cuerpo, conformada por la playa, arenas del piso, agua subterránea y el cuerpo salino propiamente dicho (salmuera y costra), se podrían estimar en 500.000 t como reserva potencial anual (?).

**Salina de Piedra o Cagliero**, según Cordini (1967) es uno de los mejores cuerpos salinos de la región pampeana. Esto se debe al alto contenido en NaCl, la firmeza del piso, la accesibilidad de las playas y las características de las reservas. El principal mineral es halita con una pureza que oscila entre un 95 y 98% y es mayor en los niveles superficiales. La reserva es del tipo "reserva abajo" (la reserva se encuentra intercalada entre las arenas del relleno). Sobre la base de un espesor promedio de 3 cm y una superficie explotable de 1.700 ha se llegaría a una reserva temporaria de 741.500 toneladas.

**Salina del Inglés** tiene depósitos halíticos de 8 - 10 cm de espesor y las reservas estimadas alcanzarían los 5 millones de toneladas; en la capa temporaria el contenido de NaCl alcanza el 96 por ciento.

La sulfatera **Choique**, en la provincia de

Buenos Aires, es comparable a una salina de cosecha. El sulfato más puro se recolecta especialmente en otoño e invierno. El yacimiento es pequeño, tiene una superficie de 38,21 ha, de las cuales 37 ha están cubiertas por una costra salina de 47 cm de espesor. Como todas las sulfateras de La Pampa, en Choique la costra de cloruro y sulfato se formó sobre la capa de fangos negros (gyttias). La costra salina tiene una ley media de 90 g/l con reservas de 261.300 t de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. El depósito además presenta sulfatos de magnesio, calcio, potasio y cloruro de sodio.

La laguna de **Epecuén** es un cuerpo alargado en sentido noroeste - sureste con 18 km de longitud y un ancho de 8 km, en la parte más deprimida del sistema de lagunas de Las Encadenadas. Los componentes minerales de esta sulfatera son acumulaciones de sulfato de sodio decahidratado en el fondo de la laguna en época invernal y en los sectores de playa, por simple evaporación del soluto, eflorescencias de thenardita y halita. Los tenores salinos de las aguas son: 70,60 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 217,92 g/l NaCl, 2,64 g/l Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, y 0,41 g/l NaHCO<sub>3</sub>. De acuerdo a los valores señalados y considerando el área del cuerpo de agua en 10.000 ha, la reserva es de 14,0.10<sup>6</sup> t Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, teniendo en cuenta los fangos rojos y negros, ascendería a 25 millones de toneladas.

La **Salina Grande de Hidalgo** es uno de los cuerpos elongados de la serie La Amarga - La Ernestina dispuestos en una fosa mayor, conectados (encadenados) unos con otros. La salina es tipo reserva arriba, donde la capa temporaria de sal puede alcanzar los 10 cm de potencia, mientras que la capa permanente llega a los 12 m, presentándose por debajo de una alternancia de fangos y sales poco solubles, entre

Yacimiento	Reservas en toneladas	Producción anual (promedio 97-98) (t)	Leyes de los depósitos
Salina Grande de Hidalgo	34.700.700	s/d	99,50%
Salina Colorada Grande	439.000.000	120.000	98,00%
Salitral Negro	20.600.000	180.000	96,80%
Salina de Anzoátegui	86.000.000	100.000	99,00%
Salinas Chicas	20.000.000	200.000	91,00%
Salina Cagliero	20.000.000	90.000	95,50%
Salina del Inglés	3.000.000	Sin producción	95,40%
Laguna del Hinojo	s/d	1.000	52,00 g/l
Laguna Epecuén	14.120.000	Sin producción	60,00 g/l
Laguna Chasilauquen	800.000	6.000	51,34 g/l

las que se destacan glauberita y yeso (Cordini, 1967). Las reservas permanentes son  $34,7 \cdot 10^6$  t NaCl,  $7,28 \cdot 10^6$  t  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $0,16 \cdot 10^6$  t de cloruro de magnesio (C.F.I., 1981).

La salina **La Colorada Grande** es una depresión a 4 m bajo el nivel del mar. El piso es no uniforme, con pantanos y surgentes de agua. La zona de playa tiene propiedades tixotrópicas por lo cual la maquinaria pesada se hunde. La fuente de recarga de la laguna es por aguas subterráneas surgentes en los bordes de la cuenca. La reserva compuesta es de  $439,0 \cdot 10^6$  t NaCl,  $42,0 \cdot 10^6$  t  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $17,0 \cdot 10^6$  t de sulfato de magnesio.

La salina de **Anzoátegui o Gaviotas** tiene pobre desarrollo de playas (10 a 15 m) y el piso de la salina es firme, a excepción de los sectores donde se presentan ojos de agua. La reserva de la salina es tipo reserva arriba. El C.F.I. (1980) determina una superficie explotable de  $20 \text{ km}^2$  sobre un área de  $34 \text{ km}^2$  y estima cosechas anuales de 200.000 t a 500.000 toneladas. Las reservas de cloruro de sodio y sulfato de magnesio es de 86,27 y  $0,3 \cdot 10^6$  t, respectivamente.

La **Laguna Guatraché** está cubierta por salmuera en forma permanente, buena parte del piso es fangoso, sin que se forme una cubierta permanente de sales, precipitando sólo sulfato de sodio. La mineralogía dominante en éste cuerpo es mirabilita, como precipitado primario en el fondo de la laguna. En época estival se producen eflorescencias de thenardita y halita. Análisis de aguas madres indican contenidos de 51,4 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y 146,9 g/l NaCl. Una vez cosechada y emparvada, la sal se comercializa con 99,11% de pureza de sulfato de sodio. La producción es del orden de 1.000 t por año.

La península de Valdés, provincia de Chubut, tiene dos salinas, la **Salina Grande** y la **Salina Chica**. Las dos tienen mineralización de cloruro de sodio y sulfato de sodio. Tanto en la Salina Grande como en la Chica la mineralización de halita tiene un 80% de pureza y las reservas en conjunto alcanzan las 5,5 millones de toneladas. En lo referente a sulfato de sodio, la Salina Chica presenta la mejor mineralización con un 2,17% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y 130.500 toneladas (Brodtkorb, A., 1999a).

La salina del **Gualicho**, localizada en la provincia de Río Negro, presenta capa temporaria o capa anual de cosecha con un espesor promedio

de 7 cm y una densidad de  $1,7 \text{ kg/cm}^3$ , mientras que en la capa permanente se calculó un volumen de  $332 \text{ Mm}^3$  y una densidad media de  $1,9 \text{ kg/cm}^3$ . Las leyes promedio son 74,57% NaCl y 2,86%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . El mineral dominante es halita y la glauberita es el sulfato más común; también hay yeso subordinado en los horizontes fango – terrígenos (Brodtkorb, A., 1999b).

La salina de **Cabo Blanco**, es el mayor depósito de la provincia de Santa Cruz, ocupa una depresión de 900 hectáreas. En la parte central y este de la salina se realizaron 14 sondeos, que cortaron una capa de sal de roca con un espesor mínimo de 4,4 m; máximo de 10,0 m y espesor promedio de 8,06 metros. La densidad de la sal en niveles profundos es de  $1,94 \text{ kg/cm}^2$  y la capa cosechable tiene 93,35% NaCl y 1,83%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Los recursos medidos superan los 15 millones de toneladas (Iglesias, 2002).

Otras salinas de sulfato de sodio en el departamento Deseado, provincia de Santa Cruz son **Fátima II** y **Florentino Ameghino**. Los depósitos de sulfato de sodio están constituidos por estratos de evaporitas fósiles a las que se explota por arranque de costra y cantereados. La sulfatera **Fátima II** es una sucesión estratiforme con altos contenidos de sulfatos (mirabilita, thenardita). Los estratos se presentan en superficie con un contenido aproximado del 11%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . La producción del depósito, en el período 1964-1984, fue de 100.000 t con un promedio mensual de 700 toneladas. Se estima una reserva para 50 años de actividad minera (Bernasconi y Cangiolli, 1984). El yacimiento **Florentino Ameghino** tiene forma circular, ocupa una superficie de 30 ha pero sólo 24 ha son explotables. La ley del yacimiento es 83,38%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y 3,33 NaCl. La reserva estimada es de 465.000 t  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Angelelli, 1976).

Las provincias de Neuquén y Mendoza tienen depósitos fósiles de sal de roca y sulfato de potasio. Los depósitos de sal de roca son grandes masas lenticulares, compactas, de grano mediano a grueso, con una pureza de 97 - 98% NaCl. Los yacimientos más importantes son Huitrín (departamento Añelo), Pampa de Tril (departamento Pehuenches) y Carmelo (departamento Ñorquín).

Los depósitos de cloruro de potasio, se extienden en un área de  $4.000 \text{ km}^2$ , en el extremo sur de la provincia de Mendoza y norte de la provincia de Neuquén. Los bancos potásicos, en los

sectores de centro de cuenca, pueden ser agrupados en dos paquetes (K-1 y K-2) que alcanzan espesores de 24 m en las zonas no deformadas tectónicamente, con medias de 8 a 10 metros. Se destaca el yacimiento Potasio Río Colorado, con  $2.000.10^6$  t de reservas en la capa K - 1

En Mendoza los yacimientos más importantes de sal común y sulfato de sodio están en los distritos San Miguel y Salina del Diamante. El Distrito San Miguel se ubica cercano al límite de San Juan y San Luis. Los minerales presentes son thenardita, mirabilita, halita y en pequeñas proporciones, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos de sodio y magnesio. Dentro del Distrito, la pertenencia General San Martín tiene una ley media del 15%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y reservas por 200.000 toneladas.

La Salina del Diamante ubicada en el departamento San Rafael, tiene como zona de mayor rendimiento la parte central de la salina, presenta piso firme y capa temporaria que oscila entre 1 y 2 cm con leyes del 65,41% NaCl y 0,97%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . El depósito se explota por cosecha 3 a 4 veces por año.

Otros depósitos importantes presentes en el territorio nacional ocurren en las provincias de Córdoba, Santiago del Estero, San Juan y San Luis.

Las **Salinas Grandes** (Córdoba) se ubican en la porción noroeste de la provincia, en el límite con Santiago del Estero y Catamarca. Se considera una salina sin reservas, con formación de capas temporarias muy irregulares; los sitios de formación de costras son cambiantes año tras año. La capa temporaria tiene de 2 a 4 cm de espesor y las reservas estimadas ascienden a  $2,0.10^6$  t de cloruro de sodio. En la actualidad, las Salinas Grandes de Córdoba se consideran

un depósito subeconómico.

Otro depósito en la provincia de Córdoba es la **laguna Mar Chiquita** que presenta un contenido medio de NaCl: 60,3 g/l y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ : 13,5 g/l. Las reservas son  $361.10^6$  t NaCl y  $81.10^6$  t  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Angelelli *et al.*, 1980).

Los depósitos de sales en la provincia de Santiago del Estero se centran en la salina de Huyamampa. La salina se explotaba por bombeo de agua mineralizada por medio de 6 pozos. La salmuera era vertida en piletones y durante el verano se producía la cosecha de una costra salina, cloruro y sulfato de sodio, de 3 a 5 cm de espesor. Las napas mineralizadas se encuentran a una profundidad de 30 a 40 m, con concentraciones de NaCl 10,58 - 11,35 g/l y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  8,53 y 8,18 gramos por litro.

A partir de 1944, en la provincia de San Juan, se explota sulfato de sodio (thenardita) en la localidad de Cerro Blanco. El depósito está formado por evaporitas lacustres fósiles, ubicados en la vertiente occidental de la Precordillera y la edad de la mineralización es Terciaria. El horizonte de thenardita tiene un espesor de 70 - 75 cm, con alternancia de yeso y arcillas. La ley es 86,86%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y el sistema de explotación utilizado es el de galerías y cantera.

La **salina del Bebedero**, en la provincia de San Luis, presenta una superficie total de 7500 ha de las cuales 3500 ha, en la zona central del depósito, tienen la mejor calidad. El cloruro de sodio tiene una ley media del 98% y la reserva extraíble por cosecha ascendería a 39 millones de toneladas. En el periodo 1945 - 1999 se produjeron 7.500.000 toneladas de sal común (Beninato, 1999)



**Fotografía 5:** Salina del Bebedero, San Luis. A la izquierda de la foto se puede observar la parva de sal para su purificación.

## 1.6. SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN

### 1.6.1. EXPLOTACIÓN DE SALES DE LITIO

En los últimos años, la Argentina se ha transformado en uno de los principales productores de litio a nivel mundial. Éste se obtiene a partir de salmueras mineralizadas en el salar del Hombre Muerto, en la provincia de Catamarca. La empresa FMC desarrolló el proyecto Fénix. La explotación del yacimiento se realiza a través de 6 pozos con bombas sumergibles. La salmuera es bombeada a la superficie y transportada por un mineraloducto de 13 km de longitud a la planta de procesamiento.

### 1.6.2. EXPLOTACIÓN DE CLORURO DE POTASIO

Cuando el cloruro de potasio se encuentra junto con el cloruro de sodio (silvinita) y puede considerarse como una impureza de este último, presente en poca o mucha cantidad, el sistema de explotación será el adecuado para la extracción del cloruro de sodio, según cualquiera de los métodos que se verán en el ítem posterior. La recuperación del cloruro de potasio se realiza en las etapas posteriores del procesamiento (ver capítulo 2, ítems 2.2.5. Separación de NaCl – KCl a partir de soluciones salinas del “solution mining” y 2.2.6. Obtención de KCl por flotación de silvinita).

Habitualmente el cloruro de potasio no se recupera a partir de aguas con altos contenidos por el sistema de cristalización en piletas o en los salares. Cuando el cloruro de potasio se encuentra en depósitos de contenido mayoritario de éste, se los explota como canteras, minería subterránea o minado por disolución. Tal es el caso de la mina de silvinita Potasio Río Colorado, en el límite provincial entre Mendoza y Neuquén, donde la silvinita se encuentra interstratificadas con sal de roca, a profundidades comprendidas entre los 850 y 1200 m. El yacimiento puede ser explotado de dos maneras: los sectores donde la mineralización se ubica por encima de los 850 m, por métodos tradicionales de minería subterránea y sectores por debajo de ésta, entre los 1.200 y 2.000 m donde se puede realizar la extracción por disolución. En el yacimiento existe una

explotación de tipo experimental mediante de extracción por disolución y precipitación selectiva en la superficie (Balod, 1999).

El minado por disolución o “solution mining” se desarrolló para la recuperación de sales de depósitos subterráneos que se encuentran por debajo de los niveles que pueden explotarse económicamente por los métodos de la minería subterránea tradicional, permitiendo recuperar por ejemplo sales que se encuentran entre 800 y 1200 m de profundidad con una gran capacidad de producción. Si bien es un proceso de recuperación más lento presenta un bajo costo operativo por tonelada de sal recuperada, pero tiene la desventaja de que se contamina el medio ambiente.

El fundamento del método es la inyección de agua con temperatura cercana a los 60°C, en un pozo que atraviese la capa mineralizada, para provocar la disolución de la sal y luego recuperar la salmuera formada, utilizando algún producto derivado del petróleo, insoluble en agua como “fluido aislante”. Dicho fluido actúa sellando el techo de la cámara evitando disoluciones no controladas en esa zona y el hundimiento del mismo. Durante la disolución, se va generando en el subsuelo una caverna que crece hacia arriba en condiciones controladas de manera que se asegure una determinada concentración en la salmuera. La misma está regulada por la cinética de disolución de la sal en la pared de la caverna y por la difusión del soluto en el seno de la solución.

Una parte del equipo de explotación es el “equipo de superficie”, compuesto básicamente por una torre de perforación, bombas y depósitos para el agua de inyección, la salmuera extraída y el fluido aislante. La otra parte se encuentra bajo tierra, es el “equipamiento del pozo”, el cual está compuesto en las tecnologías clásicas por tres columnas de tubos concéntricas: una exterior (de anclaje) que se encuentra empotrada en el macizo salino por cementación desde la superficie, otra intermedia (de explotación) y finalmente la columna central (de extracción). Estas dos últimas columnas son móviles.

El fluido aislante es transportado a través del espacio anular entre la columna de anclaje y la de explotación, mientras que el agua es inyectada por el espacio anular comprendido entre la columna de explotación y la de extracción, a nivel del techo de la cámara de disolución. A través

de la columna central se extrae la salmuera producto de la disolución.

reducida la zona activa de disolución.

Las desventajas de las tecnologías clásicas son:

e) Ocurren derrames de salmuera y fluido aislante en el terreno con lo que aguas superficiales y acuíferos resultan contaminados.

a) Cuando el fluido aislante no se ubica en el techo de la cámara, se producen disoluciones caóticas quedando los pozos fuera de producción de manera prematura.

Según Szarka (1992), se realizaron estudios de laboratorio, con columnas de explotación móviles y cementadas, que permitieron introducir mejoras en los sistemas clásicos de disolución, utilizando celdas de convección de superficie libre. Se encontró que en ausencia de fluido aislante, cuando la columna es móvil, las disoluciones en sentido ascendente avanzan más rápidamente que con columna cementada. El fenómeno de disolución tiene lugar debido al espacio anular exterior entre el pozo y la columna de explotación que juega un papel funcional y se utiliza para la circulación de fluido aislante (en caso de que éste se usara). Se producen disoluciones no controladas, a diferencia del caso de la columna de explotación cementada en la cual el espacio anular exterior está obturado por la cementación.

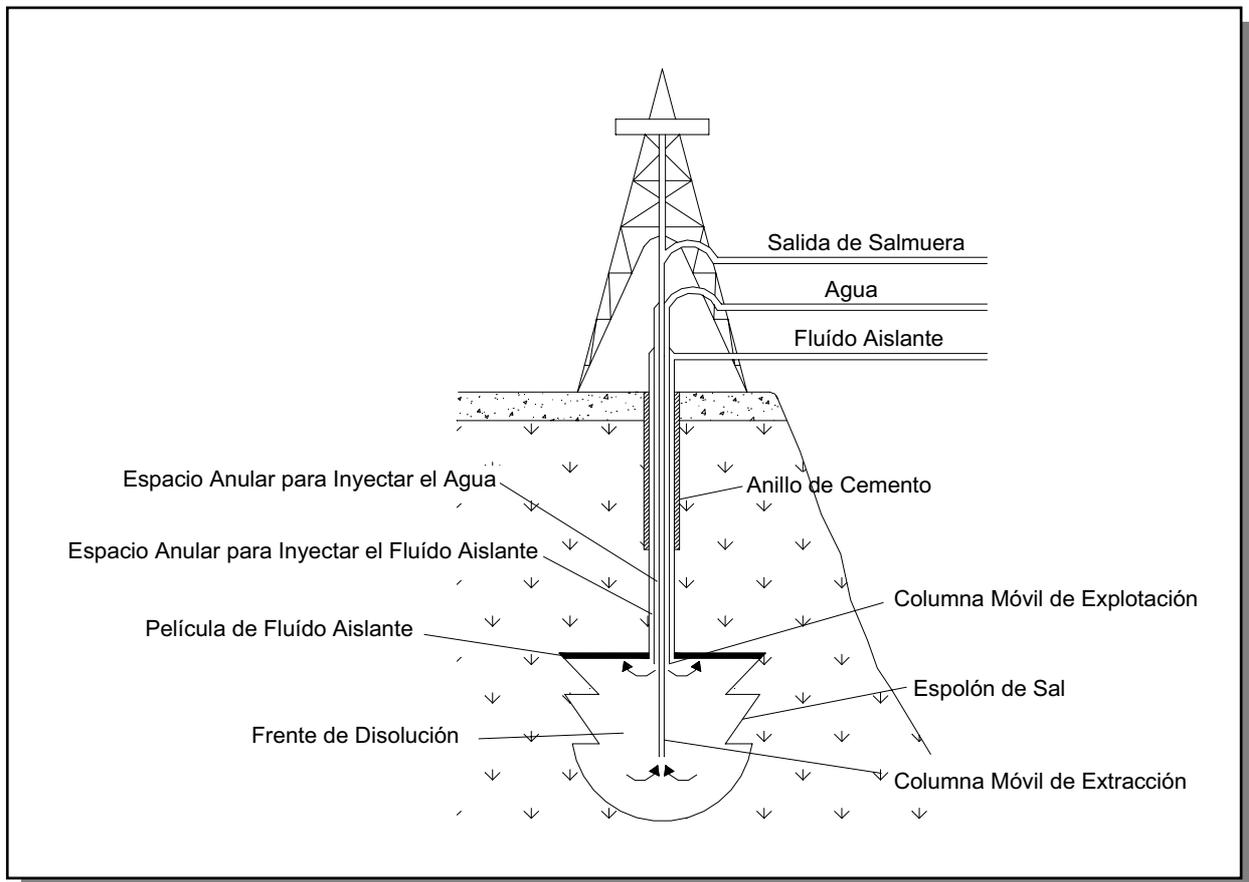
b) El pozo se deforma por la presión litostática provocando el acuñamiento de las columnas de explotación. Resultan pozos con formas irregulares, apófisis y espolones de sal (que representan la pérdida de mineral y retenciones para el fluido aislante).

c) Se producen pérdidas de fluido aislante por emulsiónamiento al inyectar el agua al nivel del techo sobre la película de este, lo que lleva a aumentar su consumo.

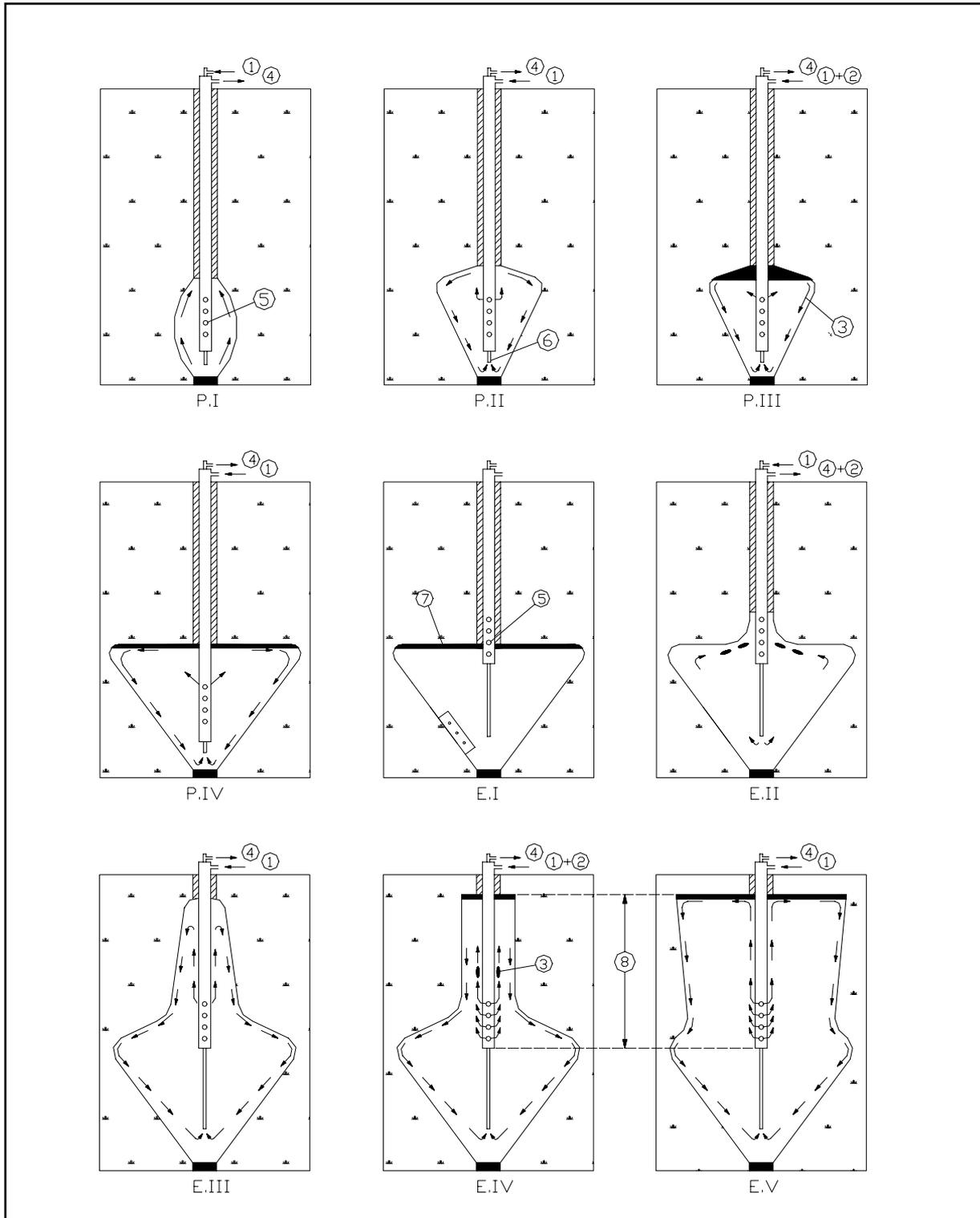
d) Es difícil aplicar esta tecnología a grandes profundidades (más de 1200 metros) y su capacidad de producción es baja al ser

Con la inyección intermedia de agua (esto

### Torre de perforación para realizar extracción por disolución



### Secuencia de disolución para extracción de sales a profundidad



1-Agua; 2-Fluido aislante; 3-Película de fluido aislante; 4-Salmuera; 5-Tramo perforado de la columna de explotación; 6-Columna de extracción; 7-Película de fluido aislante; 8-Inyección intermedia

PI-Preinicio con inyección en la solera; PII-Inicio con inyección en el techo; PIII-Introducción de la película de fluido aislante por el circuito de agua; PIV-Finalización de la cámara de inicio de la explotación hasta 0,8 m de diámetro; EI-Separación del antiguo tramo perforado; perforación de un nuevo tramo; EII-Liberación por disolución del tramo perforado; EIII-Elevación del techo real hasta la altura del nivel de explotación (aproximadamente 50 m); EIV-Disolución por dosificación del fluido aislante; EV-Finalización del tramo de explotación hasta los diámetros proyectados (30-80 m)

Para cada nuevo tramo se repite el ciclo EI-EV

Preparación de la explotación: fases PI-PIV

Explotación propiamente dicha: fases EI-EV

es debajo del techo de la cámara), se pudo comprobar que:

- 1) aumenta la zona activa de disolución
- 2) los caudales de salmuera se triplican
- 3) se obtienen formas de las cámaras más regulares
- 4) los movimientos convectivos y turbulencias provocan disoluciones uniformes en toda la zona activa
- 5) las pérdidas de fluido aislante por emulsionamiento bajan porque la energía de las turbulencias se disipa entre el nivel de inyección y el techo de la cámara (donde se encuentra el fluido aislante)

La implementación industrial de las modificaciones estudiadas en laboratorio en los sistemas clásicos, originaron las tecnologías modernas de explotación que se basan en la utilización de columnas de explotación cementadas con inyección intermedia de agua.

El equipamiento de superficie es igual al de métodos clásicos, pero en el equipo de pozo se simplifica la columna de anclaje y la de explotación en una única columna "técnica". La columna de extracción es móvil.

El agua se inyecta sin presión por el espacio anular entre la columna técnica y de extracción, entre el techo y el suelo de la cámara, a través de perforaciones en la columna de explotación o por la extremidad cortada de ésta. El fluido aislante se introduce en forma de pulsos por el circuito de agua.

Las ventajas de las tecnologías modernas son:

- a) reducción de la probabilidad de hundimiento del pozo y de contaminación con fluido aislante.
- b) mejora de la forma de las cámaras (forma cuasicilíndrica).
- c) crecimiento del coeficiente de extracción al eliminar los espolones de sal.
- d) posibilidad de explotación a mayor profundidad.
- e) recuperación de las reservas inmovilizadas detrás de la columna de anclaje de los sondeos de construcción clásica.
- f) los sondeos requieren menos maniobras, presentan una continuidad en su funcionamiento

y pueden aplicarse a yacimientos con alto contenido de materiales insolubles.

g) los caudales de producción son un 200% mayores y el consumo de fluido aislante es un 30% menor (en situaciones extremas se puede trabajar sin fluido aislante, pero la cámara no podrá superar ciertas dimensiones)

h) previenen filtraciones de solución salina y fluido aislante en el terreno, evitando la contaminación

### 1.6.3. EXPLOTACIÓN DE CLORURO DE SODIO

Los depósitos de sales, como se menciona en nomenclatura y tipo de depósito tienen diferencias en su origen, mineralogía, ubicación geográfica y temporal, por ende, dependiendo de las características propias del yacimiento se aplicará un sistema de explotación apropiado. Los depósitos de sales actuales (superficiales) se explotan por cosecha, los fósiles por canteras o minado subterráneo y los que yacen en estratos o salmueras mineralizadas a profundidad se utilizan los métodos de disolución y bombeo.

En el país, el sistema de explotación de **cosecha**. Se aplica tanto a las costras de sales como a salmueras, que pueden provenir de salares, salinas, lagos, lagunas, agua de mar ó vertientes naturales.

Las operaciones propias de la explotación por cosecha, para cloruro de sodio, son:

- *Corte de la capa de sal*: Se utiliza un rastrón y un tractor; el rastrón es un equipo que consta de dos cuchillas planas dispuestas en V, regulables en altura, esto determina la



**Fotografía 5:** Corte de la capa de sal y formación de cordones

penetración en la capa de sal (costra temporaria). El rastrón al ser arrastrado por el tractor separa la capa superficial de sal del piso del salar o laguna, formando un cordón de sal. En algunos salares se utilizan máquinas cortadoras a discos. La cosecha comienza cuando la salina tiene todavía unos cinco centímetros de agua madre, porque la costra temporaria está menos compactada y puede ser disgregada más fácilmente por las máquinas cortadoras; además, el agua madre residual “lava” la sal, es decir arrastra parte del material terroso y del sulfato de sodio aún en solución o comenzando a depositarse en cristales pequeños (Cordini, 1967).

- *Agrupado de cordones*: Se utiliza una mariposa y un tractor; la mariposa es un instrumento en forma de V traccionado por el tractor, agrupa 3 o 4 cordones del rastrón formando uno nuevo, de mayor tamaño. Los cordones luego son trasladados a las playas de estacionamiento.

- *Emparejado del piso*: Concluida la cosecha, el piso del salar deteriorado o desnivelado por las máquinas es emparejado. Si



**Fotografía 6:** Vista panorámica de los cordones.



**Fotografía 7:** Cosecha de sal a partir de los cordones

el piso no está nivelado, la precipitación de sales que formarán la nueva costra temporaria comienza en las concavidades del mismo y adquiere allí mayor espesor. El resultado es una superficie con áreas finas y por lo tanto más elásticas. Los limos de la capa permanente fermentan produciendo gases que tenderán a salir por las áreas más finas, arrastrando partículas de limos, por lo que la calidad química de la sal desmejora (Cordini, 1967).

- *Estacionamiento de la parva o purga*: la sal cosechada tiene gran cantidad de impurezas, que en parte se reducen con un estacionamiento prolongado. Este fenómeno se denomina “purga” y puede considerarse como una “etapa de purificación natural”. Los procesos de purificación que se producen durante el estacionamiento se detallan en el Capítulo 2 (ver 2.X.X. purificación de sal).

Otro método de cosecha es el de piletas o unidades de cristalización, muy común en el noroeste argentino. Las piletas son pozos construidos en el salar, donde se acumulan las aguas madres (salmueras ricas en iones), que



**Fotografía 8:** Descarga de sal en la parva



**Fotografía 9:** Vista general de la parva

evaporadas dan lugar a la recristalización de sal de alta pureza (>90% de NaCl). Las dimensiones de las piletas son variables, frecuentemente oscilan entre 3 a 6 m de largo, 2 a 3 de ancho y 30 a 50 cm de profundidad. En general están alineadas en filas paralelas, separadas 2 a 4 m entre sí. El nivel de llenado es dependiente de las condiciones climáticas (cantidad de precipitaciones, ascenso del nivel freático etc.), en épocas normales se pueden obtener hasta dos cosechas anuales. La explotación concluye con el descarte de los primeros 10 cm, que normalmente contiene mayores impurezas y mediante pico y pala se extraen los 30 a 40 cm restantes o capa inferior de sal cristalizada.

Los métodos de explotación por cosecha y piletas son económicos pero están supeditados a las condiciones climáticas predominantes en la región. En épocas de alta densidad de precipitaciones pueden ocurrir dos cosas: imposibilidad de cosechar (región pampeana), o por el contrario, obtener más de dos cosechas anuales (NOA).

En el salar de Pastos Grandes, en la provincia de Salta, la explotación de sal común consiste en el raspado en forma mecanizada de la costra superficial, rugosa y friable. En el salar hay más de 1000 piletas de recristalización, de las cuales se obtienen hasta dos cosechas anuales. Este tipo de explotación ha llegado a producir alrededor de 100 t/día, comercializable como sal industrial.

Los salares donde la capa de sales presenta un espesor considerable se realiza una modalidad de explotación conocida como “panes”. Se marcan en la capa con un hacha, bloques de 40 a 50 cm de lado, luego se introduce una barreta a golpe de combo (mazo de hierro con mango largo), se palanquea y se levantan los bloques. Este tipo de explotación manual obtiene sales de baja calidad debido en gran medida a la presencia de impurezas.

Los depósitos de sal de roca pueden explotarse por frente de cantera con mayor o menor grado de automatización. Este tipo de explotación se realiza en la mina Ranquiles en Mendoza y en la mina Carmelo en Neuquén. También en la región del NOA, se explotan por el método de cantera dos frentes en la mina Amelia, cercana a la localidad de Tolar Grande (Mendez *et al.*, 1979, Schalamuk *et al.*, 1983).

Los depósitos de sal subterráneos se explotan por el método de cámara y pilares (*room*

*and pillar*). En este tipo de explotación, se deja sin extraer el 40 al 60% de material debido a que conforman los pilares. Este método es utilizado para extraer la sal de roca de profundidades entre los 200 a 600 metros.

La explotación de cloruro de sodio de bancos evaporíticos y/o salmueras subterráneas consiste en la inyección de agua a elevada temperatura o vapor. El solvente disuelve la mineralización formando una salmuera que es bombeada a la superficie. En general, la explotación por disolución utiliza el sistema de inyección por anulación consistente en dos tubos concéntricos, por uno se introduce el solvente y por el otro se recupera la salmuera. La explotación de cloruro de sodio en El Timbó, provincia de Tucumán, se realiza por este sistema, extrayéndose la mineralización en salmueras cloradas-sulfatadas. La mineralización saliniza las napas de agua que la atraviesan. Los bancos de sal de mayor interés tienen 4 a 5 m de espesor y están ubicados a 42-50 m de profundidad (Schalamuk *et al.*, 1983). La explotación se realiza por medio de pozos de producción donde se introduce una electrobomba sumergible o se inyecta aire comprimido por un pozo y por una segunda tubería se extrae la salmuera con densidad media en boca de pozo de 1190-1200 g/l (Bortolotti, 1999).

#### 1.6.4. EXPLOTACIÓN DE SULFATO DE SODIO

El sulfato de sodio presenta diferencias en la metodología de explotación ya que se aprovechan los cambios de solubilidad que presentan sus distintas formas cristalinas con la temperatura. Es así que para la explotación de la sal decahidratada (mirabilita o sal de Glauber) se aprovechan los meses de invierno (mayo a agosto) y, en especial los días donde las temperaturas desciende por debajo de los 0°C para cosechar esta sal. La cosecha se realiza por succión de los cristales de mirabilita del fondo de la lagunas y en otro caso por bombeo de las salmueras subterráneas (laguna Hinojo) o superficiales (laguna Epecuén). Las salmueras y los cristales succionados se envían a plantas de tratamiento donde dependiendo de la metodología utilizada (ver capítulo 2: Procesamiento) se recupera el sulfato de sodio decahidratado o anhidro.

PROVINCIA DE BUENOS AIRES					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Salina del Inglés</b>	Partido de Patagones	40° 42' S 62° 26' O	Halita	El depósito salino tiene niveles halíticos, cuya potencia es de 8 - 10 cm, los primeros 2 cm son la capa temporal con un 96% NaCl. Las reservas alcanzan los 5 Mt y no se encuentra en producción.	Angelelli <i>et al.</i> , 1976
<b>Salina Las Piedras o Salina de Cagliero</b>	Al noroeste de Cardenal Cagliero	40° 34' S 62° 38' O	Halita	Los sedimentos que circundan la salina están integrados por limos y arenas salinizadas. La salina es reserva abajo, la capa temporal se apoya sobre un nivel de limos arenosos de color oscuro, con alto contenido de materia orgánica. La capa infrayacente es de materiales clásticos con cristales de yeso selenítico y thenardita. La halita presenta una pureza que oscila entre 95 a 98% y aumenta en los niveles superiores. Sobre la base de un espesor promedio de 3 cm y una superficie de 1.700 ha, la reserva temporal es de 741.500 t, más 500.000 t de salmueras, con una concentración promedio de 270 gramos por litro.	Cordini, 1967
<b>Salinas Chicas (Las Barracas, Aurora)</b>	Partido de Villarino, al Oeste de Bahía Blanca.	38° 44' S 62° 59' O	Halita, sulfato de sodio, magnesio y calcio	El depósito presenta sedimentos arenosos, limosos y sedimentos clásticos de hasta 20% de materia orgánica y sales. El cuerpo salino está integrado por: agua madre, costra temporal y reserva permanente. La reserva permanente tiene un espesor de 1 a 4 m, con una reserva de NaCl de 20 Mt y un rendimiento anual de 200.000 t, con una ley del 90%.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1999 Angelelli <i>et al.</i> , 1976
<b>Chasicó</b>	A 12 km de la estación Gral. Levalle (F.C.N.G. Roca)	38° 38' S 63° 01' O	Sulfato de sodio y halita	Contenido salino total 155,07 g/l, contenido de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 48,50 g/l y contenido de NaCl 91,57 g/l. Chasicó no se aprovecha como productora de sulfato a pesar de poseer grandes cantidades. Las sales disueltas alcanzan los 5 Mt NaCl y 3 Mt de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	Angelelli <i>et al.</i> , 1976 Cordini, 1967
<b>Choique (La Lidia, La tigre y Nueva Roma)</b>	A 16 km de la estación Nueva Roma (F.C.N.G. Roca)	38° 40' S 62° 47' O	Sulfato de sodio, calcio y potasio	Los bordes del yacimiento están recubiertos por una costra calcárea. El depósito salino se produce por el aporte de sales en aguas subterráneas. La cuenca cubre 38,21 ha de las cuales 37 están recubiertas por una costra salina de 47 cm de espesor. Se explota por sulfato de sodio en una concentración mayor al 89,5 g/l. Las reservas alcanzan los 550 t entre sulfato sólido y salmuera.	Angelelli <i>et al.</i> , 1976 Cordini, 1967
<b>El Hinojo (Haydeé, María, Santa Anita)</b>	Partido de Trenque Lauquen	35° 59' S 65° 33' O	Sulfato de sodio	Los niveles productivos están a 8 - 20 metros de profundidad. El área mineralizada ocupa 21.000 ha. Las leyes de las salmueras de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> son de 94 - 96%. La salmuera alojada en el acuífero Puelche es bombeada a superficie.	Angelelli <i>et al.</i> , 1976 Cordini, 1950
<b>Lago Epecuén</b>	Partido de Adolfo Alsina	37° 11' S 62° 47' O	Sulfato de sodio, eflorescencias de halita y thenardita	Las aguas de la laguna presentan un contenido de 70 - 60 g/l de sulfato de sodio anhidro y 218 g/l de NaCl. Las reservas son de 14 Mt de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y 43.5 mt de NaCl disueltos. No está en explotación debido a la dilución del soluto por inundaciones.	Cordini, 1967 Schalamuk <i>et al.</i> , 1999
<b>Laguna de Chasilauquer</b>	Partido de Adolfo Alsina	37° 16' S 63° 10' O	Mirabilita, thenardita, halita	La costra salina está compuesta por mirabilita de 4 cm de espesor, la thenardita se encuentra en capas de pocos milímetros. La halita es estacional y se presenta como rosetas o eflorescencias. La producción actual es de 5.000 a 6.000 t/año.	Angelelli <i>et al.</i> , 1976
<b>La Espuma</b>	Partido de Patagones	40° 40' S 63° 16' O	Halita	Pequeño cuerpo de 1.500 m de largo y 800 m de ancho.	Angelelli <i>et al.</i> , 1976

PROVINCIA DE CATAMARCA					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Salar de Antofalla</b>	Al oeste de la loc. Antofagasta de la Sierra	25° 47' S 67° 26' O	Halita	Formado por halita de grano grueso a fino, masiva, con impurezas de arcillas. Basado en su desarrollo regional, se estima una potencia mínima de 500 m de sal en la zona central.	Alonso <i>et al.</i> , 1984
<b>Fenix</b>	Salar del Hombre Muerto	25° 19' S 67° 06' O	Salmueras con Li y K	El yacimiento tiene una concentración de litio muy uniforme en toda su extensión. Las salmueras presentan 700 a 800 ppm de Li y 7.000 a 8.000 ppm de K, con reservas de 648 Mm <sup>3</sup> . Las reservas conservativas alcanzan los 90 años. La mineralización se extrae por bombeo de 6 pozos.	Alonso, 1999b, Panorama Minero, 1992
<b>20 de Mayo, Angel, China, Aurelio, Despegue, Don Carlos, Maria I a VX, Nelly I a XV, Olga I a XV, Silvia I a XV.</b>	Acazoque	25° 23' S 67° 10' O	Halita, sulfato de sodio, ulexita, litio	La vega presenta una delgada costra salina, por debajo yacen arcillas pardo claras.	Alonso, 1999b.
<b>Alberto, 20 de Febrero, de Febrero, Barbara I a XIV, Barreal y II, Boracita Cata Cuba, Carnalita</b>	Salar del Hombre Muerto	25° 19' S 67° 06' O	Halita, Li, K.	El salar presenta una costra salina de hasta 1 m de espesor. Las salmueras presentan un elevado contenido de litio y de potasio.	Alonso, 1999 b, Schalamuk <i>et al.</i> , 1983.
<b>Cazadero Grande</b>	Valle de Cazadera Grande	27° 19' S 68° 09' O	Halita	Depresión elongada de 25 km <sup>2</sup> , donde se presenta eflorescencias salinas blanquecinas de hasta 5 cm, en limos y arenas.	Del Blanco <i>et al.</i> , 2001
<b>Las Lozas</b>	Valle de Cazadera Grande	27° 19' S 68° 09' O	Halita	Eflorescencias que ocupan una superficie de 2 - 3 km <sup>2</sup> .	Del Blanco <i>et al.</i> , 2001
<b>Cueros de Purulla</b>	Laguna Cueros de Purulla	/d	Halita, thenardita, bloedita y trona	La laguna tiene un diseño alargado, en sentido NE - SO. Presenta una superficie de 6 km <sup>2</sup> . Los niveles de sal tienen 10 cm de espesor, encontrándose por debajo del fango salinizado. Las salmueras presentan un neto carácter carbonatico - bicarbonatico.	Del Blanco <i>et al.</i> , 2001
<b>Salina Incahuasi</b>	Salina Incahuasi	/d	Halita	La salina yace en una depresión alargada, en sentido N - S y posee una superficie de 50 km <sup>2</sup> . Es un salar terroso con una costra salina de 10 cm de espesor, por debajo ocurren 20 - 30 cm de arenas y limos salinizados.	Del Blanco <i>et al.</i> , 2001

PROVINCIA DEL CHUBUT					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Salinas Chicas, Dalma, Brava Copayapu, Lucrecia.</b>	Península de Valdés	22° 39' S 63° 51' O	Halita, sulfato de sodio	De forma alargada. En la base de la capa permanente existe un horizonte de glauberita de 0,20 a 0,90 m de espesor, representados por agregados de cristales asociados a halita. Ley: 58,82% NaCl y 8,00% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . Reservas de la capa permanente: 8,8 millones de toneladas.	Brodtkorb, A., 1999a
<b>Salinas Grandes, Celestina I y II, Bariloche.</b>	Península de Valdés	22° 40' S 64° 00' O	Halita, sulfato de sodio	De contorno circular. El espesor medio es de 0,65 m con una ley: 77,30% NaCl y 0,30% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . Las reservas de la capa permanente son de 58,2 Mt y la temporaria es de 1,1 Mt.	Brodtkorb, A., 1999b

## PROVINCIA DE CÓRDOBA

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Córdoba Salinas, Cordobesa, El Porvenir, Patria, Pintoresca, San Antonio 2°, Sol de Mayo, Vigo</b>	Salinas Grandes	30° 03' S 64° 42' O	Halita	La salina es sin reserva, con formación de capas temporarias muy irregulares; La costra se forma en diferentes lugares año a año. La capa temporaria alcanza hasta los 6 cm de potencia. La salina se encuentra cubierta por vegetación halófila. Las reservas estimadas alcanzan los 2,00 Mt de NaCl .	Cordini, 1967, Angelelli <i>et al.</i> , 1980
<b>San José</b>	Salinas Grandes	30° 03' S 64° 42' O	Halita, sulfato de sodio	Se emplaza en el sector oriental de la depresión y se pueden diferenciar tres zonas: 1- sin eflorescencia salinas o muy escasa en las partes altas. 2- con cubierta de eflorescencia salina y 3- depósitos de sal en las partes más deprimidas. La costra cosechable varía de espesor conforme con las condiciones climáticas, en promedio oscila de 2 a 4 cm. La ley promedio es 263,20 g/l de NaCl y 21.67 g/l de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	Angelelli <i>et al.</i> , 1980

## PROVINCIA DE JUJUY

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Aconcagua, Salinas Grandes, Adrián, Angélica, Cirus, Conrado, Chañi, Silvia, Sócrates, Saturno</b>	Salinas Grandes	23° 36' S 65° 52' O	Halita	La cuenca contiene sedimentos pelíticos, con abundancia de arcillas ,limos y arenas finas. La explotación se realiza por piletas y cosecha. Se registran unas 400 piletas. La explotación rudimentaria arroja 900 t mensuales. La sal se comercializa como sal industrial	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
<b>Jama</b>	Salar de Jama	24° 32' S 67° 56' O	Halita,	Banco de sulfato de sodio presente en un área de 300 por 200m, con una potencia estimada de 0,50 metros.	Argarañaz, 1999

## PROVINCIA DE LA PAMPA

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Don Enrique, Don Domingo, Don Nicolás, Huentenao</b>	Huentenao	37° 29' S 66° 50' O	Halita	Salmueras en sedimentos	Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>La Amarga o de Cura - Có</b>	Dep Guatraché	38° 12' S 66° 11' O	Halita, silvita y sulfato de sodio	No se encuentra en explotación, debido a la falta de piso. La costra temporaria alcanzaría unos pocos cm, por debajo material fangoso negro, rico en NaCl. En áreas del sector sudoriental se depositó Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Angelelli <i>et al.</i> , 1976
<b>Calefufu, Constitución, Cooperación, Esperanza, General Roca, Pampa Nueva</b>	Salina Colorada Chica o Laguna Larga	38° 23' S 63° 25' O	Halita	Se explota la zona central por poseer una playa extensa poco productiva. El espesor de la capa temporaria alcanza los 3 cm, de los cuales 2 son recuperables. El total de la superficie de la salina puede rendir cosechas anuales de 90.000 toneladas.	Godeas <i>et al.</i> , 1999, Cordini, 1967.

PROVINCIA DE LA PAMPA					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Amistad, Chil, Daniel, Don Ramiro, El pampero, General San Martín I y II</b>	Salina Colorada Grande, a suroeste de la localidad de San Martín	38° 17 S 63° 44 O	Halita, sulfato de sodio	Los depósitos de la salina están formados por una capa temporaria, explotable por cosecha, de espesor variable, de pocos centímetros, y una capa permanente de más de 60 cm de espesor. Esta última está constituida por una alternancia de capas de cloruro de sodio y fango negro. La zona de playa está compuesta por fangos salinos ricos en materia orgánica con cristales de yeso, que compone entre el 50 y el 80% del sedimento. La reserva compuesta calculada es de 439 Mt de NaCl y 59 Mt de sulfato de sodio y magnesio.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1999
<b>Martita, Santa María</b>	Salinas de Callaqueo	38° 34 S 63° 30 O	Halita	Cuerpo salino de amplias dimensiones pero presenta numerosos ojos de agua. La reserva yace hasta los 0,91 m de profundidad.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Cordini, 1967
<b>Ernestina, Utracán</b>	Laguna La Ernestina	37° 17 S 64° 36 O	Halita y sulfato de sodio	Está constituido por una costra de 7 a 3 cm de espesor. Ley: 1,3% NaCl y 86,2% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Cordini, 1967
<b>El Pioner</b>	Dep Hucal	37° 57 S 63° 36 O	Sulfato de sodio	El sulfato de sodio se presenta en planchas de pocos cm de espesor.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Cordini, 1967
<b>Salinas Grandes</b>	Salinas Grandes de Anzoategui o Gaviotas. Departamento Caleu Caleu	38° 12 S 63° 50 O	Halita, sulfato de magnesio	Salina de 12 km de longitud por 2,5 km de ancho. Afloran la formación Río Negro, compuesta por areniscas gris azuladas con intercalaciones de limo - arcillas (F Los Salitrales). La reserva de la salina es tipo reserva arriba. Se estiman cosechas anuales de 200.000 a 500.000 t, con reservas de 86,27 Mt de NaCl y 0,3 Mt de sulfato de magnesio.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1999 C.F.I., 1981
<b>San Carlos, San Jacinto, San Pedro</b>	Salinas Grandes de Hidalgo, Dep. de Atrouco	38° 04 S 63° 35 O	Halita	Depresión elongada que ocupa una superficie de 3.900 ha. Constituye un tipo de depósito con reserva arriba, la capa temporaria de sal alcanza los 10 cm de potencia, mientras que la capa permanente llega a los 12 m, yacen por debajo fangos y sales poco solubles (yeso y glauberita). Las aguas madres alcanzan una profundidad de 30 cm y tienen un contenido total de 2.8 Mt de NaCl, con una reserva permanente de 35 millones de toneladas.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1999
<b>Alba, Anita II, Auca, Bahía, Belle, Carina, Concepción, Curaca, Delia, Don Tomás, Esperanza, Famatina, Fina II, Nelly, Palau, Palmar, Pocha, Salitral Negro y otras</b>	Salitral Negro, al norte de la ciudad de Río Colorado	38° 10 S 65° 44 O	Halita	Salina de forma ovoidal de 10 km por 2,5 km de ancho. La capa temporaria de sal alcanza hasta los 6 cm, la capa permanente tiene una potencia de 1,10 m, por debajo de la cual se presentan una serie de fangos oscuros, con intercalaciones de yeso. Las reservas permanentes alcanzan un total de 27,5 Mt de halita. La producción total anual es de 180.000 t, la cual ha ido incrementándose en los últimos años.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Schalamuk <i>et al.</i> , 1999
<b>Salinas Mari Manuel</b>	Dep Guatraché	s/d	Halita	Depósito con extensa playa y salitral. Eflorescencias que no constituyen capa de sal. Carece de piso firme.	C.F.I., 1981

PROVINCIA DE LA PAMPA					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Delia Alicia, El Molino, Esperanza, Laguna Grande, La Marta, La Susana, Nahuel, Novik Insaisti</b>	Laguna Huantraché, localidad de Guatraché	37° 45 S 63° 33 O	Sulfato de sodio y halita	La laguna permanece cubierta por una salmuera donde solo precipita la mirabilita. Análisis de las aguas madres indican contenidos de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> de 51,4 g/l y de 147 g/l de NaCl. El sulfato se comercializa con un 99,11% de pureza y la producción es de 1.000 t/año	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Cordini, 1967 C.F.I., 1981
<b>Gran Salitral</b>	Dep Limay Mahuida Puelén	s/d	Halita, sulfato de magnesio y sodio	El depósito cuenta con 428 km <sup>2</sup> de superficie donde 28 km <sup>2</sup> son explotables. El relleno de la cuenca es limo de 0,9 m de espesor. La costra temporal de la sal se apoya sobre limo flojo que imposibilita la extracción por cosecha. Con un volumen de 1.700.000 m <sup>3</sup> se alcanzaría una cosecha teórica de 500.000 toneladas.	C.F.I., 1981
<b>Laguna de San Marcos</b>	Dep Utracán	s/d	Halita y sulfato de sodio	No presenta piso y en el verano no se seca. Nunca fue explotada.	C.F.I., 1981
<b>Salina Máximo</b>	Dep Cura - Có	s/d	Halita	Secuencia de sales y capas de fangos, hasta 1m de espesor. La salina presenta piso firme sobre el cuerpo de sales y fangos negros de aprox. 1 m de espesor.	C.F.I., 1981
<b>Laguna Larga</b>	Dep Caleu - Caleu	s/d	Halita, sulfatos, abundante astracanita en la base	Laguna rodeada de amplias playas de 100 m a 150 m de ancho que pasan a enormes salitrales. El sector central y SE es explotable, con piso bueno. Las reservas teóricas alcanzan los 3 a 7 millones de toneladas,	C.F.I., 1981
<b>La central</b>	Dep Lihuel Calel	s/d	Halita, sulfato de sodio, calcio y magnesio	El depósito presenta la falta de piso y entre el cuerpo salino y el espejo de agua se interponen fangos arcillosos de unos 60 centímetros.	C.F.I., 1981
<b>La salitrosa</b>	Dep Hucal	s/d	Sulfato de sodio	El depósito carece de piso. En 1974 la costra salina era de 5 a 8 cm, recubierta por una segunda capa de 0,5 a 1 cm de sulfato poco consolidado.	C.F.I., 1981
<b>El Progreso, Villa Alba</b>	Villa Alba	38° 03 S 63° 38 O	Sulfato de sodio	No se poseen datos.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Cordini, 1967

PROVINCIA DE LA RIOJA					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Chipi Chipi, La Mendocini, Las Toscas, Pampa de Salinas</b>	Pampa de Salinas	31° 53 S 66° 47 O	Halita	El depósito está formado por una costra salina de 3 a 5 mm, el material subyacente son arenas finas y arcillas rojizas a castaño claras. NaCl: 81,49% y Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 4,57%.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Marcos, O. R., 1999
<b>Salinas de Mascasín</b>	Pampa de Salinas	31° 53 S 66° 44 O	Halita	El depósito salino está muy mezclado con materiales eólicos, con un 20,7% de cloruros, 5,27% de sulfatos, con vestigios de boratos, nitratos y nitritos.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Marcos, O. R., 1999
<b>Salina La Antigua</b>	Jbicada al este de la tierra Brava en el dep Capital	29° 55 S 66° 05 O	Halita	Tiene 30 km de longitud por 1 a 3 km de ancho. Se extraen pequeñas cantidades de eflorescencias salinas para abastecer el consumo local. Las características de la salina no permiten una explotación comercial.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Marcos, O. R., 1999

PROVINCIA DE LA RIOJA					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Ernestina, La Estrella, San Lorenzo, Joaquín, San Pablo, Salina Riojana, San Felipe, San Nicolás, Santa Marta.</b>	Salina El Conecito, en el distrito Cerro Conecito, departamento General Sarmiento.	28° 44' S 68° 58' O	Halita, thenardita, yeso, mirabilita, silvita	Es una salina de cosecha de NaCl y Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . La capa marginal de sal es de 20 cm y en la zona central alcanza un espesor máximo de 60 centímetros. Por debajo presenta arcillas (barro madre) con tenores del 7 al 23%. Reservas totales de 2.758.375 t de NaCl. Por cosecha, se estiman, 211.900 t anuales. La explotación del recurso esta vedada por Ley Provincial N°3944 de Reserva y Protección del Ecosistema Laguna Brava.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Marcos, O. R., 1999
<b>Salinas Grandes</b>	Límite La Rioja - Córdoba (30° 15' ) hasta el este de La Sierra Brava	29° 45' S 66° 06' O	Halita	Eflorescencia salinas, NaCl y CaSO <sub>4</sub> mezclados con arenas, sobre de materiales detriticos mas gruesos.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Marcos, O. R., 1999
<b>Laguna Brava</b>	Se ubica a unos 60 km al NO de Jagüe, Departamento General Sarmiento.	28° 16' S 68° 50' O	Thenardita, halita	El relleno principal es sulfato de sodio. Presenta 5 cm de costra salina, luego sulfato de sodio en un 90% con un espesor de 5 a 30 cm. Por debajo arcilla bentonítica (barro madre) castaña clara. La exploración estimó un 60% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , con una potencia media de 0.5 m. Reservas positivas: 9.574.000 t de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , no se incluye sales por cosecha.	Godeas <i>et al.</i> , 1999 Marcos, O. R., 1999

PROVINCIA DE MENDOZA					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Ranquiles</b>	Dep Malargüe, cercano al paraje El Zampal	36° 31' S 69° 40' O	Halita	Es un estrato de sal de roca que forma parte del conjunto evaporítico de la Formación Huitrín. El cuerpo aflorante se explota por cantera y presenta un espesor de hasta 80 metros. La sal se presenta incolora, blanca o gris, con textura granosa fina a sacaroide. La ley es de 94 a 97% de NaCl. Reservas totales: 390.000 toneladas.	Lavandaio, 1993
<b>Sierra de Reyes - Río Colorado</b>	Dep Malargüe	37° 00' S 69° 30' O	Silvita	Son niveles de silvita, interestratificados en sal de roca. Las capas más importantes tienen un espesor entre 11 y 15 m, con una gran continuidad lateral. K <sub>2</sub> O: 20 - 30%. Recursos: 2.000 Mt.	Lavandaio, 1993 Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>Salinas del Diamante</b>	Dep Malargüe	34° 54' S 68° 53' O	Halita	La capa de sal que se forma después de las lluvias es de 12 a 15 mm y escasas cantidades de sulfatos, magnesio y calcio. Dada la intensa evaporación, es una salina que permite 3 a 4 cosechas/año y produce hasta 30.000 t por año.	Lavandaio, 1993 C.F.I., 1981
<b>Salinas del Luncay</b>	Dep Malargüe	36° 37' S 69° 45' O	Halita	Es un banco perteneciente a la F Huitrín (Cretácico). La sal es compacta, de textura granular gruesa hasta fina. Su color varía entre blanco, pardo verdoso y rosado. Reservas totales: 22.5 Mt y positivas: 14 millones de toneladas.	Lavandaio, 1993
<b>General San Martín, Hugo, Mará Luisa, Martha, Unión I y II</b>	Dep General Lavalle	32° 29' S 67° 37' O	Sulfato de sodio	La sulfatera San Martín es una cuenca de 89 ha donde la costra superficial es de 2 cm, la reserva es de 1.840.000 toneladas. El contenido fino de sulfato de sodio es de 30.800 t. Desde 1993 la sulfatera se encuentra inactiva Las sulfateras Unión I y II presentan las mismas condiciones de la anterior al igual que María Luisa y Martha.	Carpio, 1999 Angelelli <i>et al.</i> , 1980

PROVINCIA DEL NEUQUÉN					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
Salinas de Huitrín	Sector NO de la Provincia.	37° 39 S 69° 48 O	Sal de roca	Son cuerpos salinos estratificados. Económicamente, estos yacimientos son impuros por la presencia de óxidos de hierro, sílice, etc. El principal uso es para panes de sal para el ganado.	C.F.I., 1981
Carmelo, Rivadavia	s/d	39° 25 S 70° 16 O	Sal de roca	Yacimiento estratiforme de sales en la Formación Huitrín. Las leyes que presenta son: 97,5% NaCl, 0,15% MgCl y 0,76% de KCl. Los recursos alcanzan las 250.000 t totales.	Godeas <i>et al.</i> , 1999

PROVINCIA DE RÍO NEGRO					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
El Gualicho	Valcheta, a 53 km de San Antonio Oeste.	40° 30 S 65° 15 O	Halita, glauberita	La salina está dividida en tres cuerpos, conectados entre sí y con dirección noroeste a sudeste. La capa anual de cosecha tiene un espesor promedio de 7 cm y una densidad de 1,7 kg/cm <sup>3</sup> , mientras que para la capa permanente se calculó un volumen de 332 Mm <sup>3</sup> de halita. La salina se explota por cosecha anual.	Brodtkorb, A., 1999b C.F.I., 1981

PROVINCIA DE SALTA					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
Laguna Gesche, Santa María	A 60 km al norte de Tolar Grande	26° 57 S 68° 06 O	Natrita trona y pirssonita	Yacimiento subeconómico de 1.500 m de largo por 400 m de ancho. La cubicación arrojó 12.700 t de mineral probable y 9.700 t de mineral posible. Las leyes medias son: 20,23% de carbonato ácido de sodio y 10,24% de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> . El yacimiento se explota por medios manuales.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983 Alonso, 1999
María, Augusto I y II	Salar de Llullaillaco	24° 44 S 68° 17 O	Halita, sulfato de sodio	La mineralización se encuentra en la costra superior del salar con intercalaciones de niveles detriticos.	Godeas <i>et al.</i> , 1999
Doña Emma, Ducus I a III, Emilia, Manto Blanco, María Alejandra, María Cecilia, Halcón, Fernando I, María Auxiliadora, Nicodemus, Pacífica, Valencianas	Salar de Pocitos	26° 25 S 67° 02 O	Halita, mirabilita	El yacimiento presenta espesores variables desde los 5 m hasta unos pocos centímetros. La mineralización tiene pocas intercalaciones terrosas y un tenor entre 79 y 91% NaCl. La cantidad de halita aprovechable asciende a 15,5 Mt con una ley media de 89,06%. La mineralización de sulfato de sodio se presenta en un manto sólido poroso con potencias que alcanzan los 0,50 a 1,20 metros.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
Sonia	Sijes	24° 40 S 66° 41 O	Sal de roca	Depósitos fósiles de 5 a 7 m de espesor.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
Bala, Jap, La Providencia, Los Magos, Salvador	Salar de Arizaro	24° 31 S 67° 43 O	Halita, sulfato de sodio	En este salar se realizó una perforación que atravesó 100 m de halita de gran pureza.	Alonso, 1999

PROVINCIA DE SALTA					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
Neptalí	Salar de Pastos Grandes	24° 33 S 66° 43 O	Halita	El yacimiento tiene una capa de halita de alta pureza, de color blanco, compacta y dura. El espesor es de 0,5 m a 3 cm en su parte más delgada. La explotación se realiza por medios mecanizados y se reconocieron más de 1.000 piletas de recristalización. NaCl: 95,27%.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
Aracar, Arisal, Ercilia, kuky, Federico, Eolica, Santa María	Salar de Taca Taca	24° 28 S 67° 43 O	Halita	El depósito lo constituye una capa de sal de 0,20 a 0,60 cm de espesor. El yacimiento Federico cuenta con 200 piletas de recristalización y en Ercilia 2.800 donde se realizan tres cosechas anuales.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
Cándido, Chago, Gina y otras	Tolar Chico	25° 05 S 67° 01 O	Sulfato de sodio	Salar de reducidas dimensiones donde se comprobó la ocurrencia de mineralización	Argañaraz, 1999
Angélica, Irene, Praga I a IV	Salar del Rincón	24° 12 S 66° 58 O	Halita, mirabilita	Análisis de muestras del centro del salar tienen contenidos de 95% NaCl y 2% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , además presenta Li, Mg y K. La explotación se realizaba con fines industriales, el NaCl se obtiene por piletas, raspado y arranque. La explotación se realiza sólo en los meses de verano con una producción anual de 600 toneladas.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983
Inés I a V, Pular Grande, Pular I, Micerino, Sibila	Salar de Pular Lullailaco	24° 18 S 67° 56 O	Sulfato de sodio	La mineralización se encuentra en la costra superior del salar con intercalaciones de niveles detríticos.	Godeas <i>et al.</i> , 1999
Isabelita, Sulfa Venus (en la cuenca existen más de 130 pertenencias)	Salar de Río Grande	25° 04 S 68° 10 O	Halita, thenardita y mirabilita	El salar presenta una superficie de 18.000 ha con espesores de hasta 1,60 m, estimándose las reservas en 41 Mt. La explotación de este salar se realiza en un sector de 2.000 ha con un rendimiento del 40%.	Schalamuk <i>et al.</i> , 1983 Argañaraz, 1999
Vega de Arizaro, San Martín	Zenta	24° 32 S 67° 56 O	Sulfato de sodio	Depresión elongada norte - sur, donde se explotó un nivel de sulfato de sodio. La mineralización se presenta compacta, muy pura, con buen desarrollo areal, con escaso descarpe. Las reservas se estiman en 25.000 t y la potencia es de 0,50 a 1,00 metro.	Argañaraz, 1999

PROVINCIA DE SAN JUAN					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
Cerro Blanco, Descubridora, La Argentina, La Serrana, La Sulfatera, Tres Hermanas	Cerro Blanco	30° 19 S 69° 07 O	Thenardita	El horizonte con la mineralización registra espesores de 70 - 75 centímetros. Las diferentes capas de sulfato de sodio, de 1 a 10 cm de espesor, se encuentran separadas entre sí por material arcilloso y yeso. La thenardita alcanza los 91,80% de pureza.	Angelelli <i>et al.</i> , 1980

## PROVINCIA DE SAN LUIS

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Salina del Bebedero</b>	Al suroeste de la ciudad de San Luis	33° 34 S 66° 39 O	Halita	Producción de halita por cosecha anual. La salina tiene una alimentación por aguas subterráneas surgentes mineralizadas. La superficie explotable es de 7 km <sup>2</sup> , el resto no tiene piso firme y no aguanta el paso de máquinas pesadas de cosecha.	C.F.I., 1981

## PROVINCIA DE SANTA CRUZ

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Cañadón Grande</b>	Cabo Blanco, Departamento Deseado	47° 13 S 65° 52 O	Halita	La salina cubre una superficie de 60 ha, con sectores no explotables por ser el piso fangoso. La capa temporaria alcanza unos 2 - 4 cm de espesor y la capa temporaria es de 4 - 7 m de potencia. NaCl: 92,73. En 1973 registro una producción de 800 t.	Angelelli <i>et al.</i> , 1976
<b>La Lobería</b>	Cabo Blanco, Departamento Deseado	s/d	Halita	Cuerpo salino de reducidas dimensiones. La capa temporaria es de 2 a 3 cm de espesor, blanca en la parte superior y rosada en la inferior.	Angelelli <i>et al.</i> , 1976
<b>Fatima I</b>	A 42 km de Comodoro Rivadavia, en el Dep Deseado	s/d	Mirabilita	Es un cuerpo cristalino compacto, con impurezas de material arcilloso, oscuro. Las reservas calculadas ascendían a 320.000 t de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hidratado).	Angelelli <i>et al.</i> , 1976
<b>Florentino Ameghino</b>	Dep Deseado	46° 46 S 68° 00 O	Mirabilita, thenardita	Sulfatera de cosecha permanente. Dos horizontes mineralizados, el primero con 0,30 m y el segundo con 1,00 m de espesor. Ley: 55,42%.	Bernasconi y Cangioli, 1984
<b>Fatima II</b>	Dep Deseado	46° 46 S 76° 50 O	Mirabilita, thenardita	El yacimiento está compuesto por una sucesión de sales de sodio, con predominio de sulfatos, acompañadas por compuestos de magnesio y calcio. La potencia es de 4 m sin entrar en estéril. Ley: 49,3%.	Bernasconi y Cangioli, 1984
<b>La Escondida I y II, La Misteriosa, Mollarena, Mirongo, Blanca Aurora, Juan Domingo</b>	Lago Ghío - Paso Roballos	47° 15 S 71° 45 O	Trona, sulfatos y cloruros	Los depósitos se encuentran emplazados en diferentes cuencas intermontanas. Los reservas fueron calculadas teniendo como base las costras y los iones disueltos registrando unas 80.000 t de mezcla de sales. Las lagunas registran tenores que oscilan entre 25 y 70 g/l de carbonato, 68 g/l de cloruros y 28 g/l de sulfatos.	Angelelli <i>et al.</i> , 1976

## PROVINCIA DE SANTIAGO DEL ESTERO

Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Salina de Huyamampa</b>	a 55 km al norte de la ciudad de La Banda	27° 24 S 64° 15 O	Halita, mirabilita y thenardita.	La salina se explotaba por bombeo de las aguas subterráneas, durante los meses de verano se producía la evaporación y posterior cosecha, la costra salina alcanzaba los 3 a 5 cm de espesor. El sulfato se obtenía por recuperación secundaria.	Angelelli <i>et al.</i> , 1980

PROVINCIA DE TUCUMÁN					
Depósito o Manifestación	Ubicación Geográfica	Latitud Longitud	Mineralogía	Geología	Referencias
<b>Astrid e Ingrid</b>	Las Salinas	26° 42 S 65° 08 O	Halita	La mineralización ocurre en la Formación India Muerta. Litológicamente está compuesta por limolitas y areniscas. La ley de NaCl es del 94%.	Godeas <i>et al.</i> , 1999
<b>El Timbó</b>	Departamento Burruyaco, a 13 km de San Miguel de Tucuman	26° 43 S 65° 09 O	Sal de roca, yeso y anhidrita	El depósito, de edad terciaria, está formado por intercalaciones de limo - arena - arcilla, con capas de NaCl, en forma individual o formando una mezcla entre ambos. La explotación se realiza por medio de una serie de perforaciones, con una profundidad promedio de 70 m. Las reservas medidas al año 1996 eran de 377.755,37 m <sup>3</sup> , indicadas de 3.586.631,48 m <sup>3</sup> y las inferidas no fueron estimadas. La producción para el mismo año fue de 32.744 t de sal.	Bortolotti, P., 1999 Godeas <i>et al.</i> , 1999

## 1.7. BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, R. N. 1999 a. “*Boratos terciarios de la Puna, Jujuy, Salta y Catamarca*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1779-1826, Buenos Aires.
- ALONSO, R. N. 1999 b. “*Los salares de la Puna y sus recursos evaporíticos, Jujuy, Salta y Catamarca*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1907-1921, Buenos Aires
- AMERICAN GEOLOGICAL INSTITUTE, 1973. “GLOSSARY OF GEOLOGY”. Ed. Margaret Gary, Robert McAfee Jr and Carol L. Wolf. Washington, D. C.: 805.
- ANGELELLI, V., SCHALAMUK, I., FERNANDEZ, R., 1980. “*Los Yacimientos de Minerales No Metalíferos y Rocas de Aplicación de la Región Centro-Cuyo*”. Subsecretaría de Minería. Ministerio de Economía. Anales 19, Buenos Aires.
- ANGELELLI, V., BRODTKORB, M. K., GORDILLO, C. E., GAY, H.D., 1983. “*Las Especies minerales de la República Argentina*”. Publicación Especial. Servicio Minero Argentino.
- ARGAÑARAZ, R. A., 1999. “*Depósitos de sulfato de sodio de Jujuy, Salta y Catamarca*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1923-1925, Buenos Aires
- BALOD, M., 1999. Proyecto Posasio Río Colorado, Mendoza-Neuquén. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1077-1081, Buenos Aires
- BENINATO, M. A., 1999. “*Salina del Bebedero, San Luis*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1939-1942, Buenos Aires
- BERNASCONI O.H. Y G.H. CANGIOLI, 1984. “*Importancia económica de los depósitos de sulfato de sodio de la provincia de Santa Cruz y su implicancia nacional*”. IX Geológico Argentino, S.C. de Bariloche. Actas V: 369-380
- BLASCO, G. y E. O. ZAPPETTINI, 1996. Hoja Geológica 2566 – I San Antonio de los Cobres, provincias de Jujuy y Salta. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 217. Buenos Aires.
- BORTOLOTTI, P., 1999. “*Yacimiento de salmuera de El Timbó, Tucumán*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1927-1931, Buenos Aires
- BRODTKORB, A., 1999a. “*Salinas Grande y Chica de la península de Valdés, Chubut*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1963-1970, Buenos Aires
- BRODTKORB, A., 1999b. “*La salina El Gualicho, Río Negro*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1963-1970, Buenos Aires
- CARPIO, F. W., 1999. “*Sulfatera General San Martín, Mendoza*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1943-1946, Buenos Aires
- C.F.I., 1980. Aprovechamiento minero de la provincia de La Pampa, vol 4. Antecedentes para la evaluación de salinas y salmueras. Evaluación de recursos mineros. Anteproyecto de recursos de magnesio. Informe final. Buenos Aires.
- CORDINI, R. I., 1967. “*Reservas salinas de argentina*”. Instituto nacional de geología y minería. anales 13:108.
- DEL BLANCO, M. A., CÁBANA, M. C. y de BARRIO, R. E., 2001. “*Características mineralógicas y geoquímicas de depósitos evaporíticos del oeste de Catamarca*”. VII Congreso Argentino de Geología Económica, Actas2, 67 – 72, Salta
- GODEAS, M., CARRIZO, R., CRUZ

- ZULOETA, G., GONZÁLES (H), R., KORZENIEWSKI, L., LÓPEZ, H., MALLIMACCI, H., MARTÍNEZ, L., RAMALLO, E., VALLADARES, H., ZUBIA, M., 1999. “*Inventario de yacimientos y manifestaciones de minerales metalíferos e industriales de la República Argentina*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1907-1921, Buenos Aires.
- GUILBERT, J. M. y PARK, CH. F. (JR), 1986. The geology of ore deposits. W. H. Freeman and Company, New York:985
- HURLBUT, C. JR., 1980. “Manual de mineralogía de Dana”. 2<sup>da</sup> edición. Editorial Reverté, pag: 653.
- KOSTICK, D. S., 2000. “*Salt*”. En: Minerals Yearbook. Department of the Interior and U.S. and Geological Survey. Cd-rom.
- KOSTICK, D. S., 1994. “*Salt*”. En: Industrial Minerals and Rocks .6<sup>th</sup> Edition Donald D. Carr Senior Editor. AIME, 851-868.
- KOSTICK, D. S., 1994. “*Soda Ash*”. En: Industrial Minerals and Rocks .6<sup>th</sup> Edition Donald D. Carr Senior Editor. AIME, 929-958.
- KUNASZ, I. A., 1994. “*Lithium Resources*”. En: Industrial Minerals and Rocks .6<sup>th</sup> Edition Donald D. Carr Senior Editor. AIME, 631-642.
- LAVANDAIO, E., 1993. “*Minerales no metalíferos y rocas de aplicación*”. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, V. A. Ramos (Ed.), Relatorio, IV (2):505-515.
- LIDE, D. R. (Ed.) 1996. Handbook of Chemistry and Physics. 76<sup>th</sup> ed.
- MAHAM, B. H., 1986. “Química curso universitario”. 2<sup>da</sup> edición. Editorial Addison-Wesley iberoamericana: 814.
- MARCOS, O. R., 1999. “*Depósitos salinos de La Rioja*”. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1933-1937, Buenos Aires
- McILVEEN, JR. And CHEEK R. JR., 1994. “*Sodium Sulfate Resources*”. En: Industrial Minerals and Rocks .6<sup>th</sup> Edition Donald D. Carr Senior Editor. AIME, 959-972.
- MENDEZ, V., TURNER, J., NAVARINI, A., AMENGUAL, R. VIERA, O., 1979. Geología de la Región Noroeste, provincias de Salta y Jujuy, República Argentina. Dirección General de Fabricaciones Militares, 1 – 118. Buenos Aires.
- OBER, J. A., 2000. “Lithium”. En: Minerals Yearbook. Department of the Interior and U.S. and Geological Survey. Cd-rom.
- PANORAMA MINERO, Revista, enero – febrero, 1992. “*El salar del hombre muerto*”, (172): 15-16.
- PUBLICACIÓN TÉCNICA N°3 “Magnesio”. 1999. SEGEMAR - UNSAM. Marzo.
- SCHALAMUK, I.; FERNANDEZ, R.; ETCHEVERRY, R., 1983. “*Los Yacimientos de Minerales No Metalíferos y Rocas de Aplicación de la Región NOA*”. Subsecretaría de Minería. Ministerio de Economía. Anales 20, Buenos Aires.
- SCHALAMUK, I., M. DEL BLANCO, D. MARCHIONNI, S. ROMERO y C. CÁBANA, 1999. Salinas y Sulfateras de la región pampeana, Buenos Aires y La Pampa. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1947-1962, Buenos Aires.
- SEARLS, J. P., 2000. “*Potash*”. En: Minerals Yearbook. Department of the Interior and U.S. and Geological Survey. Cd-rom.
- SZARKA, G., 1992. “Tecnologías modernas de explotación de sal por disolución con sondeos individuales: métodos con columna de explotación cementera e inyección intermedia de agua”: Congreso Mundial de Minería-Perspectivas para la Minería, Madrid, España. Tomo I: 735-744.
- WILLIAMS-STROUD, S. C., SEARLS, J. P., HITE R. J., 1994. “*Potash Resources*”. En: Industrial Minerals and Rocks .6<sup>th</sup> Edition Donald D. Carr Senior Editor. AIME, 783-802.
- SUIM, 2001/2002. Sistema Unificado de Información Minera. [www://suim.gov.ar](http://www://suim.gov.ar)
- WEDEPOHL, K. H., 1978. “Handbook of Geochemistry”. Vol. II/1 Elements H(1) to Al (13). Executive Springer Verlag.

## Capítulo 2

### PROCESAMIENTO DE SALES

#### 2.1. PROCESAMIENTO DE SALES DE LITIO

##### 2.1.1. INTRODUCCIÓN

El litio puede recuperarse económicamente a partir de minerales insolubles en agua, y a partir de salmueras naturales con contenidos variables del ión ( $\text{Li}^+$ ), generalmente acompañado por otros cationes (sodio, potasio, calcio, etc.) y necesariamente aniones (cloruros, sulfatos, carbonatos, etc.).

Dentro de los primeros, los minerales de litio más importantes son: espodumeno y petalita. De estos minerales, Australia posee las mayores reservas mundiales de  $\text{Li}_2\text{O}$  a partir de espodumeno, obtenido durante la explotación integral de una pegmatita en Greenbushes. A partir de 1938, cuando se inicia la explotación industrial de sales en el lago Searles en California, comienza a tener importancia la recuperación de este elemento a partir de salmueras naturales que, a nivel mundial, constituyen reservas de litio comparables o superiores a las de los minerales antes mencionados. Teniendo en cuenta las tecnologías que hasta hoy se conocen y utilizan, si bien el agua de mar constituye una reserva mundial de importancia, la recuperación a partir de ésta ( $[\text{Li}^+] = 0,17 \text{ ppm}$ ), no parece ser una fuente de litio de interés comercial. Por la importancia estratégica del litio para las tecnologías nucleares, en 1963 se estudió en Israel su extracción a partir de las aguas del Mar Muerto. De la misma manera, técnicamente, la recuperación a partir de las salmueras yacentes debajo de los depósitos de petróleo, frecuentemente extraídas junto con éste y conteniendo en promedio  $100 \text{ mg/l}$  de  $\text{Li}^+$ , no es de interés económico debido a la alta concentración de magnesio (20 veces la de litio) (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997). En esta sección se discutirá el procesamiento de sales de litio a partir de salmueras.

En el mundo existen distintos depósitos de salmueras con contenidos de litio importantes para su recuperación, y según estimaciones del U.S. Geological Survey, contienen entre los 2/3 a 3/4 de los recursos mundiales de litio. Así por ejemplo, la salmuera del lago Searles (cuya explotación fue abandonada en 1970) contenía 70-100 ppm de litio; en Silver Peak, Nevada, la actual fuente de provisión de litio en los Estados Unidos, las salmueras contienen 300 ppm (Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales, 1979); el salar de Atacama, Chile, contiene alrededor de 1500 ppm y el de Uyuni en Bolivia, alrededor de 400 ppm (Evans, 1986). En Argentina, las salmueras en el Salar del Hombre Muerto, en Catamarca, tienen 650 ppm de litio (Panorama Minero, 1996) y a diferencia de las salmueras de los salares de Chile y Bolivia, se caracterizan por su concentración uniforme en todo el salar.

##### 2.1.2. CONCENTRACIÓN DE LAS SALMUERAS PORTADORAS DE LITIO

###### **A partir de salmueras con menos de 100 ppm de litio**

Las salmueras que contienen menos de 100 ppm de litio requieren el siguiente proceso de recuperación: primero el litio es precipitado como fosfato de sodio y litio ( $\text{Li}_2\text{NaPO}_4$ ), (conocido como *licon*), que contiene 20% de  $\text{Li}_2\text{O}$ . Luego es tratado con ácido sulfúrico concentrado, convirtiéndose en ácido fosfórico y una mezcla sólida de sulfatos de sodio y litio, que es disuelto y precipitado a partir de la solución como carbonato de litio por adición de carbonato de sodio. El rendimiento de este proceso es aproximadamente del 88%, el cual es muy bueno teniendo en cuenta la concentración inicial en litio (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

En condiciones climáticas favorables, las salmueras de baja concentración, cercana a 100

ppm de litio inicial pueden ser evaporadas para lograr concentraciones que permitan su posterior recuperación, pero ello se logra siempre y cuando el contenido de magnesio sea bajo.

### **A partir de salmueras con más de 100 ppm de litio**

Desde el punto de vista del procesamiento para la recuperación del litio a partir de salmueras extraídas en salares, no solo tener un contenido de litio elevado es importante. Factores tales como el espesor y características de la capa superficial de la costra salina, el aporte de agua de ríos superficiales o subterráneos al salar, el aporte de materiales arcillosos introducidos en la salmuera con el agua de los ríos y fundamentalmente la presencia de concentraciones variables de otro tipo de elementos como magnesio, sodio, boro, sulfatos, etc., y las condiciones climáticas de la zona, determinan las posibilidades económicas del tratamiento como así también las posibilidades de recuperar más de una sal.

En general, las salmueras son bombeadas desde distintas profundidades (por ejemplo: unos 30 metros por debajo de la costra salina en el salar de Atacama y a 100 m en Clayton Valley) a una serie de piletas de evaporación solar donde se evapora casi el 95% del agua inicial, favoreciendo la precipitación de otras sales por sobresaturación de la salmuera y logrando concentrar al litio en un factor de 30 y obtener salmueras con un mínimo de 5000 ppm de litio, aptas para alimentar el proceso de recuperación (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997). No obstante, parte del litio se pierde ya que queda ocluido en las sales precipitadas. En Atacama, la elevada tasa de evaporación (3000 mm/año), las escasas precipitaciones (25 mm/año) y temperaturas entre 0-20° C en junio y 9-28° C en enero, permiten lograr elevar el contenido de litio hasta un 6% en piletas recubiertas de PVC que cubren una extensión de 16 km<sup>2</sup> (The Industrial Minerals Handybook III, 1995).

En el Salar del Hombre Muerto, en la provincia de Catamarca (FMC-Minera del Altiplano S.A.), la salmuera extraída de 6 pozos saturada de cloruro de sodio, porta además 650 ppm de litio, potasio, sulfatos, borato y otros componentes menores (rubidio, cesio, bromo, etc.) (Panorama Minero, 1992, 1994). En el proceso

desarrollado por FMC-Minera del Altiplano S.A. y distinto al usado por otras empresas en los salares de Chile y EE.UU, el litio es extraído selectivamente de la salmuera natural durante el bombeo, usando un material adsorbente adecuado, en lugar de mantenerlo en solución (como pasa en otros procesos) durante el proceso de evaporación solar. Posteriormente, el litio adsorbido es removido con agua purificada y esta salmuera debe ser concentrada por evaporación solar hasta alcanzar 30.000 o 60.000 ppm de litio antes de su procesamiento en la planta química (Panorama Minero, 1996, 2002).

### **2.1.3. OBTENCIÓN DE CLORURO DE LITIO**

La salmuera concentrada de cloruro de litio, es tratada en evaporadores de vacío donde se produce la precipitación de los cristales de cloruro que son separados, secados y embalados (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

### **2.1.4. OBTENCIÓN DE CARBONATO DE LITIO**

El proceso para la obtención de carbonato de litio consiste en hacer reaccionar la salmuera concentrada de cloruro de litio con carbonato de sodio para generar un precipitado de carbonato de litio, que es lavado, filtrado y secado, previo a su embalaje.

En el Valle Clayton (Nevada, USA), Foote Mineral Co. primero purifica la salmuera concentrada removiendo las impurezas dentro de los estanques por adición de cal, y luego agrega la solución de carbonato de sodio a alta temperatura (Kunasz, 1983; Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

## **2.2. PROCESAMIENTO DE CLORURO DE POTASIO (SILVITA)**

### **2.2.1. INTRODUCCIÓN**

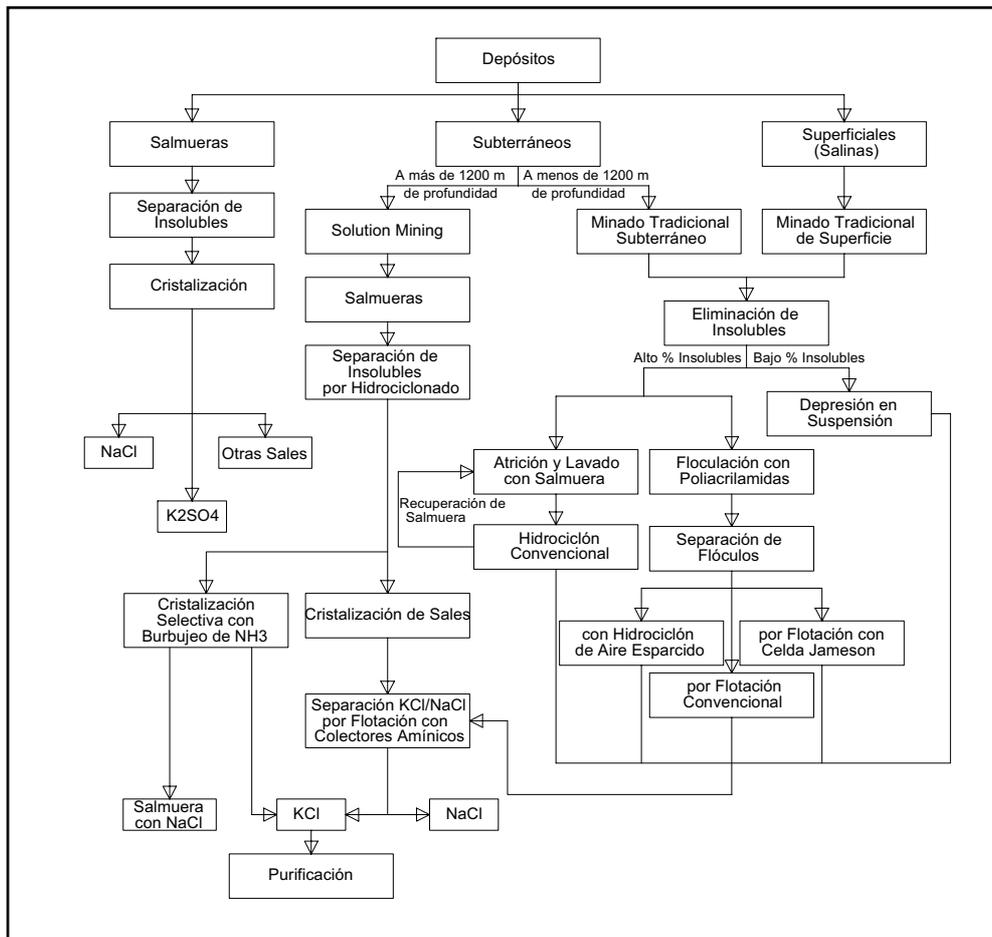
El potasio junto con el fósforo y el nitrógeno representan los principales nutrientes de las plantas. El cloruro, sulfato y nitrato de potasio

son utilizados como fertilizantes, y la principal fuente comercial de potasio, son los siguientes minerales: silvita (KCl), kainita ( $4(KCl.MgSO_4).4H_2O$ ) y carnalita ( $KCl.MgCl_2.6H_2O$ ).

La silvinita es una mezcla mecánica de silvita y halita, y es el mineral natural más importante como fuente de potasio. La halita representa la impureza más común de la silvita (es de tipo no “isótropa”). Además las sales son acompañadas generalmente por impurezas insolubles tales como arcillas, cuarzo, etc.

En general la liberación de componentes de la silvinita se obtiene en tamaños gruesos, por lo tanto es común tratarla en una granulometría comprendida entre 12 y 50 mallas. En esta clase granulométrica hay muy pocas partículas ligadas cloruro de sodio-cloruro de potasio. Se ha comprobado que en granulometría 70-100 mallas la liberación es casi total (Sarquís y González, 2000).

El siguiente esquema resume los diferentes métodos para el procesamiento de minerales de potasio según su procedencia:



2.2.2. RECUPERACIÓN DE SALES POR DISOLUCIÓN “IN SITU” (SOLUTION MINING)

Esta tecnología se trató en detalle en el Capítulo 1.

2.2.3. ELIMINACIÓN DE INSOLUBLES PREVIA A LA SEPARACIÓN DE SALES POR FLOTACIÓN

Cuando el contenido de minerales insolubles

que acompañan las sales es importante, es necesaria su remoción previa a la separación de las sales. Los insolubles son principalmente arcillas de tipo montmorillonita, en general alcanzan porcentajes del 1 al 6% m/m y poseen una gran capacidad de intercambio catiónico por lo que, si las sales se separan por flotación, absorben el reactivo colector y esto dificulta la separación de silvita.

Para eliminar los insolubles se utilizan diferentes métodos según sea el contenido de estos finos, tal como se indica en el esquema general de procesamiento.

### Atrición y lavado

Se atriciona la muestra con salmuera saturada para desprender de las sales el material arcilloso no ocluido en los cristales, que es separado posteriormente por clasificación en un hidrociclón convencional. Esta separación es efectiva gracias a la diferencia de tamaño existente entre los cristales de sal y las arcillas.

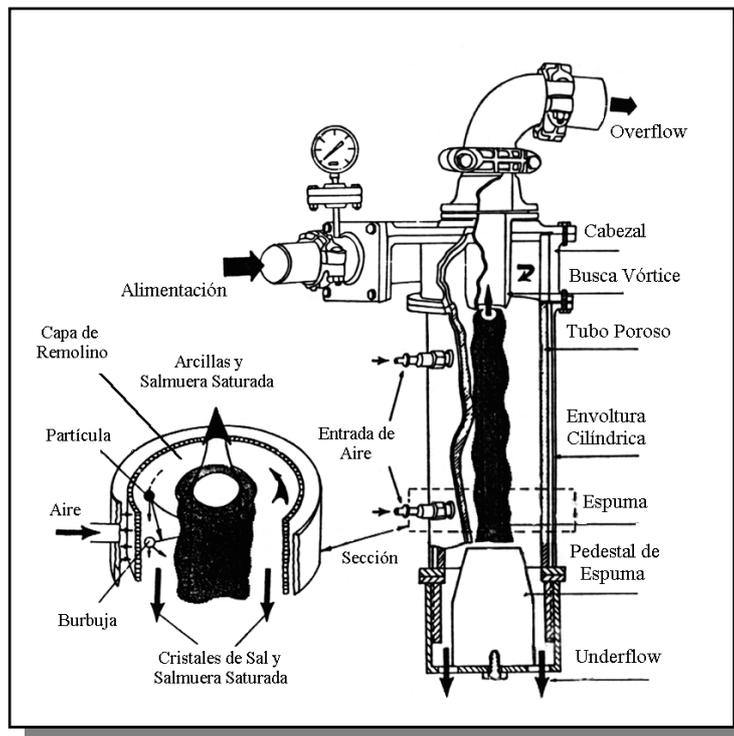
Esta separación también puede realizarse en un clasificador tipo tornillo (separador Akins) en el cual el material fino se desprende de la superficie por el mismo rozamiento entre los granos de sal que son transportados por el tornillo para descargar en la parte superior del equipo. La descarga de finos se produce por rebalse de la suspensión (compuesta por finos más solución saturada) en la parte inferior del equipo. La

eficiencia de la separación es regulada por la altura del rebalse, que evita la pérdida de granos de sal de menor granulometría.

### Floculación con poliacrilamidas

Las partículas de los minerales arcillosos en suspensión pueden ser “aglomeradas” por adición de un reactivo floculante. Generalmente se utilizan poliacrilamidas de alto peso molecular del tipo aniónico o no iónico que interactúan con la superficie de las arcillas conformando agregados llamados “flóculos”, que pueden separarse por distintos métodos:

a) utilizando un hidrociclón por aire esparcido (*ASH*, Air Sparged Hydrocyclon): la geometría de este equipo se observa en la figura:



El equipo realiza una flotación rápida de finos en un campo centrífugo y posee 100 veces la capacidad específica de una celda convencional. Se generan pequeñas burbujas de aire que “adhieren” al mineral hidrofóbico para transportarlo a la fase de espuma que es descargada en el overflow, mientras que la fase acuosa con las partículas hidrofílicas es descargada por el underflow. Yalamanchili y Miller (1995) utilizaron un *ASH* para remover los insolubles de minerales de silvinita y evaluaron el efecto de las variables experimentales

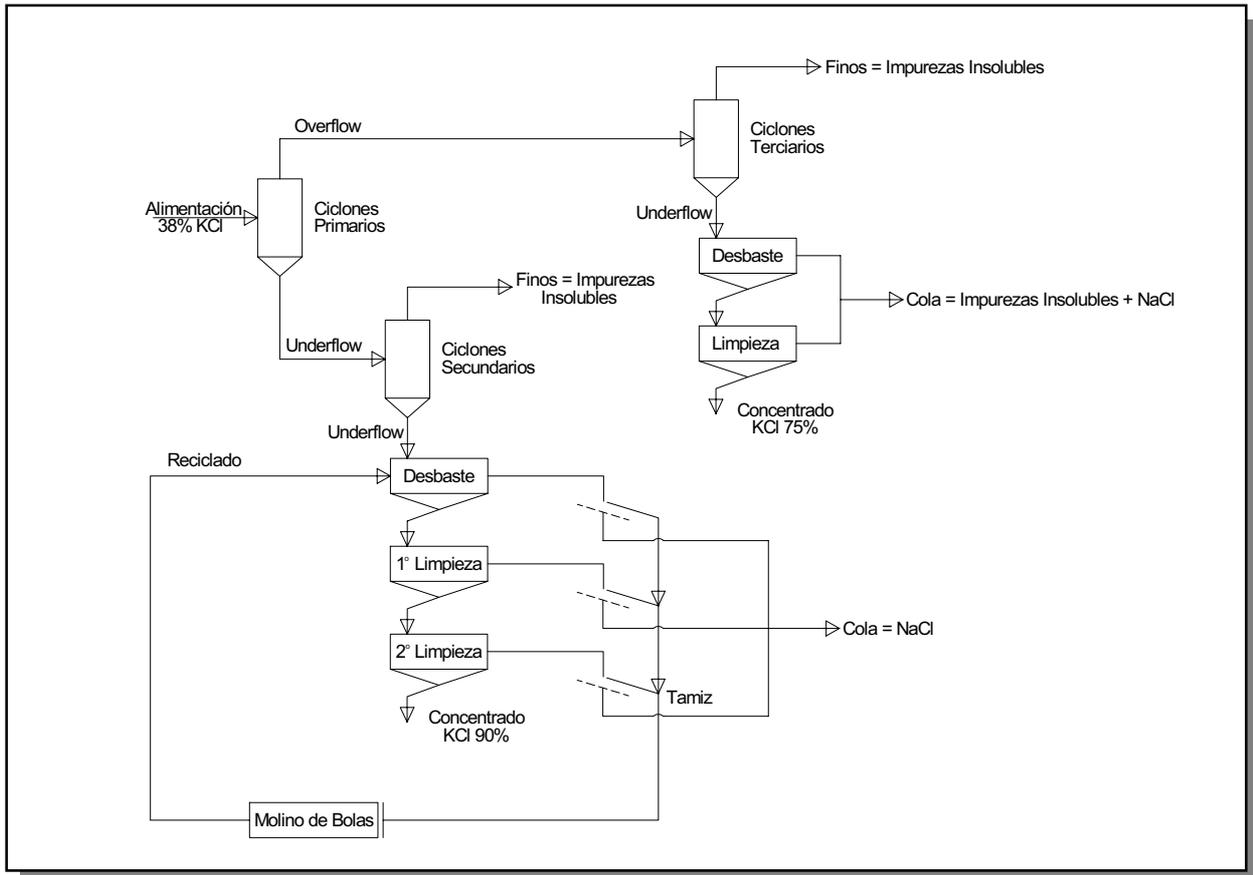
sobre la recuperación de los mismos. Realizaron pruebas previas con muestras sintéticas para determinar las relaciones [flujo de aire: flujo de pulpa] y [ancho de overflow: ancho de underflow] óptimas para lograr la mejor recuperación de insolubles. Una vez encontrado un óptimo, realizaron ensayos sobre una muestra proveniente de depósitos en Saskatchewan, Canadá, que contenía 7% de insolubles (1/3 de minerales arcillosos como caolinita e illita y 2/3 de minerales no arcillosos como dolomita,

hematita, cuarzo). Dosificaron floculante y colector, mantuvieron una relación [flujo de aire: flujo de pulpa] igual a 6 y lograron una disminución de los insolubles de 7% a 1% manteniendo el contenido de silvita entre el 92 y 95%. Además los autores afirman que el consumo de reactivos en la operación industrial con un ASH es menor que el utilizado en una celda de flotación

convencional y éste a su vez será menor que el utilizado en laboratorio durante los ensayos.

b) flotación convencional y flotación en celdas Jameson:

La empresa inglesa Cleveland Potash Ltd. explota silvinita obteniendo KCl grueso y fino según el siguiente esquema general de planta:



Burns *et al.* (1994) estudiaron a escala piloto las posibilidades de reemplazar las celdas de desbaste y limpieza Denver por celdas Jameson en la planta de dicha compañía y encontraron que si bien existe una mejora en la recuperación y en la ley del concentrado, se presentan problemas de manejo de sólidos en el transporte de las espumas a la salida de la celda Jameson que serían de difícil resolución en la escala industrial, el concentrado contiene una apreciable cantidad de aire incorporado que no se libera fácilmente.

### Depresión en suspensión

Cuando el porcentaje de insolubles es bajo, directamente se deprimen en el proceso de

flotación directa de las sales utilizando depresores enmascarantes específicos: almidones, carboximetilcelulosa (CMC) ó goma guar, que actúan sobre las arcillas que quedan dispersas en la pulpa y no son flotadas por el colector en la etapa de flotación de la silvita. Este método se usa también para deprimir los insolubles remanentes después de haber separado la mayor cantidad de finos por alguna de las alternativas anteriormente detalladas. La flotación debe hacerse a pH inferior a 8 puesto que a pH superior ocurre la alteración de las propiedades eléctricas de las arcillas que impide la acción efectiva del depresor. Pawlik *et al.* (2003) estudiaron el efecto depresor de la CMC sobre partículas de illita y dolomita que pueden

estar presentes durante la recuperación de cloruro de potasio por flotación en una salmuera saturada. Los autores evaluaron la influencia de la concentración de sales de la salmuera sobre la estructura de la CMC en solución, y cómo esto modifica la adsorción de la misma en la superficie de la illita y de la dolomita, para que permanezcan dispersas y no reaccionen con la amina que irá a colectar la silvita.

Comparando el porcentaje de insolubles eliminados de una muestra natural por flotación directa y por flotación con deslamado previo, se encuentra que para el segundo caso, entre lo eliminado en el overflow del hidrociclonado y luego, en las colas de la flotación, se supera por casi un 20% la cantidad de insolubles que se eliminan en las colas de la flotación directa. La disminución de insolubles por deslamado previo puede provocar la depresión de silvita, (aumenta el tenor de  $K_2O$  en las colas de flotación) por un exceso de reactivo depresor. Por lo tanto hay que ajustar la fórmula de flotación adecuando las dosis de reactivos a las diferentes composiciones de las muestras (Sarquís y Lenzo, 1994; Sarquís y González, 2000; Alonso *et al.*, 1990).

#### 2.2.4. ELIMINACIÓN DE INSOLUBLES EN SALMUERA

Los finos insolubles presentes en las salmueras obtenidas durante la extracción por *solution mining* (salmueras bombeadas directamente desde las capas profundas de los salares) o salmueras saturadas remanentes en las operaciones de atrición y lavado pueden separarse por hidrociclonado o por centrifugación.

En un trabajo realizado por la empresa Cleveland Potash Ltd. en 2001, McConnell y Gilchrist evaluaron las posibles modificaciones a introducir en el circuito de planta para incrementar la recuperación general de la misma. Para ello estudiaron la posibilidad de disminuir la pérdida de salmuera saturada en cloruro de potasio incorporando al circuito un filtro de banda a presión, que permitió bajar dichas pérdidas de salmuera con los sólidos en comparación con lo que se obtiene separándolos con una centrífuga de canasto. Además, el filtro permite una recuperación adicional de cloruro por lavado de la torta de mineral arcilloso dentro del mismo filtro.

#### 2.2.5. SEPARACIÓN DE NaCl-KCl A PARTIR DE SOLUCIONES SALINAS DEL *SOLUTION MINING*

La separación de NaCl-KCl por cristalización y flotación da productos de menor pureza que los obtenidos en cristalizadores de vacío. Otra forma de separarlas a partir de una solución saturada en ambas sales es por burbujeo de amoníaco gaseoso. Gaska *et al.* (1985) observaron que en estas condiciones, y a medida que la concentración de amoníaco en la solución aumenta (a cualquier isoterma), la solubilidad del cloruro de sodio aumenta y la del cloruro de potasio disminuye, y encontraron que, la máxima diferencia entre las solubilidades de ambas sales se obtiene con una concentración de amoníaco de 38% en solución. En este punto la concentración del ión amonio es lo suficientemente alta para desplazar las moléculas de agua de la esfera de solvatación del ión sodio (incrementando la solubilidad de su sal) en tanto que, al ser el radio del catión potasio más grande que el del sodio, el agua lo hidrata débilmente y el dipolo del amonio (más débil que el del agua) no alcanza a hidratarlo. Los autores describen además el flowsheet del proceso para la recuperación del KCl a partir de las salmueras, puntualizando que, como se pueden utilizar salmueras más diluídas (que las utilizadas en la cristalización), el contenido de impurezas en el KCl obtenido es menor y que los costos de este proceso son inferiores al de cristalización convencional.

#### 2.2.6. OBTENCIÓN DE KCl POR FLOTACIÓN DE SILVINITA

La flotación con reactivos catiónicos produce cloruro de potasio apto para su comercialización directa y es el método más difundido para el tratamiento de menas de silvinita.

Alonso *et al.* (1990), utilizaron una muestra natural tomada del yacimiento Río Colorado, en Mendoza además de una muestra artificial para realizar ensayos de laboratorio. Estudiaron la flotabilidad de cloruros de diferentes cationes (tales como sodio, calcio, bario y amonio) y de la silvita en un tubo Hallimond modificado utilizando el mismo colector acetoamínico para todos ellos. A excepción del cloruro sodio, todos

los demás cloruros son flotados por el colector. Este hecho es aprovechado en la purificación de cloruro de potasio por flotación ya que el cloruro de sodio es su principal contaminante. Las otras sales en menas de este tipo existen en baja proporción y por eso se solubilizan totalmente en la salmuera portadora y no suelen impurificar los concentrados de silvita.

La flotación es directa y debe realizarse en un medio de salmuera que se encuentra en equilibrio con el mineral (saturada en sales solubles). La saturación es necesaria porque de lo contrario el producto buscado se disolvería y no podría separarse. En este medio los minerales solubles se comportan como insolubles.

Sarquís y González (2000) obtienen un producto con más del 95% de cloruro de potasio a partir de una muestra de sal recristalizada obtenida por *solution mining* (el bajo grado de liberación de este tipo de mineral, se mejora con la lixiviación del concentrado (ver 2.2.7.) Purificación de los concentrados de flotación).

Como colectores selectivos se utilizan sales acéticas de n-alquilamonio de un largo de cadena de 12 a 20 carbonos que poseen gran actividad superficial y excelentes propiedades espumantes. El colector interactúa solamente con la superficie de la silvita aunque el cloruro de sodio posea la misma estructura cristalina (Sarquís y González, 2000; Alonso *et al.*, 1990).

Diversos autores han estudiado el mecanismo de adsorción del colector sobre la superficie de la sal. El modelo de las superficies hidratadas de Schubert plantea la existencia de dos formas diferentes de adsorción del colector en la superficie de las partículas:

a) los grupos polares del colector se adsorben en forma directa a la red de iones de la sal y luego las terminales de las cadenas no polares del colector se asocian entre sí. Éste es el caso de silvita flotada con compuestos n-alquilamonio o n-alquilsulfatos.

b) el colector se adhiere a la superficie hidratada del ión por medio de enlaces hidrógeno, que es el caso de halita flotada con n-alquilaminas o ácidos grasos.

La selectividad de la adsorción de aminas de cadena lineal larga sobre el KCl respecto del NaCl se debe a las diferencias en la hidratación de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en la red cristalina. Siendo

el KCl una superficie menos hidratada, la unión es más probable. Además la máxima flotación se da a una concentración de sal de amina en solución cercana al límite de solubilidad. Como las aminas de cadena más larga son más insolubles, precipitan a concentraciones menores que a las que precipitan las aminas de cadena más corta y por ello es menor la cantidad de colector que se requiere para que la superficie de la silvita quede cubierta e hidrofóbica y flote. Además si la cadena es más larga, mayor es la asociación entre las cadenas y ello hace que disminuya el impedimento para que una nueva molécula se adsorba en la superficie y así, ésta se cubre más rápido aún con menor concentración (Schubert, 1967).

Roman *et al.* (1968) propusieron un modelo donde el colector se adsorbe como iones a través de dipolos que se forman en las moléculas neutras. Laskowski *et al.* (1988) propusieron un mecanismo de atracción electrostática entre la superficie electrostática y las partículas coloidales de colector. Estos modelos fueron rechazados por Yalamanchili *et al.* (1993) que consideraron que la fuerza iónica del medio donde se realiza esta flotación es mucho mayor que cualquier interacción de fuerzas electrostáticas.

Miller y Yalamanchili (1994) determinaron la carga superficial de haluros alcalinos a través de mediciones electrocinéticas y de esta forma demostraron que la flotación de las sales de haluros alcalinos se debe a la adsorción de coloides de carga opuesta (el colector) con la consecuente heterocoagulación. Encontraron que la silvita posee carga negativa, y que la halita posee carga positiva (cargas que son independientes del pH). Anteriormente compararon sus mediciones con la carga superficial predicha por la teoría de la hidratación de un sólido iónico, que plantea que el signo de la carga superficial está determinado por la magnitud de la energía de hidratación de los respectivos iones de red superficiales. Esto es, por ejemplo: si los cationes superficiales tienen una energía de hidratación más negativa que los aniones superficiales, entonces la superficie tendrá carga negativa, y viceversa y atribuyeron la discrepancia entre los signos de la carga superficial medidos y predichos por la teoría de hidratación de iones, a las contribuciones de defectos en la red iónica y fenómenos de relajación en las sales estudiadas (Yalamanchili *et al.*, 1993). Es por ello que, la

silvita (carga superficial negativa) puede ser flotada selectivamente de la halita mediante cloruros de alquilaminas de distinto largo de cadena, debido a la heterocoagulación superficial que se produce entre la superficie negativa de la sal y los coloides que se forman cuando la concentración del colector está próxima a su límite de solubilidad y ocurre la precipitación en solución de las sales amónicas y que llevan carga positiva, en general, hasta pH elevado y cercano a 11. La cantidad necesaria de coloide

heterocoagulado en superficie para lograr la flotación, dependerá del largo de la cadena alquídica y del pH de flotación. Es así que, estos autores descartan la adsorción de iones del colector.

Sarquís y Lenzo (1994) evaluaron la acción colectora de diferentes aminas en distintas concentraciones tomando como parámetros la ley del concentrado, el porcentaje de recuperación de silvita y el índice de selectividad. Los resultados se sintetizan en la siguiente tabla:

Poder Colector	Tamaño de Cadena	Grado de Saturación	Recuperación	Ley de KCl
Alto	Larga	Alto	Alta	Baja
Bajo	Corta	Bajo	Baja	----
Mediano	Larga	Bajo	Alta	Alta
Mediano	Corta	Alto	Alta	Alta

En general, a mayor largo de cadena de la amina se obtienen mayores porcentajes de recuperación y ley de silvita en el concentrado, con menor extracción de impurezas insolubles. A igual largo de cadena, aquellas aminas de menor grado de saturación son las que permiten obtener leyes mayores de cloruro de potasio, pero con mayor extracción de insolubles que las que poseen un grado de saturación mayor. Teniendo en cuenta estas variables y su influencia en los parámetros estudiados los colectores de mejor funcionamiento resultan ser los de mediano poder colector (Alonso *et al.*, 1990).

Con el reemplazo parcial del colector por fuel-oil, gas-oil o kerosene se reduce su consumo en un 25-30%. Con gasoil se obtiene la mayor extracción de silvita compatible con una buena selectividad. Estos compuestos permiten recuperar a las partículas gruesas de silvita que tienen una menor cinética de flotación (Sarquís y Lenzo, 1994; Laskowski, 1994).

En su trabajo, Wang *et al.* (1995) desarrollan un proceso de flotación en el que se incluye un premezclado del espumante con una solución acuosa de la amina colectora que resulta en una mejora de la flotación. Otra posibilidad es mezclar el espumante con la emulsión de aceite promotor (fuel-oil, gas-oil, etc.) conteniendo la amina. Con esta combinación de reactivos han logrado flotar muy bien tanto las partículas gruesas de silvita como las finas, en columnas cortas de flotación y también en celdas con aireación

mecánica. Los mejores espumantes resultaron ser metil-iso-butil-carbinol (MIBC) y hexanol.

En general, en este tipo de separaciones se trabaja a temperaturas entre 20 y 35° C. Los cambios de temperatura alteran el equilibrio y la performance de las aminas que desciende con el aumento de temperatura, siendo el intervalo de 15 a 25° C el que permite la mayor selectividad (Sarquís y González, 2000). Según Alonso *et al.* (1990) la recuperación de silvita disminuye con el aumento de temperatura debido a que la solubilidad del colector aumenta en esa dirección. Este hecho retrasa la formación del precipitado de cloruro amónico el cual colabora en cierto grado en la colección de silvita. Para los colectores de cadena larga y mayor grado de saturación prácticamente no se observa variación con la temperatura porque las aminas saturadas forman precipitados con mayor facilidad que las menos saturadas. El contenido de insolubles en el concentrado también disminuye al aumentar la temperatura a causa del aumento en la solubilidad del colector.

Sarquís y Lenzo (1994) estudiaron el efecto de la temperatura en la adsorción de las aminas sobre el cloruro de potasio. Encontraron que a temperaturas muy bajas (alrededor de 5° C), la adsorción del colector sobre silvita es menor porque la disolución del mismo en la pulpa es menor.

Por otra parte se estudió el efecto del pH en la colección, regulado con agregados de ácido clorhídrico o de hidróxido de sodio. Por encima

de pH= 9 cae abruptamente la recuperación de silvita, la ley en el concentrado y también la selectividad. Esto se debe a que entre pH= 4 y pH= 7 el colector se encuentra enteramente como  $\text{RNH}_3^+$  que es la especie que se adsorbe y que actúa selectivamente. A pH= 10, el 80% de la amina se encuentra ionizada y a pH= 11 solamente el 30%. Otro efecto que explicaría lo observado a pH alcalino es la disminución abrupta del ángulo de contacto (Alonso *et al.*, 1990).

Sarquís y Lenzo (1994) prepararon una pulpa al 20% de sólidos formada con sales molidas y salmuera saturada en halita y silvita. Luego acondicionaron con un floculante sintético y una goma como agente inhibidor de ganga. En su trabajo, Sarquís y González (2000), trabajaron con una muestra sintética y otra de sal recristalizada, utilizando una poliácridamida como floculante y un derivado de la goma guar para enmascarar las lamas, un colector y un espumante. En estas condiciones obtuvieron una concentración de mayor ley para el mineral sintético ya que el mineral recristalizado ocluye impurezas.

Alonso *et al.* (1990) estudiaron el efecto de iones contaminantes y encontraron que todos disminuyen la ley del concentrado, siendo el efecto mayor para  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Fe}^{3+}$ . Dicha disminución se puede atribuir a la competencia entre estos iones y los cationes colectores por la superficie del mineral. Para la partícula de mineral el ión  $\text{NH}_4^+$  posee igual radio iónico y propiedades químicas que el colector  $\text{RNH}_3^+$ , pero no le confiere hidrofobicidad a su superficie. El  $\text{Fe}^{3+}$  es preferido para la adsorción debido a la mayor carga iónica, pero al pH de trabajo (pH= 8) no se encuentra disponible para competir con el ión amino. Quizás la deposición de cloruro férrico insoluble sobre el mineral que no es colectable por la amina utilizada explique la disminución de la ley del concentrado de silvita.

En los últimos años se ha desarrollado un nuevo proceso industrial, llamado flotación inversa de carnalita, la cual se puede obtener como producto de la flotación de halita, para esta última se utilizan colectores catiónicos como alquilmorfolinas. Se ha estudiado la posibilidad de aumentar la eficiencia de operación y disminuir el consumo de la alquilmorfolina. También, se ha discutido la posibilidad de la flotación de halita en beneficio de los minerales de potasio. Los resultados de la investigación demostraron que de esta forma disminuyen los costos de producción de carnalita (Titkov *et al.*, 2003).

### 2.2.7. PURIFICACIÓN DE LOS CONCENTRADOS DE FLOTACIÓN

Como el concentrado final de cloruro de potasio contiene usualmente partículas finas de cloruro de sodio libres e inclusiones en la red cristalina, se obtienen leyes bajas que pueden ser mejoradas con dos etapas de lixiviación, para cada etapa se utiliza agua o salmuera preparada con sal de alta ley (Sarquís y González, 2000).

### 2.2.8. OBTENCIÓN DE SALES DE POTASIO A PARTIR DE SALMUERAS

La producción de potasio a partir de depósitos de salmueras es un proceso más complejo que la flotación de KCl-NaCl con alquilaminas, debido a que durante la concentración de las salmueras para producir productos de potasio cristalizan distintas sales complejas de potasio. Los procesos deben optimizarse y delinarse para cada tipo de salmuera.

En las salmueras concentradas que contienen carnalita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) y cloruro de sodio, el cloruro de magnesio es precipitado por cristalización, quedando silvinita, la cual precipita en una posterior cristalización. Luego se flota para separar el KCl del NaCl (Miller y Yalamanchili, 1994).

Foot *et al.* (1984) propusieron la recuperación de potasio a partir de salmueras de proceso y salmueras residuales utilizando un método de evaporación solar y flotación. Los resultados demostraron que la recuperación de potasio a partir de ambos tipos de salmueras es técnicamente factible y que este proceso puede ser adaptado a plantas ya existentes.

Primero se realizaron ensayos de evaporación y flotación a escala laboratorio y basados en estos resultados; los recipientes de evaporación solar a gran escala fueron construidos para producir suficiente evaporita tipo sulfato para la posterior flotación en un proceso continuo. La evaporación solar de 10.000 gal de salmuera residual, produjo una evaporita conteniendo 24,5% de schoenita, 20% de silvita y 51,5% de halita, fue recuperado más del 99% del potasio en la evaporita. De la flotación se recuperó más del 95% de potasio en concentrados de schoenita y silvita conteniendo 28 y 62,3% de  $\text{K}_2\text{O}$ . Los concentrados de silvita constituyen

un producto comercializable, pero la schoenita debe ser convertida a  $K_2SO_4$ .

ser convertida a sulfato de potasio según:

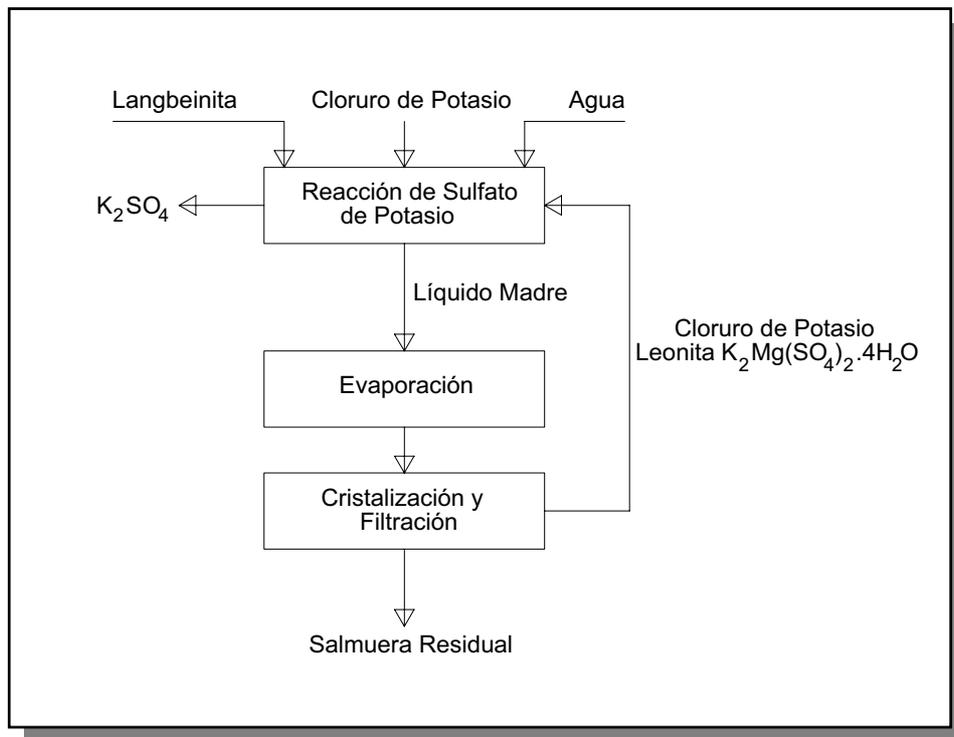


### 2.3. PROCESAMIENTO DE SULFATO DE POTASIO

#### 2.3.1. A PARTIR DE LANGBEINITA

Importantes depósitos de langbeinita ( $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ ) se pueden encontrar en Nuevo México, Estados Unidos. La langbeinita puede

El mineral también contiene halita y cantidades variables de silvita e insolubles, de los cuales se puede aislar por separación gravitacional, flotación y disolución de halita, dando varios tamaños de cristal. La fracción fina de langbeinita se hace reaccionar con cloruro de potasio para producir sulfato de potasio. El proceso se esquematiza en el siguiente diagrama:

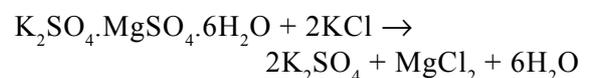


(Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

#### 2.3.2. A PARTIR DE SALMUERAS NATURALES

La salmuera de algunos lagos (por ejemplo el Great Salt, en Estados Unidos) contienen una mezcla de sales simples, dobles e hidratadas, las cuales se separan y se convierten en general en sulfato de potasio. Por ejemplo, las sales dobles schoenita ( $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$ ) y kainita ( $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$ ) pueden separarse por flotación con colectores tipo amínicos y carboxílicos. La schoenita (con carga superficial positiva) flota solamente con un colector aniónico como el laurato de sodio, y si se quiere

flotar kainita, la cual tiene una superficie negativa, se hace con un colector catiónico tipo amina. No se produce la flotación de schoenita ni kainita cuando la concentración del colector está por debajo de su límite de solubilidad. Después de recuperar la schoenita ( $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$ ) como concentrado de flotación, se la hace reaccionar con silvita para producir sulfato de potasio por cristalización controlada:



(Miller y Yalamanchili, 1994; Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

### 2.3.3. OTROS PROCESOS DE OBTENCIÓN

#### Calcinación de alunita

Por calentamiento a 800-1000° C, la alunita ( $K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 4Al(OH)_3$ ), ésta se descompone con liberación de trióxido de azufre para formar una mezcla de alúmina y  $K_2SO_4$ . Este último puede ser extraído de la mezcla (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

#### Cristalización extractiva

Taboada *et al.* (2003) estudiaron la cristalización de sulfato de potasio por enfriamiento de 50 a 10° C de una solución saturada y también por “salting out”, por adición de 1-propanol a la solución acuosa del sulfato de potasio en un proceso isotérmico a 25° C. En ambos casos se utilizó como reactor un cristizador automatizado con control de la temperatura. El agregado de un segundo solvente, cambia las condiciones del equilibrio de fases y a su vez, el cambio en las propiedades físicas del medio puede producir cambios en el tamaño y forma de los cristales obtenidos. En estudios anteriores utilizando acetona, como segundo solvente, se comprobó que el sulfato de potasio cristaliza en esas condiciones en una forma distinta a la obtenida por el método de enfriamiento y que tanto la velocidad de nucleación como el crecimiento de los cristales depende de la concentración de acetona en la solución. En la cristalización por enfriamiento, los cristales de sulfato de potasio tuvieron: 7% de aglomeración, 8,5% de humedad y diámetro medio 0,27 milímetros. Por “salting out” utilizando 1-propanol, los valores fueron: 28% de aglomeración, 9-10% de humedad y diámetro medio 0,79 milímetros.

#### Por flotación

Hancer *et al.* (1997) estudiaron la flotación de sulfato de potasio con aminas. A través de mediciones de movilidad electroforética determinaron que el signo de la carga superficial de sulfato de potasio, es negativa. Flotaron la sal a 26° C (a esta temperatura, el sulfato de potasio es estable) con dodecilamina. Se encontró que el

sulfato de potasio es flotado antes de la precipitación del colector. Supusieron la adsorción de la amina protonada ( $RNH_3^+$ ) por intercambio con cationes  $K^+$ , intercambio que es facilitado por la carga negativa de la superficie de la sal. Así, la superficie del sulfato de potasio fue hidrofobizada antes de la precipitación y adsorción del colector por heterocoagulación.

## 2.4. PROCESAMIENTO DE CLORURO DE SODIO

### 2.4.1. INTRODUCCIÓN

La recuperación de cloruro de sodio o halita (llamado comúnmente sal) de la naturaleza se ha practicado desde tiempos remotos. Se obtiene a partir de dos fuentes: salmueras y sal de roca. Las salmueras pueden dividirse en dos clases: agua de mar y aguas continentales (donde se encuentran las salinas) y se deben diferenciar según la concentración de sal que posean, porque de eso depende la elección del método de procesamiento. La recuperación de sal de agua de mar se limita a zonas donde el clima es seco y cálido.

Para salmueras naturales de baja concentración los métodos empleados para la recuperación de cloruro de sodio son: procesos de concentración solar o por viento y concentración por enfriamiento. Para aquellas de concentración alta se utilizan otros métodos industriales de recuperación.

El cloruro de sodio sólido o sal de roca, que se extrae como tal por el método de cámaras y pilares (ver capítulo 1) a partir de depósitos subterráneos o superficiales, es triturada, tamizada para separar los finos, ensacada, palletizada y preparada para el consumo, quedando el producto con una pureza del 96% ó más.

Por otra parte, la sal de roca que es extraída formando salmueras artificiales (*solution mining*) por inyección de agua en el depósito, que contienen un 25% m/m de sal, es bombeada a la superficie y evaporada, al igual que en el caso de las salmueras naturales de alta concentración, por calentamiento con fuego directo o con vapor.

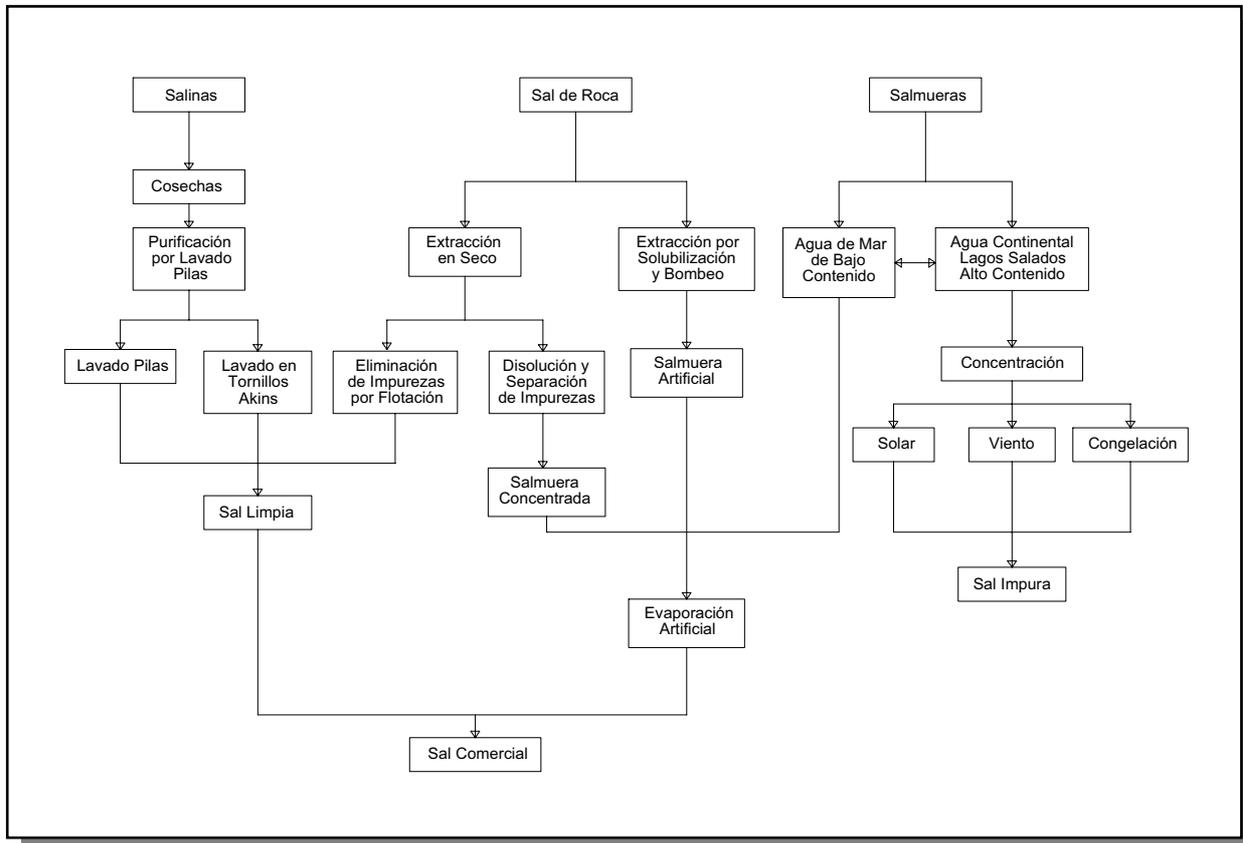
Los salares son depósitos de sales sólidas impregnados por salmueras complejas saturadas

en cloruro de sodio con contenidos variables de boratos, sales de calcio, potasio, magnesio, litio y sulfato de sodio.

También se recupera halita como subproducto en la explotación de cloruro de

potasio (silvita) (Cole, 1930; Alurralde *et al.*, 1988; [www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org)).

El siguiente esquema resume los distintos métodos para el procesamiento de cloruro de sodio según su procedencia:



### 2.4.2. MÉTODOS ARTESANALES PARA LA CONCENTRACIÓN DE SALMUERAS DE BAJA LEY

#### Concentración solar

La sal obtenida por este método se denomina “sal solar”. El exceso de agua en salmuera natural de lagos o del mar es removido por el calor natural del sol y por la acción del viento.

Los requisitos naturales para la producción de sal solar son:

a) condiciones climáticas: bajas precipitaciones anuales, gran cantidad total de viento moderado, temperatura elevada, humedad relativa baja.

El factor más importante para lograr una alta evaporación es la baja precipitación pluvial, el segundo factor a considerar es la cantidad de viento total.

Se necesitan grandes cantidades de viento total, con un mínimo de períodos de altas velocidades debido a que ocasionan daños a los bordes de los estanques. El viento barre la capa de aire en contacto con la superficie del agua contenida en las piletas permitiendo la rápida evaporación. Los cristales de sal más grandes se obtienen durante la noche, cuando tiene lugar la saturación por enfriamiento y también en los días calurosos debido a la mayor evaporación.

b) el terreno: debe ser naturalmente compacto e impermeable. El fondo de las piletas debe ser de barro razonablemente plano y nivelado, con bordes de contención resistentes a la erosión causada por las olas.

En las últimas piletas, llamadas cristalizadores, el fondo debe ser muy firme de manera que permitan el empleo de maquinarias sin que se hunda ni ocasione alteraciones de la sal durante su recolección, para ello se aplica un

suelo cemento e incluso es conveniente dejar sin recolectar una capa de sal

c) transporte: económico. La producción en lugares aislados, aunque fuese ideal desde el punto de vista climático, puede resultar menos económica al tomar en cuenta el transporte. Debe haber buenos caminos de acceso desde el sitio de recolección de la sal a la ciudad y a los lugares de consumo (Richards, 1960; Leutz, 1973).

### **Mecánica de trabajo de las piletas**

En el agua de mar la halita constituye el 77% en peso del contenido de minerales disueltos, el resto consiste mayoritariamente en iones calcio, magnesio y sulfato. Esto representa un 2,7% m/m de halita en agua de mar. Una vez iniciada la evaporación, la sal comienza a cristalizar cuando se alcanza un contenido de halita del 25,8% m/m ([www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org)).

El proceso consiste en una serie de piletas de decantación, concentración y cristalización.

Las piletas de decantación son de tamaño más grande que las de concentración y cristalización y deben estar situadas a nivel intermedio entre los niveles de marea alta y marea baja del océano, de manera que la entrada de agua de mar pueda efectuarse mediante compuertas de marea, para reducir al mínimo el bombeo. El agua de mar entra en las piletas de decantación, aquí tiene lugar una pequeña evaporación pero principalmente sedimentan las impurezas suspendidas en el agua, luego fluye al resto del sistema por gravedad.

Las piletas de concentración están colocadas en forma consecutiva de manera que la salmuera concentrada en la primer pileta fluya hacia la segunda, y así sucesivamente por compuertas de tabloncillos móviles. Para mejorar el flujo y no disminuir la eficiencia de la evaporación por viento se recomienda que haya unos 5 a 8 centímetros de diferencia de nivel entre estanques. En estas piletas, la salmuera permanece hasta que alcanza una gravedad específica de 1,208; que es cuando la salmuera está prácticamente saturada en cloruro de sodio. En estas piletas precipita la mayor parte del sulfato de calcio presente en la salmuera. Cuando los cristales de sal de la última pileta de concentración comienzan a formarse, la salmuera fluye por gravedad a las piletas de cristalización,

que están dispuestas en paralelo. En éstas se forma una capa de sal de unos 10 a 25 cm de espesor y puede ser removida mediante maquinarias o en forma manual (Cole, 1930; Richards, 1960).

Cuando quedan unos pocos centímetros de profundidad en la pileta, la práctica demuestra que la saturación no puede alcanzarse a esa profundidad de salmuera remanente por que los suelos de arcilla que obturan el fondo de la pileta están inicialmente saturados con salmuera débil (proveniente del mar). Hasta que la pileta llegue a su madurez, las arcillas del fondo seguirán difundiendo salmuera débil dentro de la solución más concentrada. Este proceso crea un estado de salmuera saturada inestable que virtualmente imposibilita una precipitación de sal. La primera sal que se forme probablemente será disuelta de nuevo por la salmuera débil original que puede provenir de las arcillas del fondo. Por ello las piletas de evaporación nuevas requieren más de cinco años para alcanzar su madurez. Pasado este período, se alcanza un nivel de funcionamiento tal que durante la evaporación la salmuera varíe de 3 a 27 grados Baumé, esta última es la que da lugar a la precipitación de sal en las piletas de cristalización. Es conveniente mantener la densidad de las aguas madres por debajo de los 29 grados Baumé debido a que más allá de ese límite algunos sulfatos comenzarían a precipitar, contaminando la sal que ya había precipitado.

Está comprobado que a medida que la salmuera se concentra, la evaporación procede a una velocidad mucho menor. Se obtienen aproximadamente 2,5 cm de sal por cada 12 cm de agua madre evaporada. La evaporación debe reducir el volumen del agua de mar a casi un doceavo del volumen original mientras dura el proceso (Richards, 1960).

Cuando la temporada de evaporación termina se quitan las aguas amargas de las piletas. Éstas contienen altos porcentajes de cloruros de calcio y magnesio y cantidades variables de cloruro de potasio. Estas sales son más solubles que el cloruro de sodio y por lo tanto permanecen en solución durante la precipitación del mismo. La sal depositada en las piletas de cristalización es cosechada manualmente o mediante máquinas y dejada en montículos dentro de las mismas (Cole, 1930).

También se recupera por este método cloruro de sodio a partir de salmueras concentradas presentes en los niveles freáticos, en Salinas y

Chaparoto, Ecuador. Se cavan piletas de forma rectangular con fondo variable, el ancho es de 2 a 30 metros y el largo de 10 a 70 metros. La profundidad depende del nivel de la salmuera bajo tierra, pero varía entre 1 y 3 metros. El agua freática sube de nivel de manera natural en la tierra durante ciertos períodos del año e inunda el piso hasta una profundidad de unos cinco a diez centímetros. Después de varios meses el nivel de la salmuera vuelve a bajar y el contenido de la pileta se evapora hasta quedar seca. Esto permite que la recolección de la sal sea cómoda. Desde el punto de vista de la pureza química, el agua madre que queda luego de la precipitación de sal debería retirarse antes, ya que contiene impurezas disueltas que, cuando la pileta se seca, precipitan y son cosechadas junto con la sal. Por esta razón se excavan zanjas al costado de la pileta, de mayor profundidad que ésta para reponer salmuera sobre el piso de la misma impidiendo que se seque (Richards, 1960).

### **Purificación de la sal cosechada**

La cosecha se realiza por lo general una vez al año y la sal se almacena para su posterior purificación. Las principales impurezas de la sal solar son los sulfatos de calcio y magnesio, y el cloruro de magnesio. La purificación consiste en una molienda preliminar y lavado con salmuera limpia preparada con sal pura. También puede utilizarse agua de mar para el lavado, pero con ella aumentan las pérdidas de sal por disolución. La sal lavada se almacena para el secado (por escurrimiento) y posterior traslado. En general la sal obtenida por este método no posee la pureza requerida para consumo humano (Cole, 1930; [www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org)).

En Ecuador se ha refinado la sal disolviéndola en agua dulce, en un tanque de concreto. Las sustancias insolubles remanentes caen al fondo del tanque por gravedad y se agregan coagulantes para quitar otras impurezas. La salmuera tratada es bombeada hacia recipientes abiertos de evaporación donde cristaliza sal de buena calidad que se desprende de la salmuera. El producto se recoge raspando los recipientes manualmente, se lo traspasa a recipientes secos donde se vuelve a calentar para el secado. En promedio se obtiene una sal con 95,06% de NaCl.

El lavado de la sal también elimina el color rosado que en ocasiones tiene la sal a causa de bacterias cromogénicas que sobreviven los 30

grados Baumé.

Dependiendo del uso que se le pretende dar a la sal cosechada, se la tritura, tamiza y seca en hornos o en secadores de lecho fluidizado y habitualmente la sal solar es utilizada, para regenerar ablandadores de agua ([www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org)).

### **Concentración por viento**

Esta forma de concentración de salmueras es factible en ciertas regiones y ciertas épocas del año.

La salmuera se concentra en recintos llamados “casas”, éstas deben ser construídas en la dirección del viento de la región, las paredes son de madera, con techo para aislar la lluvia y con aberturas laterales enrejadas para permitir la circulación de aire. Sobre la casa se encuentra el reservorio de salmuera de baja concentración y se la deja fluir muy lentamente por las paredes de la construcción, las cuales están expuestas al sol y al viento, hasta una cuba situada en el piso, finalmente es bombeada al reservorio. Este procedimiento debe repetirse frecuentemente, más o menos dependiendo de la concentración de la salmuera original. La salmuera obtenida debe alcanzar la suficiente concentración como para que posteriormente se la concentre por alguno de los métodos de evaporación artificial (Cole, 1930).

### **Concentración por congelamiento**

Por enfriamiento de una solución de cloruro de sodio con concentración lejana a la del punto eutéctico, como el agua de mar y las salmueras de baja concentración, se separará hielo quedando una solución mucho más concentrada en la sal. Es así como la salmuera es sometida a sucesivos congelamientos parciales, hasta que se alcanza una concentración tal que pueda utilizarse luego un método de evaporación artificial. La aplicación de esta técnica es posible en zonas de clima seco y de una temperatura constante inferior al punto de congelamiento (Cole, 1930).

## **2.4.3. MÉTODOS INDUSTRIALES DE CONCENTRACIÓN DE SALMUERAS**

### **Evaporación por calentamiento directo**

La concentración de salmueras por calentamiento directo se puede realizar mediante dos procesos:

- Proceso “Kettle”: es uno de los primeros métodos desarrollados, consiste en evaporar la salmuera en grandes contenedores metálicos dispuestos en fila sobre fuego directo. La dificultad que presenta es que al no ser uniforme la temperatura recibida en los diferentes contenedores no es posible obtener una uniformidad en la calidad de la sal.

- Proceso “Pan”: es mejor que el anterior y se lleva a cabo en un gran plato (de dimensiones aproximadas: 20 metros de largo, 10 de ancho y 5 de profundidad) ubicado sobre dos paredes con un sitio para calentamiento en un extremo y una chimenea en el otro. De dos a cuatro de estos platos se colocan en bloque y se utiliza un cañón de chimenea común. En cada plato se obtienen dos grados de sal: fina en la parte más cercana al fuego, y gruesa en la zona más alejada del mismo, donde la evaporación es mucho más lenta (Cole, 1930).

### Evaporación con vapor

El calor para la evaporación es suministrado por vapor circulando por tuberías. Existen principalmente tres variantes:

- Camisa de vapor: que rodea los contenedores o platos y por donde circula el vapor. Este método produce una temperatura constante en el evaporador y por lo tanto se obtiene un producto de pureza más uniforme que en el caso de métodos con fuego directo.

- Sistema Grainer: de costo inferior al anterior, consiste en un recipiente grande poco profundo de diferentes formas y en el cual se colocan tuberías, en el fondo por donde circula vapor que eleva la temperatura de la salmuera. Los recipientes se construyen de madera, cemento o acero y son un poco más grandes que los platos utilizados en el proceso “Pan” (Cole, 1930).

- Evaporación al vacío: más económico que el de camisa de vapor. Al disminuir la presión sobre la superficie de la salmuera, también lo hace el punto de ebullición de la misma, con gran ahorro de calor.

Con pocas variaciones entre sí, en general todos los evaporadores constan fundamentalmente de cuatro partes:

a) cámara de evaporación y condensación: el cuerpo del evaporador puede ser construido de acero, hierro fundido ó cobre, generalmente de forma circular y la parte superior en forma de cono. La altura de estas cámaras varía con el diámetro y son construídas lo suficientemente altas para evitar el derrame de salmueras por formación de espumas.

b) el intercambiador de calor: puede ser diseñado de dos maneras. En una, el calentador está ubicado entre la cámara de evaporación y el fondo cónico, consta de tubos verticales de cobre de 2 a 4 pulgadas de diámetro, colocados de forma tal que permiten la libre circulación de la salmuera entre la cámara de evaporación y el fondo cónico. El vapor condensado es retirado por la parte inferior del intercambiador de calor. En la otra, el vapor pasa por tubos colocados en espiral, (a través de los cuales la salmuera también tiene libre circulación), y dispuestos de manera tal que no impidan el descenso de la sal formada por el fondo cónico; con este tipo de calentadores se requiere un diseño especial para eliminar adecuadamente el condensado. Las incrustaciones sobre las superficies disminuyen la eficiencia de evaporación y es recomendable que el calentador sea removible ó de fácil acceso para la limpieza del mismo.

c) fondo: en forma de cono para que la sal precipitada caiga rápidamente.

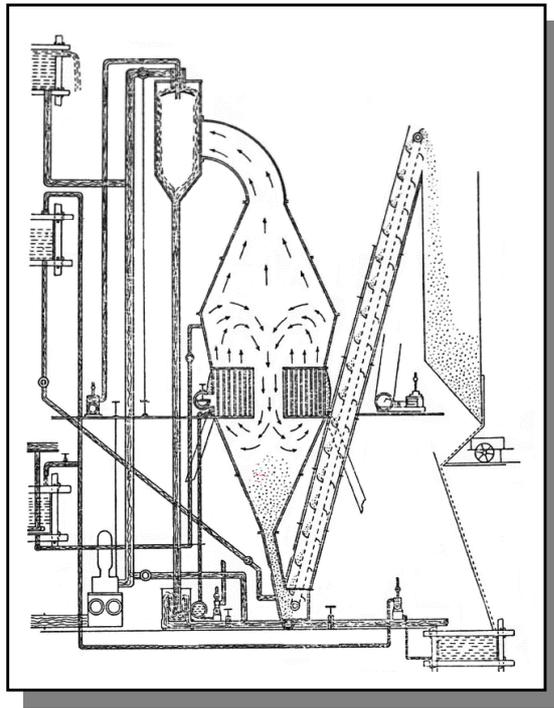
d) filtro de sal: conectado con el cono por medio de una válvula que es cerrada cuando el filtro está lleno, para retirar la sal sin detener la operación en el evaporador. A veces se colocan dos filtros en paralelo, uno funcionando y otro en stand by, para evitar que el fondo cónico se obstruya. Los cristales también se pueden remover conectando directamente el fondo del cono con una bomba centrífuga, la mezcla de sal y salmuera que es lavada para eliminar impurezas, luego es filtrada y secada (Cole, 1930). El producto resultante es llamado sal fina que puede ser refinado aún más. El procesamiento final involucra tamizado y remoción de impurezas metálicas. Luego se la puede iodar, hacer de libre flujo o compactarla en bloques o tabletas ([www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org)).

Estos evaporadores pueden ser de simple ó de múltiple efecto. El evaporador de simple

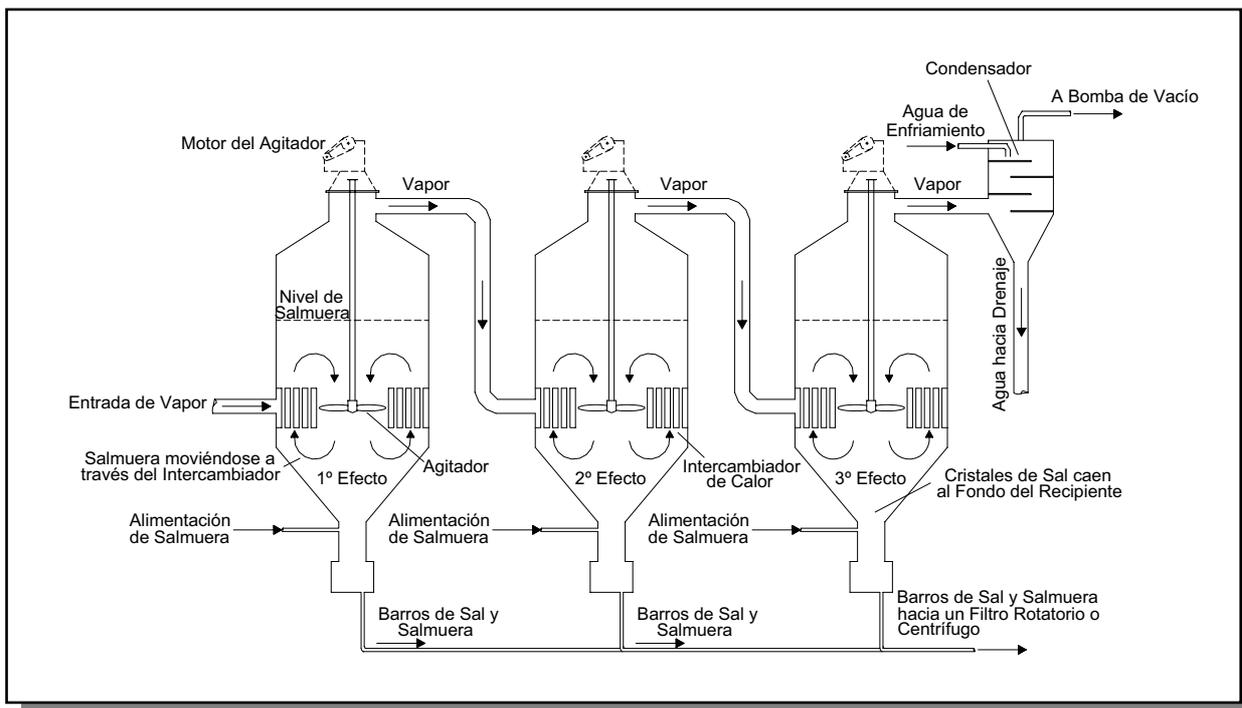
efecto consta de un único evaporador, mientras que el de múltiple efecto puede estar formado por dos o más evaporadores, dispuestos en serie, el vapor formado por la evaporación de la salmuera en el primer equipo de la serie es conducido a la cámara que calienta el segundo equipo y así sucesivamente hasta llegar al último de la serie. En cada equipo el vacío es creado

por la condensación del vapor en la cámara sucesiva. En la última unidad de la serie el vacío es generado por medio de una bomba, y el vapor proveniente del mismo es llevado a un condensador.

En las siguientes figuras se observan los esquemas de un evaporador de vacío de simple y triple efecto:



Evaporador de Simple Efecto (Cole, 1930)

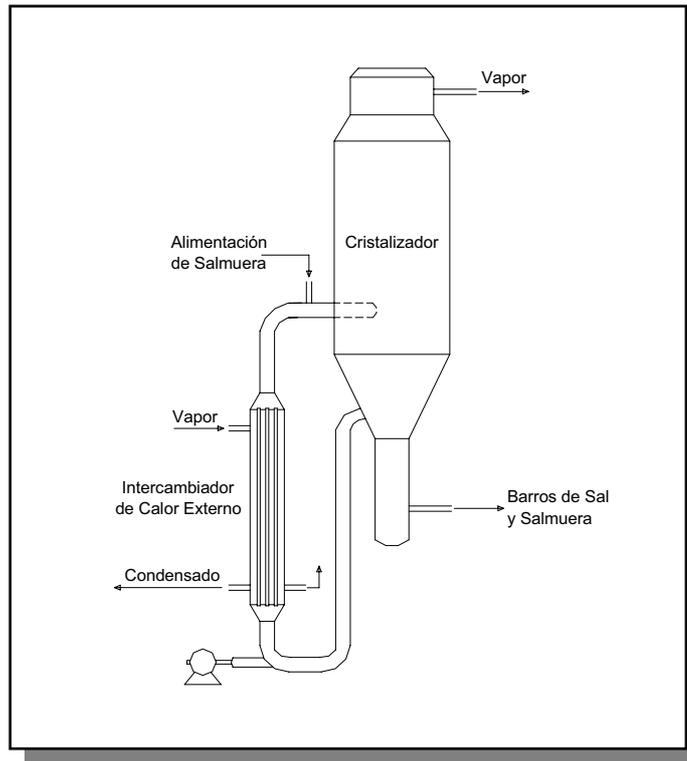


Evaporador de Triple Efecto (Cole, 1930).

La sal de mesa es típicamente producida en evaporadores de vacío, pero primero, la salmuera debe ser tratada químicamente para remover los minerales tales como sulfato de calcio y de magnesio, que pueden causar problemas en el equipo, y afectar la pureza del producto ([www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org)). Para reducir las incrustaciones en los intercambiadores de calor y recipientes, cuando se evapora la salmuera cruda,

el sulfato de calcio que precipita se deposita sobre los cristales de yeso y por lo tanto no forma una costra sobre la superficie de los calentadores ni sobre las paredes de los recipientes (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

Una variante del evaporador de vacío es el evaporador por recompresión de vapor con circulación forzada, que consta de cristalizador, compresor y lavador de vapor, y se esquematiza en la siguiente figura:



La salmuera de alimentación entra al recipiente de cristalización donde la sal es precipitada. El vapor es retirado, lavado y comprimido para volver a utilizarlo en el calentador. Estos evaporadores requieren una mayor cantidad de energía. La sal cristalizada se recupera por centrifugación o al vacío, y luego es secada en horno o secadores de lecho fluidizado hasta un contenido de humedad del 0,05% o menos ([www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org)).

En general los equipos más usados pueden ser de tres diseños diferentes:

a) tipo I: evaporadores con circulación forzada e intercambiador de calor externo. Son generalmente los más usados y producen un 50% de cristales cúbicos de tamaño  $> 400 \mu\text{m}$ .

b) tipo II: evaporadores con intercambiador de calor interno y una bomba en la cañería central para producir la fuerza de circulación. Producen

un 50% de cristales cúbicos con esquinas redondeadas de tamaño  $> 650 \mu\text{m}$ .

c) tipo III: cristalizadores Oslo, donde la salmuera recirculada y la salmuera fresca son calentadas en un intercambiador de calor y evaporadas. La salmuera sobresaturada de cristales libres descende por una cañería y entra en la parte inferior del cristalizador, la cual asciende hacia el lecho de cristales. Forman productos granulares de partículas esféricas ó lenticulares de 1 a 2 mm de tamaño.

La elección del equipo depende del tamaño de cristales deseados. Los cristales de sales con formas especiales pueden producirse por adición en el equipo de evaporación, de sustancias que actúen sobre el crecimiento del cristal en la salmuera. Estas sustancias pueden ser ácido nitrilotriacético, nitrilotriacetamida, hexametáfosfato de sodio, etc. (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

### Cristalización extractiva

A pesar de ser eficientes, la cristalización de sales en evaporadores de múltiple efecto o por recompresión de vapor sigue siendo un proceso energéticamente intensivo. Para reducir los costos de energía involucrados en la obtención de sales a partir de sus soluciones concentradas, puras o en presencia de otras sales contaminantes la cristalización extractiva permite la precipitación selectiva de las mismas sin necesidad de evaporar agua. Es sabido que la adición de un solvente orgánico a una solución acuosa puede reducir la solubilidad de muchos solutos inorgánicos. El manejo de las curvas de miscibilidad/inmiscibilidad de distintos solventes orgánicos en agua permite la cristalización total de las sales y/o selectiva de una de ellas a partir de su solución acuosa. La sal puede cristalizar porque parte del agua se solubiliza en la fase orgánica, resultando en una disminución del agua disponible para los solutos (quedando la fase acuosa sobresaturada y procediendo la precipitación), o porque el agregado de una cierta cantidad de solvente orgánico totalmente miscible en agua resulta en una disminución de la solubilidad de la sal en la solución (por disminución de la constante dieléctrica de la mezcla agua-solvente orgánico), con la consecuente precipitación de la misma. En algunos casos, ambos mecanismos se dan simultáneamente.

La temperatura a la cual se realiza este proceso debe ser seleccionada adecuadamente teniendo en cuenta:

a) las curvas de solubilidad en agua vs. temperatura tanto para la sal que se quiere separar por precipitación como para la sal que se considere la impureza a separar.

b) la curva de solubilidad mutua agua-fase orgánica vs. temperatura.

c) la curva de equilibrio fase orgánica-agua-sal.

La sal precipitada se separa por decantación, centrifugación o filtrado y la fase orgánica es regenerada (por cambio de la temperatura hasta aquella donde las dos fases se vuelvan inmiscibles y se separan, o por destilación) para ser retornada al proceso.

En su trabajo, Weingaertner *et al.* (1991), detallan el efecto de las variables del proceso, afirmando que los solventes orgánicos más promisorios para este tipo de separaciones son compuestos oxigenados como los alcoholes y evalúan el uso de 1-butanol y 1-propanol para la obtención de carbonato de sodio anhidro de alta densidad. Los mismos autores detallan los estudios realizados para cristalizar cloruro de sodio utilizando distintos tipos de aminas, encontrando los mejores resultados cuando se utiliza diisopropilamina a  $T = -5^\circ$  centígrados.

Ting *et al.* (1992) estudiaron el uso de N,N-dietilmetilamina para la cristalización extractiva de cloruro de sodio a  $T = 5-10^\circ$  C y de sulfato de sodio a  $T = 21-25^\circ$  C (que precipita como decahidrato).

#### 2.4.4. PURIFICACIÓN DE SAL: OBTENCIÓN DE SAL DE ALTA Y MUY ALTA PUREZA

La impureza más persistente para la sal en la naturaleza es el sulfato de calcio. En la sal de roca el sulfato de calcio es encontrado como anhidrita, hemihidrita o polyhalita. En sal proveniente de lagos o del mar se encuentra yeso como impureza.

En los últimos años se ha implementado en varios yacimientos de la región pampeana y en el noroeste de la Argentina el proceso de lavado artificial de las sales de cosecha. Utilizando tornillos lavadores/clasificadores (tornillo AKINS). El proceso consiste en el lavado del mineral emparvado o de piletas, con salmueras de la misma salina o de napas subterráneas. Los objetivos de esta metodología son: eliminación de los sulfatos de potasio y magnesio, acortamiento de los tiempos de acopio, comercialización rápida del producto y mejora de la calidad del producto final (Schalamuk *et al.*, 1999). Muchos emprendimientos mineros procesan las sales amargas residuales para obtener subproductos tales como sales de magnesio, potasio, bromo, etc.

En la actualidad existen métodos de explotación mixta, donde se combinan operaciones propias de la extracción de sales con otras llevadas a cabo en plantas industriales. Los tratamientos se efectúan sobre la sal de cosecha, aguas madres o en costra permanente de los

cuerpos salinos. Este tipo de metodología se utiliza para la obtención de sal para consumo humano que requiere un grado de purificación mayor. El proceso debe incluir el lavado de la sal para eliminar las impurezas y secado a 180° C para eliminar las bacterias halófitas. El último paso es el agregado de iodo.

La sal solar obtenida por evaporación en piletas (ver 2.4.2. Métodos artesanales para la concentración de salmueras de baja ley) es cosechada junto con las aguas madres que contienen impurezas solubles en altas concentraciones. El material cosechado se almacena en parvas donde ocurre la llamada purificación natural. La parva, contiene aire de donde es absorbida la humedad (por parte del cloruro de magnesio de la superficie de los cristales) que disolverá cloruro de sodio. Como la sal no puede mantener más de un 3% de humedad en equilibrio, el agua va descendiendo por la parva y se va disipando en el suelo llevándose sal e impurezas solubles. Las pérdidas de sal por este motivo son del 10 al 12%. La humedad de la sal cae del 3 al 1% en un lapso de seis meses con la consecuente disminución del contenido de impurezas solubles hasta un valor constante.

Debido a las variaciones de temperatura y humedad, en la sal de la parva se produce una micro-recristalización sobre la superficie de los cristales. Las grietas llenas de líquido madre son selladas por cloruro de sodio. El lavado remueve impurezas superficiales y el secado la humedad superficial, pero no son removidas las impurezas atrapadas en los cristales, las cuales son liberadas por molienda (Sedivy, 1996). Por acción del agua de lluvia y la temperatura, la parva se purga en sulfatos y otras impurezas (Schalamuk *et al.*, 1999). Los sulfatos funden a 32,4° C en su propia agua de cristalización, se licúan y descienden por gravedad. El residuo cristaliza como “plumita” ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), que es un polvo blanco muy fino el cual no puede volver a disolverse. El exudado, compuesto por sulfatos de sodio y magnesio, es conocido como salitre (Cordini, 1967).

El refinado convencional de la sal es la cristalización al vacío. Con este método se obtienen los más altos estándares de calidad de sal, pero el método es costoso (Sedivy, 1996).

El proceso de recristalización es apropiado para producir una sal medianamente pura a partir de sal fina o de salmuera residual. La recristalización se realiza debido a que la solubilidad del sulfato

de calcio en la salmuera disminuye con el aumento de la temperatura, mientras que la del cloruro de sodio aumenta con el incremento de la misma. El proceso consiste en tres etapas:

a) disolución: la sal fina se disuelve con la solución madre del evaporador y calentada a 105° C en un tanque de disolución haciendo circular vapor dentro del mismo, pero no el sulfato de calcio, debido a que la salmuera de la solución madre está saturada con sulfato de calcio.

b) filtración: se realiza para extraer el sulfato de calcio y otras impurezas sólidas provenientes de la salmuera.

c) cristalización: la salmuera limpia es bombeada al cristalizador, donde tienen lugar una expansión, evaporación y enfriamiento. Los cristales de sal son removidos del evaporador y la solución madre es recirculada al recipiente de disolución (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

Krebs Swiss ha patentado una serie de procesos innovadores y económicos para remover las impurezas de sal utilizando menos cantidad de agua, y recuperando la sal disuelta para reducir las pérdidas, logrando una sal de muy alta pureza. De acuerdo al tipo de impureza han patentado distintas secuencias de las unidades de operación, llamando a esos procesos SALEX-B, SALEX-C, SALEX-M, etc. Los fundamentos de estos procesos son los siguientes:

- Remoción de impurezas solubles: la remoción por pulverizado de salmuera ó agua sobre una capa de sal ó pila tiene la desventaja de que el flujo de salmuera desciende formando canalizaciones, que limitan la eficiencia del proceso. Si a la sal se la sumerge completamente en la salmuera para disolver el magnesio, es necesario un tiempo prolongado para que éste abandone las grietas de los cristales por difusión. Para obtener una mejor purificación se necesita una salmuera muy pura que es obtenida por disolución de la misma sal en agua y esto produce pérdidas. Las pérdidas pueden ser reducidas con el reciclado de la salmuera, pero de esta forma no se logra una alta pureza. Para resolver estos inconvenientes se aprovechan los finos de sal para obtener una salmuera saturada pura. Luego se deja fluir, lentamente la salmuera hacia arriba,

y en contracorriente hacia abajo, caen los cristales de sal, que son completamente rodeados por la salmuera pura y así las impurezas solubles y las que se encuentran atrapadas en las grietas tienen tiempo para disolverse. La densidad de la salmuera que asciende aumenta porque se va haciendo más rica en magnesio y la superficie de la sal que desciende es más pura. Las pérdidas de sal son reducidas porque la sal que se encuentra en el flujo ascendente de salmuera, cristaliza sobre los cristales que descienden. Este método es llamado hidroextracción.

- **Remoción de impurezas insolubles:** Cuando una lluvia de salmuera es pulverizada sobre una capa de sal, ésta puede lavar los finos insolubles que escurren hacia abajo, pero la misma sal actúa como un filtro y las impurezas pueden quedar retenidas cuando la sal es demasiado fina. Esto explica el porqué de la ineficiencia de este tipo de lavado para la remoción de insolubles. Para solucionar esto, la salmuera es forzada a fluir en forma ascendente y los cristales de sal (de mayor tamaño que las impurezas); se fluidizan y descienden. Las partículas finas (de materiales insolubles) asciendan libremente y luego son desechadas. La velocidad de la salmuera es estrictamente controlada para remover sólo el tamaño de partículas al que corresponden la mayoría de las impurezas. Este método se llama elutriación e hidroclasificación.

- **Remoción de impurezas atrapadas entre los cristales:** para remover este tipo de impurezas es necesario moler selectivamente los cristales impuros, evitando la generación excesiva de sal fina por ruptura de cristales puros, aplicando la fuerza de ruptura de manera tal que se rompan los cristales en los planos donde el cristal es débil, debido a que allí se alojan las impurezas que quedan expuestas. Como la cantidad de finos creados por la ruptura es mínima se minimizan las pérdidas de sal. A éste método se lo llama ruptura selectiva y en general evita el uso de molinos de martillos. Luego las impurezas pueden ser eliminadas por elutriación.

En el proceso SALEX-M, una molienda en húmedo rompe los cristales en forma selectiva donde las impurezas están incrustadas de manera que quedan expuestas para la purificación. La técnica además mejora el color blanco de la sal, y provee a los cristales de una forma más

redondeada que les confiere mayor fluidez. Con sal solar natural y utilizando este proceso se alcanzó una pureza del 99,97% (Sedivy, 1996).

#### 2.4.5. PURIFICACIÓN DE SALMUERAS

La purificación de salmueras se realiza cuando es necesario utilizar para un determinado proceso una salmuera con un alto grado de pureza. Las principales impurezas son los iones calcio, magnesio y sulfato.

Las salmueras naturales están comunmente saturadas con sulfato de calcio. El agua de mar también contiene sulfato y cloruro de magnesio, a veces acompañado de cloruro de calcio. En aguas de lagos el sulfato de magnesio está acompañado usualmente de sulfato de sodio.

En la industria química una salmuera impura utilizada como reactivo, puede tener consecuencias serias, incluso letales. Algunos ejemplos de inconvenientes de este tipo son la producción de hidrógeno en celdas electrolíticas, ya que se puede formar una mezcla explosiva, formación de barro contaminados con mercurio en celdas de mercurio, difíciles y costosos de eliminar. Otro ejemplo es el caso del calcio y el magnesio que dañan irreversiblemente las membranas de intercambio iónico.

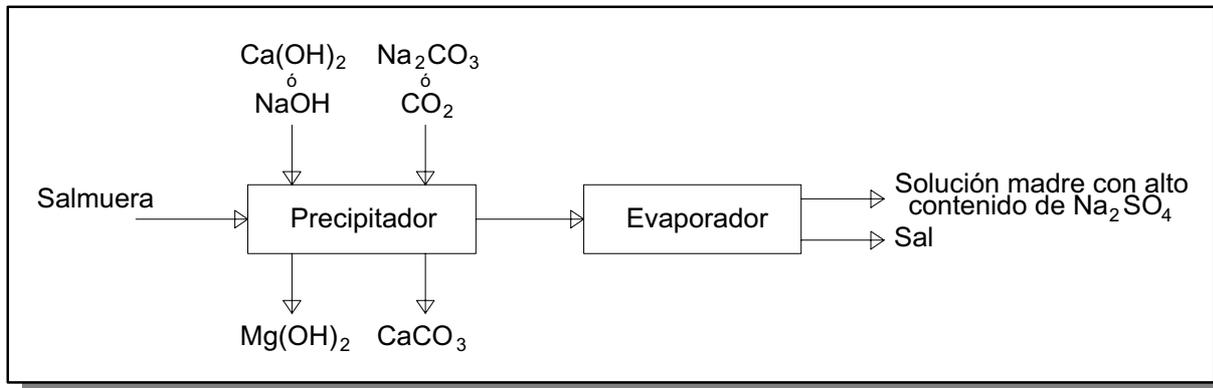
En las plantas de cloro-soda, se utilizan tres tecnologías distintas en la electrólisis: celdas de mercurio, celdas de diafragma y celdas de membrana. El cloruro de sodio consumido en el proceso de electrólisis para la producción de cloro y soda cáustica es aportado a las celdas electrolíticas como una solución acuosa (salmuera) tratada. Por lo tanto se debe preparar la salmuera adecuada para ser utilizada en estas celdas. Las celdas de membrana, requieren para su buen funcionamiento que la salmuera posea un contenido de calcio y magnesio mucho menor que el admisible en las celdas de mercurio.

Para evitar estos problemas se remueven las impurezas de diversas maneras. Los métodos más usados son:

- **Purificación con cal o soda cáustica y carbonato de sodio:** los iones de magnesio son precipitados en la salmuera cruda como hidróxido de magnesio por adición de hidróxido de calcio o sodio y los iones de calcio son precipitados como carbonato de calcio por adición de

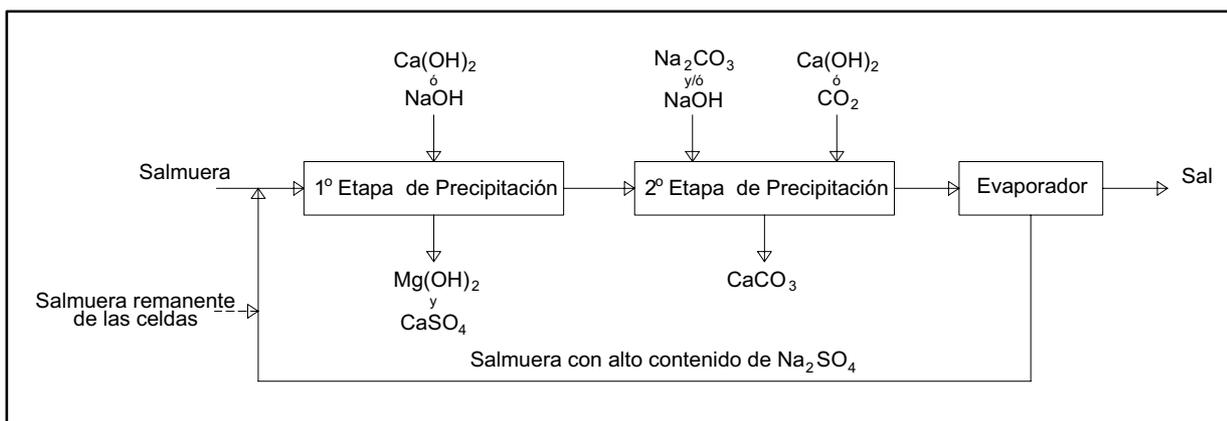
carbonato de sodio o por purgado de la salmuera alcalina con dióxido de carbono. La sal es obtenida de la salmuera purificada por evaporación, la cual se detiene luego del comienzo de la cristalización

del sulfato de sodio. La solución madre tiene un alto contenido del mismo y puede ser usada para la producción de sulfato de sodio. El proceso se esquematiza en la siguiente figura:



• Purificación en dos etapas: Como ha sido mencionado anteriormente, en la tecnología moderna de plantas de electrólisis con membrana, se requieren bajas concentraciones de aniones (sulfato) y cationes (calcio y magnesio). La concentración de sulfato debe ser estrictamente controlada cuando se trabaja con reciclo de salmueras remanentes siendo necesaria la remoción adicional de sulfatos mediante purga o precipitación química con bario o calcio. El ión bario puede ser agregado en cualquier parte de la planta de tratamiento; normalmente se lo agrega junto con otros reactivos químicos y el  $\text{BaSO}_4$  precipitado es removido de la salmuera clarificada. La principal ventaja del sulfato de calcio es su solubilidad inversa, debido a que esta disminuye con el aumento de la temperatura. En la salmuera saturada, el  $\text{CaSO}_4$  es 2 o 3 veces más soluble que el  $\text{BaSO}_4$ . La secuencia de procesamiento es también más compleja. No pueden llevarse a cabo la precipitación del sulfato, junto con la remoción del calcio y magnesio; dado que es imposible mantener un exceso de ión calcio para remover el sulfato

mientras simultáneamente mantener un exceso de ión carbonato para remover el calcio. Por lo tanto se utiliza una purificación en dos etapas. En la primer etapa la solución madre, la salmuera cruda y la suspensión de hidróxido de calcio o hidróxido de sodio son completamente mezcladas. Esto hace que el hidróxido de magnesio y el sulfato de calcio precipiten. Otros iones metálicos son precipitados por la adición de elementos alcalinos térreos. Después de la extracción de estos sólidos, la solución de hidróxido de sodio y/o solución de carbonato de sodio son a veces agregadas a la salmuera limpia, la cual es saturada con hidróxido de calcio en la segunda etapa. También se hace pasar dióxido de carbono, con lo cual cristaliza carbonato de calcio, el cual es removido. La salmuera clarificada es alimentada al evaporador y evaporada hasta que el sulfato de sodio apenas comience a cristalizar. La sal es recogida y la solución madre, la cual tiene un alto contenido de sulfato de sodio es reciclada a la primera etapa del proceso de purificación. El proceso se esquematiza en la siguiente figura:



Los procesos de purificación de salmueras descriptos anteriormente, fueron en un principio llevadas a cabo como operaciones batch, pero hoy en día los procesos continuos son más comunes.

En ambos métodos las impurezas pueden ser:

a) Floculadas con poliacrilamidas, a veces con hidróxido de hierro y luego se las remueve por sedimentación en un espesador.

b) Los precipitados formados son separados por decantación en la instalación de clarificación de salmuera y posteriormente extraídos por filtración con varios filtros de arena dispuestos en paralelo, estos filtros tienen una presión máxima de operación de 4 bar y la temperatura de operación es de 70° C, debido a que es la temperatura necesaria para lograr una operación normal en las celdas. Los sólidos no retenidos son separados por filtración en filtros de cuarzo.

- **Cristalización:** el sulfato puede ser removido de la solución por cristalización como sal de sodio o calcio. Se puede remover el sulfato de sodio por cristalización, pero removiendo primero el cloruro de sodio en otro cristizador, para ello se utilizan los diagramas de fases Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/NaCl, la sal está libre de sulfato y puede ser usada en la celda de membrana, finalmente el sulfato es removido por enfriamiento. El sulfato de calcio puede cristalizar de la salmuera en distintas formas, como anhidrita (CaSO<sub>4</sub>), como yeso (CaSO<sub>4</sub>.2 H<sub>2</sub>O) y distintas mezclas de sales, una de ellas es la pentasal (5CaSO<sub>4</sub>.Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.3 H<sub>2</sub>O). En soluciones concentradas de cloruro de sodio, lo que interesa es la formación de dos posibles fases sólidas, yeso y pentasal. La formación de la pentasal es promovida por el aumento de la temperatura, la concentración de sal o la concentración de

sulfato. Para las bajas concentraciones de sulfato requeridas en las celdas de membrana, una aproximación satisfactoria sería la cristalización del yeso a baja temperatura (O'Brien, 1986; Handbook of Extractive metallurgy, 1997).

#### 2.4.6. AGREGADO DE ADITIVOS A LA SAL DESTINADA AL CONSUMO HUMANO

Los aditivos que se agregan a la sal luego del refinamiento son los siguientes:

- **agentes “anti-caking”:** para evitar que los granos adyacentes se peguen entre ellos formando una masa sólida muy dura; comúnmente se usa ferrocianuro de potasio o sodio, en un rango de 5-15 ppm, también se puede usar carbonato de calcio ó magnesio, en una cantidad máxima de 20 gramos por kilogramo de sal.

- **agentes “free flowing”:** para proveer a los cristales una cobertura mecánica, que actúa como lubricante y absorbe el vapor de agua dentro del paquete luego de sellado, comúnmente se usa carbonato de magnesio, silicato de calcio, sodio silicoaluminato de sodio y fosfato tricálcico, en un rango de 1-2%.

- **agentes iodantes:** para control de los trastornos a nivel orgánico por la deficiencia de yodo, se usan yoduro ó yodato de potasio en un rango de 30-170 partes por millón.

#### Técnicas de iodación de sal

Las características físicas y composición química de la sal varían dependiendo de la composición de la materia prima y del proceso de manufactura, como se detalla en la siguiente tabla (los porcentajes son en base seca):

Tipo de Sal	NaCl	Mg	Ca	SO <sub>4</sub>	Insolubles
Pura Evaporada al Vacío	99,95	0,0001	0,002	0,04	trazas
Vacío	99,70	0,01	0,01	0,2	trazas
Refinada	99	0,05	0,06	0,2	0,02-0,3
Solar	96-99	0,01-0,17	0,04-0,3	0,11-2,0	0,05-0,6
Roca	90-99	0,01-0,17	0,04-1,1	0,2-1,3	0,5

La sal para iodación debe ser por lo menos 98% en peso de NaCl y contener menos del 0,2% de calcio; 0,1% de magnesio; 0,5% de sulfato; 0,5% de insolubles y 3% de humedad.

El yodo se agrega a la sal como iodato de potasio, después del refinamiento y secado y antes del envasado. Los métodos de iodación pueden ser en seco ó en húmedo.

En el método húmedo, se rocía una solución concentrada de iodato de potasio, sobre una capa de sal, la cual atraviesa la cámara de spray sobre una cinta transportadora de alta velocidad.

En el método en seco, el iodato de potasio es mezclado con un agente "anti-caking" como carbonato de calcio y/o sal seca y luego el polvo es dispersado por encima de la sal seca, la cual se mueve por una cinta transportadora. Este método no es aplicable a cristales grandes de sal, sólo es indicado para granos finos de sal con un tamaño menor que 2 milímetros.

En ambos métodos la sal debe ser perfectamente mezclada luego de la adición del iodato de potasio, de lo contrario algunos envases tendrán mayor contenido de yodo que otros.

(~[www.people.virginia.edu/~jtd/iccid/iodman/iodman8.htm](http://www.people.virginia.edu/~jtd/iccid/iodman/iodman8.htm))

## 2.5. PROCESAMIENTO DE CARBONATO DE SODIO (SODA ASH)

### 2.5.1. INTRODUCCIÓN

Esta sal neutra del ácido carbónico y materia

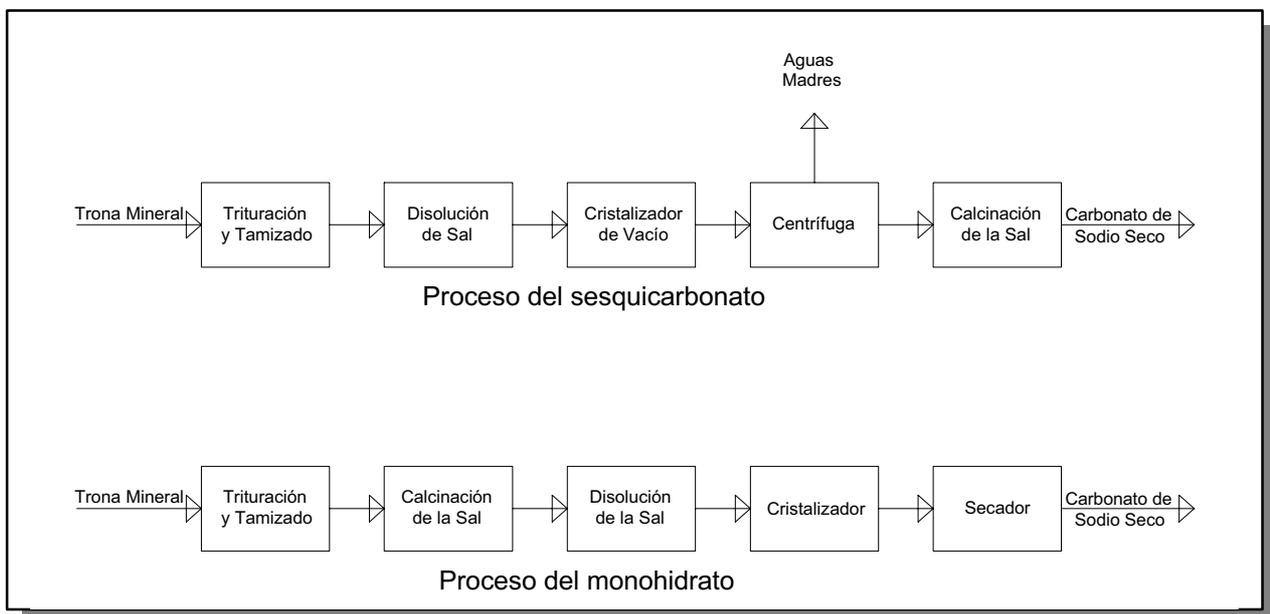
prima de numerosos procesos químicos es conocida desde la antigüedad cuando fue, hasta principios del 1800, producida a partir de la lixiviación con agua de las cenizas obtenidas en la combustión y posterior calcinación al rojo vivo de distintas plantas y algas marinas, derivando de allí el nombre de ceniza de soda (soda ash).

La producción en escala industrial se inicia con el desarrollo del proceso Leblanc (reacción de NaCl con  $H_2SO_4$ ), que para mediados del siglo XIX fue desplazado por el proceso Solvay. Luego de la Segunda Guerra Mundial la obtención a partir de "trona", especialmente en EE.UU comienza a desarrollarse en los depósitos de Green River, Wyoming. En estos depósitos, el contenido de carbonato de sodio en la mezcla de sales que se extrae es superior al 40%, y es acompañado por KCl, NaCl,  $NaHCO_3$ ,  $Na_2SO_4$  y bórax en menor proporción.

### 2.5.2. PROCESAMIENTO DE TRONA ( $Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3 \cdot 2H_2O$ )

De los distintos minerales portadores de  $Na_2CO_3$ , solo la trona ( $Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3 \cdot 2H_2O$ ) es de importancia comercial. Es necesaria 1,8 t de trona para producir 1 t de carbonato de sodio.

El mineral extraído por los métodos tradicionales puede ser beneficiado por dos métodos distintos: el proceso del sesquicarbonato y el proceso del monohidrato. Los esquemas para ambos procesos son los siguientes:

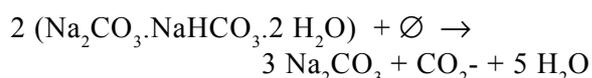


### Proceso del sesquicarbonato

La trona es disuelta primero en agua y la solución caliente se trata como una salmuera que primero es clarificada, separando los materiales insolubles y la materia orgánica por filtración antes de que el sesquicarbonato ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) sea precipitado en cristalizadores de vacío. Los cristales resultantes se separan por centrifugado y pueden ser secados, constituyendo un producto comercializable, o calcinados para producir un carbonato de sodio de baja densidad o densidad intermedia.

### Proceso del monohidrato

La trona es triturada hasta una granulometría inferior a 6 mm y calcinada a  $300^\circ \text{C}$  en hornos rotativos obteniéndose carbonato de sodio de alta densidad,  $\text{CO}_2$  y agua, según la reacción:



Esta reacción es endotérmica y de primer orden respecto de sesquicarbonato (trona) y tiene una energía de activación de 33,8 kcal/g.mol de trona para temperaturas menores a  $95^\circ \text{C}$ . A temperaturas mayores es de 12 kcal/g.mol de trona.

El material calcinado, se disuelve en agua y por sedimentación o filtrado se remueven las impurezas insolubles. La salmuera limpia es concentrada en un evaporador de triple efecto o en un cristalizador con recompresión mecánica de vapor, lográndose la precipitación del monohidrato ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) mientras que las impurezas solubles ( $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) permanecen en solución. Los cristales del monohidrato se separan por centrifugación y se calcinan para remover la molécula de agua remanente para dar el producto final. (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997; <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch08/bgdocs/b08s12.pdf>).

Los procesos de obtención de carbonato de sodio a partir de trona por disolución, sedimentación y subsecuente recrystalización se encarecen porque hay que eliminar la ganga antes de la cristalización o se debe hacer una extracción selectiva en el yacimiento para minimizar la cantidad de ganga a separar.

El uso de la flotación para purificar la trona antes de la disolución permite:

- el uso de sistemas de explotación de frentes largos, barato pero poco selectivo.
- aprovechar minerales que por el grado de impurificación se consideran marginales.
- comercializar un producto nuevo: concentrado de trona directamente.
- mejorar la operación de la planta de disolución/cristalización.

La trona al igual que otras sales puede ser separada de sus impurezas mediante procesos de flotación en solución saturada de sal para evitar su disolución. Para lograr esto es necesario conocer sobre la química de las soluciones de trona. Teniendo en cuenta:

- que la trona es una sal doble (de carbonato y bicarbonato).
- que en una solución saturada obtenida por disolución de trona, la proporción de carbonato o bicarbonato presente depende de la temperatura a la cual se encuentre.
- que a  $25^\circ \text{C}$  la trona en estado sólido es estable solamente en una solución que contenga 20,8 g de carbonato de sodio y 2,5 g de bicarbonato en 100 g de solución saturada y cualquier cambio en estas concentraciones o en la temperatura puede favorecer la preponderancia sobre la superficie de la trona sólida de  $\text{NaHCO}_3$  o de  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .

En función de todo esto, Özcan *et al.* (2003) estudiaron la influencia de la temperatura sobre la flotación de  $\text{NaHCO}_3$  o de  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  utilizando un colector aniónico (dodecilsulfonato de sodio) y uno catiónico (cloruro de dodecil amina) determinando para ambas sales la temperatura y la dosis de colector a la cual se produce la flotación de las mismas. La extrapolación de estos resultados puede utilizarse en la separación de trona de los minerales presentes como ganga por flotación en soluciones saturadas de sal.

La calcinación de trona en un horno rotativo

en co-corriente ha sido estudiada por Ciftci y Kim (1999) por simulación matemática, utilizando un modelo de un horno industrial con carcaza externa adicional en la zona del quemador, planteando la necesidad del uso de sistemas de control adecuados para evitar los problemas frecuentemente encontrados en este tipo de operaciones industriales de calcinación de trona: el sobrecalentamiento de la carcaza en la zona del quemador, con la consecuente deformación de la misma y la pérdida de cantidades importantes de calor.

Aitala y Hendrikson (1982), presentaron una comparación de costos operativos para la producción de carbonato de sodio sintético (por una variante del proceso Solvay, llamado NA) y carbonato de sodio “natural” a partir de trona. La misma es favorable a este último.

### 2.5.3. PROCESAMIENTO DE SALMUERAS OBTENIDAS POR SOLUTION MINING

Otro método de explotación de yacimientos de trona es el método de *solution mining*. Este método permite una reducción de un 20 a 25% en los costos operativos de extracción, comparado con los métodos de extracción tradicional. Las tasas de extracción de trona por minería convencional y longwall (extracción en frentes largos), son de 45 y 70% respectivamente, mientras que, por *solution mining* puede llegarse a tasas cercanas al 100% (Kvidahl y Raleigh, 1982).

En la extracción por *solution mining* se inyecta hidróxido de sodio diluido como solvente de extracción. La salmuera obtenida puede ser almacenada, enfriada y posteriormente concentrada en piletas de evaporación solar. Una vez concentrada se realiza la carbonatación (Mannion, 1983). Durante este proceso, la solución obtenida se trata con  $\text{CO}_2$  (g) en torres de carbonatación, donde el carbonato de sodio disuelto se convierte en bicarbonato de sodio, que precipita y se separa por filtración separándose de esta manera el resto de las sales solubilizadas durante la extracción. Los cristales son nuevamente disueltos en agua, precipitados con dióxido de carbono y filtrados. El bicarbonato es calcinado para producir el carbonato de sodio.

(<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch08/bgdocs/b08s12.pdf>).

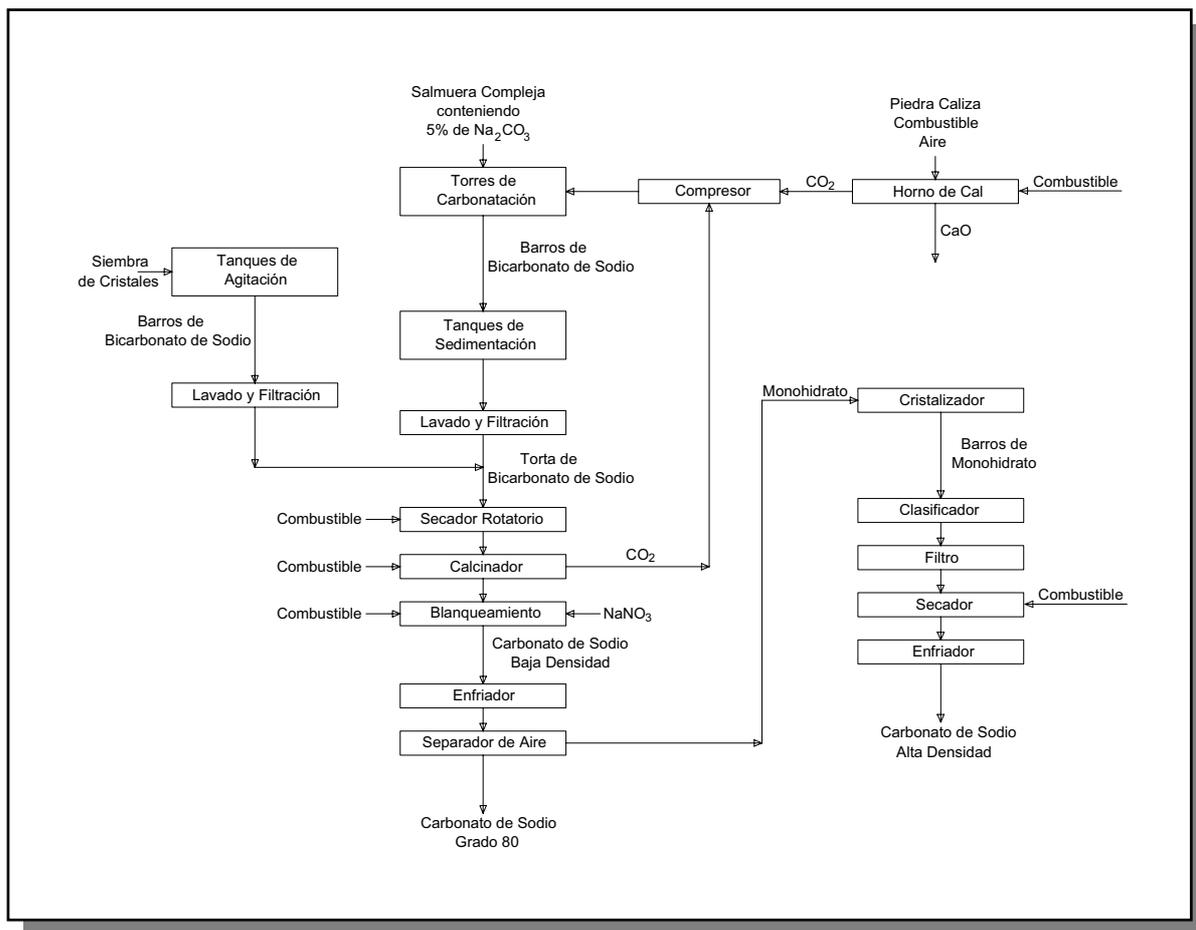
### 2.5.4. PROCESAMIENTO DE SALMUERAS NATURALES

Otra fuente natural para la obtención de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  son las salmueras obtenidas en distintos salares en el mundo, que pueden ser tratadas con  $\text{CO}_2$  (g) para precipitar el  $\text{NaHCO}_3$  o evaporadas natural o artificialmente hasta lograr la precipitación y separación de cristales de trona. En ambos casos, el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se obtiene por calcinación posterior de estos productos obteniéndose un producto que contiene 95-96% de carbonato de sodio. (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

En el Lago Searles, California, las salmueras extraídas por un sistema de pozos en distintos puntos del depósito contienen aproximadamente un contenido de 5% de carbonato de sodio y son carbonatadas en una torre de absorción. El  $\text{CO}_2$  para el proceso de carbonatación se obtiene de los hornos de producción de cal a partir de calizas y se resume en el esquema de la página siguiente.

En el proceso, puede verse que parte del bicarbonato se obtiene en otra línea de producción por crecimiento de cristales. La masa total de cristales de bicarbonato se secan y posteriormente durante la calcinación se recupera parte del  $\text{CO}_2$  que se recircula en el proceso. El calcinado se purifica en un segundo horno donde se incorpora nitrato de sodio, produciéndose el aumento de la densidad del carbonato de sodio obteniéndose un producto denominado “ $\text{Na}_2\text{CO}_3$  grado 80” que se comercializa de esta manera o es usado para recrystalizar  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  que por secado permite obtener  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  de alta densidad.

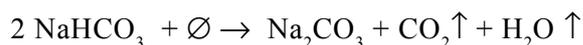
En EE.UU, en la planta de Argus, el  $\text{CO}_2$  para la precipitación proviene de los gases obtenidos en una planta de generación eléctrica. La salmuera se obtiene por disolución de trona directamente en el depósito, por reinyección de las aguas madres calientes remanentes de la recuperación del bicarbonato, a través de pozos a profundidades del orden de los 100 m. La salmuera obtenida se concentra en piletas por evaporación solar para incrementar la concentración previo a la carbonatación. El  $\text{NaHCO}_3$  es separado por filtrado, secado y posteriormente calcinado para producir un carbonato de sodio “liviano” que tiene baja densidad, que se convierte en carbonato de sodio “denso” por disolución, reprecipitación de la sal monohidratada y secado para eliminar la



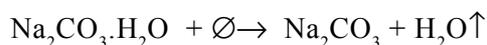
molécula de agua del monohidrato (Industrial Minerals and Rocks, 1983).

### 2.5.5. OBTENCIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE CARBONATO DE SODIO

El carbonato de sodio obtenido por el proceso del monohidrato como así también el obtenido por procesamiento de salmueras responden a esta reacción química:



y también a:



En ambos casos, el agua y el dióxido de carbono que se evaporan del cristal tienen una influencia negativa en la calidad del producto, los cristales resultan porosos y por lo tanto

quebradizos durante las operaciones de movimiento de sólidos, generando un producto con excesiva cantidad de partículas finas y polvos que, hacen que ese carbonato de sodio “liviano” no sea apto para determinadas aplicaciones (p.ej: arrastre de finos por los gases calientes y formación de excesiva cantidad de burbujas en los hornos de fusión de vidrio). Este producto presenta además el problema de su baja densidad aparente (comúnmente 750-850 kg/m<sup>3</sup> en el producto obtenido en el proceso del monohidrato) lo que incrementa el costo de transporte. Ambos problemas generan la demanda de un producto de mayor densidad aparente. Este producto puede lograrse por distintos métodos.

#### Calcínación a alta temperatura

El carbonato de sodio liviano es calcinado a temperaturas de hasta 700° C durante 45 minutos. En estas circunstancias, se produce una “fusión”

de partículas en otras de mayor tamaño, aumentando la densidad aparente.

### Compactación mecánica

En este proceso, el carbonato liviano es “precompactado” en un alimentador a tornillo que lleva el producto a un sistema de rodillos a presión que produce “escamas” con una densidad aparente de hasta  $1.800 \text{ kg/m}^3$  ( la densidad real del carbonato de sodio es de  $2.533 \text{ kg/m}^3$ )

### Proceso de monohidratación

En este proceso el carbonato liviano y agua se alimentan a un horno de calcinación que opera cerca de  $180^\circ \text{ C}$ . En la entrada del horno, la temperatura del barro (agua y carbonato) es de  $90^\circ \text{ C}$  y se forma carbonato de sodio monohidratado. Mientras la temperatura aumenta a lo largo del horno, el agua es evaporada y se obtiene carbonato de sodio denso con una densidad aparente de  $1.050 \text{ kg/m}^3$  a expensas de un consumo energético elevado ( $400 \text{ kg}$  de vapor por cada tonelada de carbonato denso).

### Cristalización extractiva

Este proceso, no necesita evaporar agua y un carbonato de sodio de alta densidad aparente se obtiene a presión atmosférica. Se basa en la temperatura de transición a la cual el monohidrato se transforma en anhidro y una solución acuosa en equilibrio puede ser disminuida por agregado de otro solvente. Oosterhof *et al.*, 2002, estudiaron la doble recristalización continua en mezclas de agua-etilenglicol. En estas condiciones, el carbonato de sodio liviano recristaliza primero en el monohidrato a una temperatura inferior a la de transición. Luego la temperatura se eleva por encima de la de transición y el monohidrato se convierte en carbonato de sodio anhidro de  $1.400 \text{ kg/m}^3$  de densidad aparente. Los autores proponen este método como un proceso de ultrapurificación que permite una eliminación adicional de impurezas solubles remanentes (p.ej.: cloruro de sodio).

Los fundamentos de este proceso fueron detallados anteriormente (ver 2.4.3. Métodos industriales de concentración de salmueras. Cristalización extractiva).

## 2.6. OBTENCIÓN DE SULFATO DE SODIO

### 2.6.1. INTRODUCCIÓN

Tal como se definió anteriormente (ver capítulo 1), el sulfato de sodio puede encontrarse en dos tipos principales de depósitos, las sulfateras y los salares.

Para el sulfato de sodio, como para el resto de las sales, parte de las operaciones realizadas durante la extracción de la sal del depósito pueden ser consideradas como pasos del procesamiento ya que permiten aumentar el contenido y/o la calidad de la sal explotada, aprovechando las características climáticas de cada zona.

En ambos tipos de depósitos, el producto primario que se obtiene es el sulfato de sodio decahidratado (mirabilita ó sal de Glauber) que puede ser comercializado como tal ó puede transformarse por “anhidración” (eliminación de las 10 moléculas de agua) en sulfato de sodio anhidro (tenhardita). Las impurezas tanto solubles como insolubles que lo acompañen serán eliminadas de manera distinta, tratando de aprovechar en cada caso, diferentes aspectos de las condiciones climáticas reinantes en el lugar o mediante la inversión en tecnologías que requieren de mayores costos operativos (provisión de energía para bombeo, evaporación, secado).

### 2.6.2. PROCESAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE SULFATO DE SODIO DECAHIDRATADO EN SULFATERAS

Teniendo en cuenta la dinámica de las lagunas salobres, los cambios de temperatura estacionales, contribuyen con el procesamiento del sulfato de sodio. Durante los meses de invierno el aporte de agua de las napas y las lluvias en la salina permite que se inunde el lecho de la laguna la cual estará próxima a la saturación hacia fines del verano.

En ese momento, dependiendo del tipo de inversiones realizadas puede suceder que:

- En explotaciones no mecanizadas, se deja que durante el invierno, con las bajas temperaturas reinantes, cristalice la mirabilita

directamente en el suelo de la laguna. La cosecha de cristales es realizada por un “trineo” con cuchillas que cortan y arrancan los cristales del suelo, succionando los mismos con bombas desde el fondo.

- En explotaciones mecanizadas, la solución es bombeada a depósitos o piletas que pueden llegar a tener casi 3 m de profundidad. Con las bajas temperaturas de invierno, cristaliza el sulfato de sodio decahidratado. Las aguas madres remanentes son drenadas ya que contienen gran parte del sulfato de magnesio y el cloruro de sodio que impurifican el producto cristalizado que es cosechado directamente en las piletas.

- En explotaciones con altas inversiones de capital, luego de secada la laguna, puede inyectarse en la costra salina agua caliente que genere una salmuera más o menos concentrada que se bombea a cristalizadores o una vez cosechada la sal, disolverla en tanques con agua caliente a 45° C, separando los insolubles por decantación y bombeo a tanques de cristalización de poca profundidad, al aire libre, donde la mirabilita cristaliza por enfriamiento. Dependiendo del contenido de insolubles presentes en la solución saturada, la salmuera bombeada puede ser filtrada por medio de filtros prensa para eliminar estas impurezas previamente. Dependiendo de la concentración remanente de cloruro y sulfato de sodio, las aguas madres remanentes de la cristalización recirculan o se desechan.

En muchos casos, los cristales cosechados son emparvados. Si los insolubles son abundantes y no han sido removidos de las salmueras saturadas antes de la cristalización, puede recurrirse al lavado posterior con solución saturada en tornillos Akins.

En general, en este tipo de depósitos y con estos sistemas de explotación, el equilibrado aporte de las lluvias estacionales es vital ya que sequías prolongadas o excesos de precipitaciones pueden alterar los rendimientos generales de producción de la planta.

En este caso también, el producto comercializado puede ser la mirabilita o Sal de Glauber ya que las condiciones climáticas no son favorables para la anhidración natural. Para la obtención del sulfato anhidro se necesita de

evaporadores de múltiple efecto o instalaciones de combustión sumergida (ver 2.6.4. Obtención de sulfato anhidro).

### 2.6.3. PROCESAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE SULFATO DE SODIO DECAHIDRATADO EN SALARES

En general, los salares se encuentran en zonas climáticas desérticas, con temperaturas y precipitaciones bajas y grandes oscilaciones térmicas entre el día y la noche. El aporte de agua viene de vertientes naturales, producto del deshielo en serranías circundantes y, en algunos casos puede contarse con algún recurso geotermal cercano.

Todo esto puede dar lugar a distintos tipos de explotación/procesamiento:

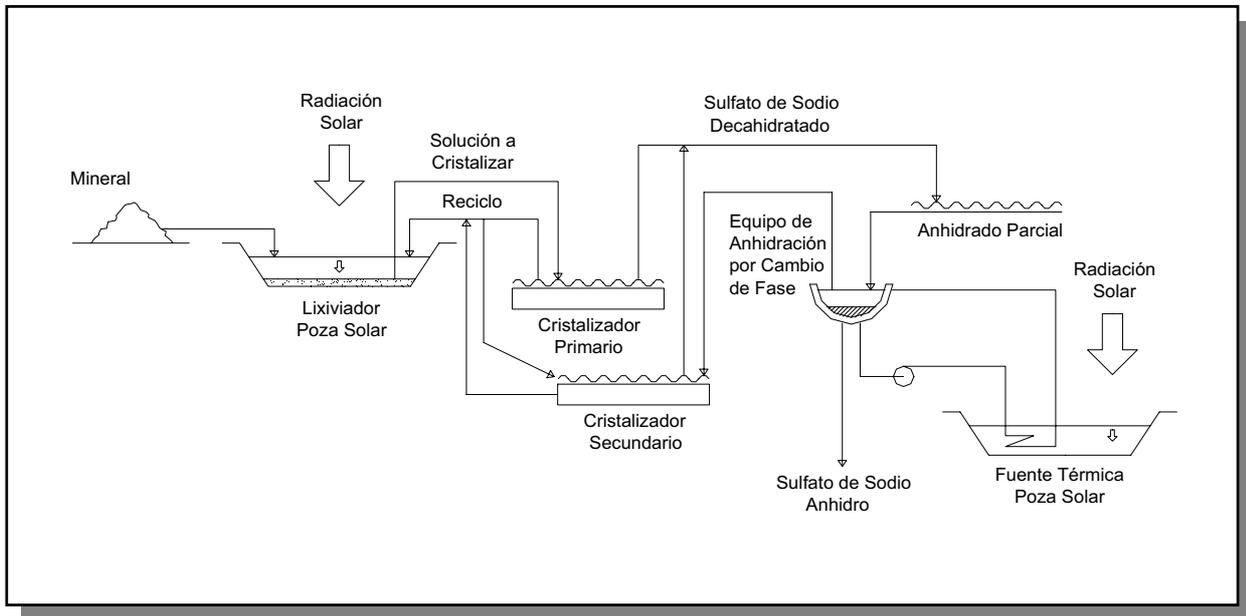
- Convencional o evaporítico: se dispone de combustible, con posibilidades de calentamiento de agua (en una caldera) para la disolución y la obtención de calor para la anhidración por secado en hornos, combustión sumergida o evaporadores de efecto múltiple (ver 2.7.4. Obtención de sulfato de sodio anhidro). Lesino *et al.* (1988) establecieron, operando una planta piloto convencional, que es necesario quemar 6 toneladas de una mezcla 1:1, fuel-oil:gas-oil y disponer de una potencia instalada de 30 KVA para la producción de 120 t/mes de sal de Glauber.

- Alternativo no convencional, del tipo “pozas solares”: desarrollados en zonas aisladas de difícil acceso para el transporte de combustible. Se aprovecha la alta radiación solar, en el orden de los 1000 w/m<sup>2</sup> y la alta heliofanía para la operación de sistemas de colección y acumulación de energía térmica como así mismo la instalación de equipos de generación eléctrica (Galli *et al.*, 2001). En este tipo de aprovechamiento, el proceso de disolución que se realiza en un sistema de “pozas solares” donde la energía solar se acumula y utiliza para la disolución del sulfato, produciéndose en el mismo lugar la decantación de los insolubles, generándose una salmuera con una concentración adecuada de sulfato que se bombea a los cristalizadores para la obtención del sulfato decahidratado.

El sulfato anhidro se obtiene en equipos de anhidración por cambio de fase donde la energía

de calentamiento es provista desde otra “poza solar” que trabaja como acumulador de energía (ver 2.6.4. Obtención de sulfato de sodio

anhidro). El esquema general para la recuperación de sulfato de sodio por este tipo de proceso es:



### Construcción de una poza solar

La poza solar es un “equipo” de muy bajo costo. Su localización debe ser cercana al yacimiento de sal, en lugares con altos niveles de radiación solar y disponibilidad de agua desde algún río o napa freática. Su ubicación puede minimizar los costos de bombeo de manera que la solución fluya a los cristalizadores por gravedad. Para monitoreo de la temperatura del suelo se instalan termocuplas, así como un sistema de caños para detección de pérdidas de solución. Se recubre el interior de la poza con una membrana impermeable, generalmente de polietileno de 250 mm de espesor dejando arrugas sobre los laterales para absorber las deformaciones durante el llenado. La calidad y espesor de la manta impermeable depende de la temperatura de funcionamiento, del tiempo estimado de funcionamiento de la poza y del tipo de solución a preparar ya que incide directamente sobre el costo de la instalación. El color de la membrana no es importante ya que, el fondo adquiere luego el color de las impurezas que sedimentaron. Habitualmente no se coloca material aislante en la base, existiendo una pérdida de calor por el fondo y los bordes de la poza que puede minimizarse si se trabaja con dimensiones tales que, la relación perímetro/área de la poza sea pequeña (Lesino *et al.*, 1980, 1981 y 1988).

### Llenado de la poza

El llenado parcial inicial de la poza con agua, amortiguará la caída de los trozos de sal, que se tiran dentro y que forman un anillo de aproximadamente 4 m de ancho y 80 cm de altura (dependiendo del tamaño de la poza) alrededor del perímetro. La solución se recircula varios días hasta que se obtiene una solución con una densidad de  $1,1 \text{ g/cm}^3$ . El gradiente de concentración y llenado completo de la poza se realiza mediante la inyección de agua con un difusor móvil, (en la solución concentrada), que se levanta según aumenta el nivel de solución en la poza, a una velocidad de 1m/s, levantando el difusor 5 cm cada vez que el nivel de la poza aumenta 2,5 cm. Una vez completado el llenado la poza tarda más o menos 3 semanas en estabilizar el gradiente de temperaturas (Lesino *et al.*, 1981).

### Comienzo de la operación

Una vez llena la poza se distinguen tres zonas:

- a) una capa superficial a temperatura ambiente y con concentración de sal igual en todos los puntos.
- b) una capa intermedia en el centro donde la

temperatura y concentración de sal decrecen linealmente de abajo hacia arriba. Este gradiente se mantiene ya que no hay movimientos verticales entre capas de distinta concentración de sal (no hay convección). Esta capa se comporta como un sistema aislante.

c) la parte inferior donde existe una capa a temperatura y concentración constante en todos sus puntos y mayores que en cualquier otra zona de la poza. En esta zona convectiva inferior es donde se almacena la mayor cantidad de energía aprovechable (Manguzzi *et al.*, 1977).

Es debido a esta forma de armar la poza que, en el fondo de la misma la temperatura aumenta puesto que la radiación se absorbe allí y, si bien la superficie se encuentra a temperatura ambiente (generalmente entre 8 a 10° C), la zona intermedia de gradiente continuo trabaja como aislante, de manera que toda la energía acumulada en el fondo puede utilizarse para solubilizar la sal que se está alimentando, al disolverse se liberan los insolubles que sedimentan lentamente, lográndose soluciones con densidades que pueden aumentar en la medida que aumenta la temperatura del fondo y se mantiene el equilibrio entre las distintas zonas de la poza por alimentación de mineral fresco y extracción de la solución. Se han registrado temperaturas de 46° C con una densidad de 1,32 g/cm<sup>3</sup> en la salmuera.

#### **Obtención del sulfato decahidratado (sal de Glauber)**

En este punto, se procede a la extracción de la solución saturada por una boca de extracción colocada a 10-15 cm del fondo que la lleva por gravedad, hacia los cristalizadores donde durante la noche, al bajar la temperatura cristaliza la sal de Glauber.

El rendimiento de los cristalizadores es mayor cuando aumenta la densidad (o sea la concentración) de la solución que se extrae de la poza. La calidad del producto cumple con la exigencia de la industria papelera de un contenido de NaCl menor al 1% (Lesino *et al.*, 1981).

#### **Remoción de los insolubles**

En todo el proceso de funcionamiento de la

poza para obtener la solución saturada, los insolubles quedan sedimentados en el fondo, no siendo arrastrados por la convección de la capa inferior. Cuando el espesor de la capa de insolubles llega a 2 cm se extraen por barrido con un cepillo y aspiración de los mismos.

#### **2.6.4. PROCESAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE SULFATO DE SODIO ANHIDRO**

Obtenido el decahidrato, la anhidración es un proceso que resulta de interés debido a la disminución del costo del transporte. Galli *et al.* (2001) clasifica los procesos para su obtención en dos categorías:

- Procesos evaporativos: que requieren del uso de energía convencional para el calentamiento. Aquí se incluyen la operación de distintos evaporadores-cristalizadores: rotativos, tipo Holland, combustión sumergida, etc.

- Procesos de anhidración por cambio de fase: que se realizan utilizando las condiciones climáticas favorables en las zonas próximas a los salares, con alta radiación solar y vientos secos. Aquí se incluye la anhidración por secado natural o la anhidración por cambio de fase en soluciones saturadas por calentamiento directo en una poza solar o por calentamiento utilizando el calor producido por una poza solar.

#### **Procesos evaporativos**

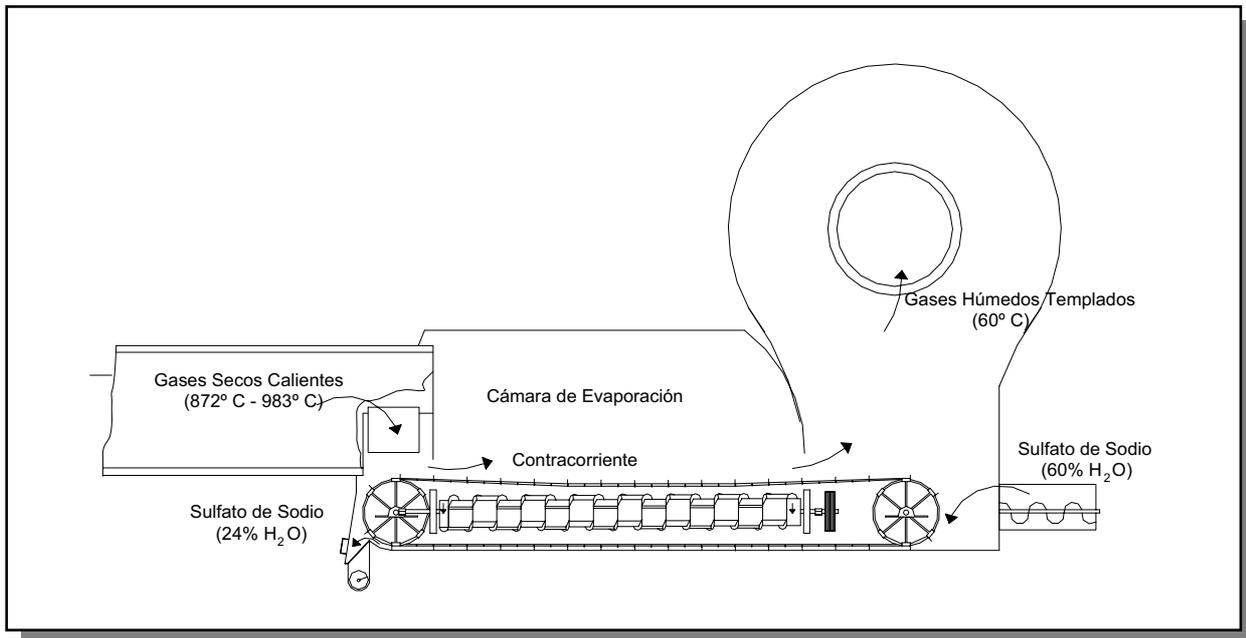
Rodillos evaporativos: Han tenido poco suceso aplicados para la obtención de tenhardita. Se componen de una batea donde se encuentra la solución saturada y un rodillo que gira, parcialmente sumergido en la solución y que es calentado internamente con vapor. Cuando el rodillo atraviesa la solución, el anhidro se forma y adhiere en la superficie caliente como una capa que es removida posteriormente por cuchillas que raspan la superficie del rodillo que abandona la solución. La dificultad de la remoción de la capa adherida al rodillo como así también las grandes superficies que se necesitan hicieron fracasar el uso de este equipo (Douglas *et al.*, 1941).

Secadores rotativos: Si bien los equipos

utilizados en los comienzos (por el año 1925) fueron mejorados con el correr de los años, siempre presentaron problemas de baja eficiencia en el consumo energético, formación y crecimiento de anillos de sal al punto de cerrar el paso de la sal dentro del horno con las consiguientes paradas para rotura de los tapones y remoción de las costras pegadas en las paredes, alto arrastre de finos por los gases de combustión.

**Evaporador Holland:** En este evaporador, se alimenta una solución de sulfato de sodio con un

60% de agua en contracorriente a los gases de combustión que entran a 870-980° C y salen luego de recorrer 2,4 m a 60° C, obteniéndose un sulfato de sodio con un 24% de humedad, que puede terminar de secarse en un horno rotatorio sin los problemas antes mencionados. En la entrada de la solución de sulfato, existen unos agitadores que, al rotar a 375-400 rpm, “salpican” la solución en la entrada del reactor. Las gotas son parcialmente deshidratadas por el aire caliente y al caer, son arrastradas por una cinta con paletas de arrastre hacia la salida del reactor (Holland, 1951).



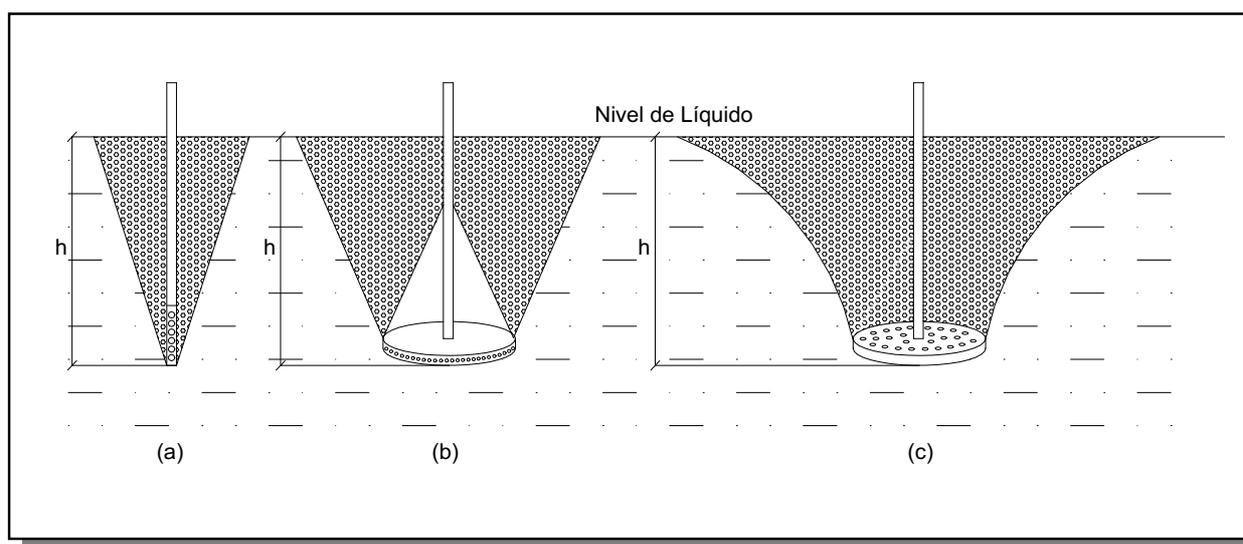
**Evaporadores de combustión sumergida:** En este tipo de reactores, un quemador descarga la corriente de gases de combustión dentro de la solución de sulfato de sodio como una gran cantidad de burbujas pequeñas de gas caliente que ascienden desde el fondo de la solución. Cuando menor sea el tamaño de la burbuja mayor es la superficie caliente disponible para la transferencia de calor desde el gas directamente a la película de solución que recubre cada burbuja, provocando la deshidratación del sulfato presente en la misma como consecuencia de poseer solubilidad invertida (disminuye su solubilidad al aumentar la temperatura). El gas caliente dentro de la burbuja se enfría y se satura de humedad, escapando en la superficie de la solución caliente. La mayor ventaja de este tipo de evaporador es evitar los problemas de corrosión y contaminación del producto por los óxidos generados por ella ya que la sal se seca sobre la superficie de la burbuja en lugar de secarse y adherirse como costra o

incrustación a una superficie metálica caliente. La mayor desventaja es la producción de cristales de pequeño tamaño (Cronan, 1956).

Los primeros reactores de este tipo se comenzaron a usar en la industria del sulfato de sodio en 1930, (Ozark-Mahoning Co, Texas). El hecho de evitar el problema de incrustaciones difundió el uso de este tipo de reactores a otro tipo de aplicaciones, aún en productos que no tienen solubilidad invertida, y fue adoptada también por Potash Co. of America para la cristalización de KCl. Desde entonces, muchos reactores se diseñaron aprovechando la ventaja de la combustión sumergida de transferir el calor directamente de los gases de combustión a la solución (Weisman *et al.*, 1953). Los principales adelantos se relacionan con el diseño y materiales utilizados en la construcción del quemador, la ubicación del mismo dentro del reactor, y el estudio de la zona de burbujas que pueden generar distintos diseños de quemadores, para lograr la

más eficiente transferencia del calor (Udyma y Kolach, 1966). Más recientemente, Carrasco y Esplugas (1985a, 1985b) propusieron un modelo matemático del proceso donde se tiene en cuenta, la transferencia de calor desde la burbuja a la película de líquido circundante, la posible transferencia de masa desde los gases de combustión a la solución (caso del  $\text{CO}_2$  que se disuelve en el seno dependiendo de las características de la solución), el calentamiento de la solución por radiación desde el quemador

a la solución, las corrientes de convección que producen los gases ascendentes que dan lugar a una buena homogeneización de la temperatura de la solución y la cantidad de calor que debe tener el gas para lograr que, el gas de la burbuja, saturado de vapor llegue como tal a la superficie del líquido y realmente tenga lugar la evaporación (de otra manera, si la burbuja no tiene temperatura suficiente para seguir ascendiendo el agua inicialmente evaporada condensaría y quedaría en la solución).



### Procesos de anhidración por cambio de fase

Por secado: El método de anhidración más sencillo es por exposición solar y a una corriente de aire seco. Este proceso es utilizado en la Puna, donde las condiciones climáticas (800  $\text{w/m}^2$  de radiación solar, humedad del aire: 5-10%, viento fuerte) son las apropiadas y permite la obtención de sulfato de sodio con 20% de agua conocido como “plumita”. Habitualmente el mineral extraído del yacimiento se emparva para su escurrimiento y luego se extiende en canchas preparadas en el mismo salar y se remueven dos veces en el día con rastrillos. Luego de una semana es posible zarandear el material extendido obteniéndose un producto que tiene una pureza del 75-80% dependiendo de la cantidad inicial de insolubles y cloruro de sodio presentes en la sal extraída del yacimiento, que pueden ser disminuidos (con el consiguiente aumento en la ley del sulfato anhidro) por lavado en tornillo Akins. No obstante estudios realizados en la zona con decahidrato puro demostraron que, el aporte de areniscas e insolubles por efecto del

viento impurifica considerablemente el producto. Por este motivo la anhidración del cristal puro es conveniente que se realice en cámaras de secado (Galli *et al.*, 1987).

Por cambio de fase: En este caso, la serie de procesos usados para la obtención de sulfato de sodio anhidro, están diseñados para emplear la siguiente característica inusual del mismo, cuando se calienta a  $32,33^\circ\text{C}$ , se alcanza el punto de transición en la curva de solubilidad y el sulfato de sodio decahidratado se disuelve en su propia agua de cristalización y cristaliza sulfato de sodio anhidro.

El proceso consiste en colocar el sulfato decahidratado en un recipiente para lograr su fundición, con el agregado de una solución templada saturada de sulfato de sodio (líquido madre). Como la temperatura de la solución se mantiene por encima de  $32,33^\circ\text{C}$ , los cristales del sulfato decahidratado cambian dentro del agua libre, los iones sodio y sulfato son suficientes para saturar el agua y cristaliza sulfato de sodio anhidro. Luego se adiciona calor para evaporar el líquido remanente causando la

cristalización del anhídrido adicional, los barros concentrados de sulfato de sodio anhídrido se envían a un clasificador, son centrifugados y la torta producida en la centrífuga es transportada a un secador rotatorio donde se remueve el agua libre. El material secado es conducido a un tanque de almacenamiento ([www.taxlinks.com/rulings/findinglist/revrulmaster.htm](http://www.taxlinks.com/rulings/findinglist/revrulmaster.htm)).

La solubilidad del sulfato de sodio a 32,33° C

es 50,4 kg/100 dm<sup>3</sup> de agua y el cambio de fase de 1kg de decahidrato puro produce 0,159 kg de anhídrido y 0,841 kg de solución. Teniendo en cuenta esto, el hecho de que a medida que aumenta la temperatura disminuye la solubilidad del sulfato anhídrido en agua, los calores específicos del sulfato anhídrido y de la solución en equilibrio se puede calcular el requerimiento energético necesario por kg de sulfato anhídrido.

T ( C ) final	Solubilidad	Masa de Anhídrido Precipitado	Requerimiento Energético por kg de Sulfato Anhídrido
32,33	0,504	0,159	1,564
40	0,488	0,168	1,607
50	0,467	0,180	1,653
60	0,453	0,188	1,725

En la tabla puede verse que a medida que aumenta la temperatura por encima de 32,33° C disminuye la solubilidad del sulfato de sodio anhídrido y que la masa de producto precipitado que puede recuperarse es mayor pero con un mayor requerimiento energético. Esto indica que es conveniente trabajar a una temperatura lo más próxima posible a 32,33° C.

En general, en las soluciones donde se precipita el sulfato anhídrido, existe cloruro de sodio en solución. Su presencia favorece una mayor precipitación del sulfato por efecto del ión común. Ensayos realizados especialmente, determinaron que, el contenido límite de cloruro de sodio en la solución en equilibrio con el sulfato anhídrido (durante la etapa de anhidración) debe variar entre el 8 y el 9% para asegurar la máxima ventaja en la precipitación por efecto del ión común ("salting out") (Galli *et al.*, 1987 y 2001).

En el proceso de anhidración el calor necesario para que se produzca el cambio de fase puede ser aportado al reactor de anhidración por un serpentín o camisa calentados por vapor producido en una caldera común o por una poza solar que trabaje como acumulador de energía.

En este último caso, la profundidad de la poza puede ser seleccionada para obtener el máximo rendimiento a una temperatura dada, es así que se ha sugerido que, a mayor profundidad, puede aumentarse la capacidad de acumulación, posibilitando la utilización para distintos usos (calefacción invernal por acumulación de toda la radiación y calor acumulado en el verano, secado de granos, etc.). Los rendimientos a obtener dependerán de la diferencia de

temperatura de extracción (en el punto de extracción en la parte inferior de la poza en la zona de convección), la temperatura ambiente externa, como así también de la irradiación. En esta función de acumulador de energía, la poza solar debe ser trabajada con sistemas de extracción de solución caliente desde la zona de convección inferior y retorno de la solución concentrada (luego de ceder su calor) en la misma zona, sin afectar el gradiente que se encuentra por encima, manteniendo la zona de aislación (Saravia *et al.*, 1977).

#### 2.6.5. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE SULFATO DE SODIO ANHÍDRIDO DE ALTA PUREZA

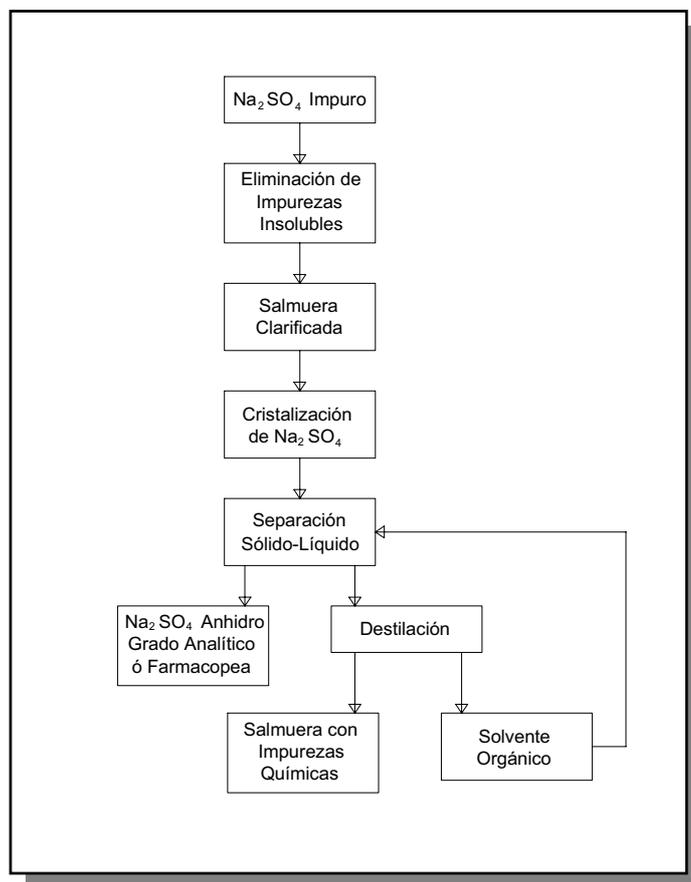
Se realiza una purificación para obtener un sulfato de sodio anhídrido de grado analítico ó para farmacoepa.

Los contaminantes principales del sulfato de sodio anhídrido comercial son los iones cloruro, magnesio y calcio, los cuales están presentes en una cantidad de 3000, 237 y 59 ppm respectivamente. Los límites exigidos son, en el caso del cloruro, 10 ppm para reactivo analítico y 450 ppm para farmacoepa, para el magnesio son 10 ppm para reactivo analítico y 200 ppm para farmacoepa y para el calcio, 50 ppm para reactivo analítico y 450 ppm en farmacoepa.

Para disminuir el contenido de iones cloruro se puede aprovechar la diferencia de solubilidad entre el sulfato de sodio y el cloruro de sodio. Al agregar un solvente orgánico, disminuye la

solubilidad, debido a la disminución de la solvatación de los iones y de la constante dieléctrica, que tienden a disminuir la ionización por aumento de la atracción entre iones positivos y negativos. Además, si dos aniones forman sales poco solubles con el mismo catión, el compuesto menos soluble precipitará primero.

En el proceso se somete a la salmuera clarificada, portadora de sulfato de sodio, a la extracción de iones cloruro con un solvente orgánico, de esta manera precipita sulfato de sodio anhidro y los iones cloruro se mantienen en solución. Dicho proceso se esquematiza en la siguiente figura:



(Cervera *et al.*, 1998 y 1999).

Los fundamentos de este proceso fueron mencionados anteriormente (ver 2.4.3. Métodos industriales de concentración de salmueras. Cristalización extractiva).

Brenner *et al.* (1992) estudiaron la cristalización de sulfato de sodio anhidro usando 1-propanol, 2-propanol y alcohol terbutílico (2-metilpropanol-2-ol).

Este proceso también puede ser utilizado para obtener sulfato de sodio y carbonato de sodio.

## 2.7. RECICLADO

En general, al hablar del ciclo de vida de las sales estudiadas, no se produce reciclado de las sales en sí, sino más bien, el reciclado de los materiales en cuya conformación se quedaron involucrados los aniones y cationes que aportó

cualquiera de las sales vistas en este capítulo.

### 2.7.1. CLORURO DE POTASIO

Como fuente de potasio por tonelada de vidrio reciclado, se puede evitar la extracción de la naturaleza de 196 kg de cloruro de potasio.

([www.uach.cl/organizacion/vicerrectoria/finanzas/ambiental/reciclaje.htm](http://www.uach.cl/organizacion/vicerrectoria/finanzas/ambiental/reciclaje.htm)).

### 2.7.2. CLORURO DE SODIO

La disposición final de la sal puede ser su dispersión en el medio ambiente, su disposición como relleno sanitario, a través de pérdidas por incineración o una combinación de las tres con algún sistema de reciclado.

Cuando la sal se agrega a los alimentos, es

asimilada instantáneamente por el cuerpo y el exceso de sal es eliminado.

En la industria, la sal es directamente empleada en los procesos de manufactura y descargada en la planta de tratamiento de efluentes. También es usada para deshielo de las autopistas, aquí la sal es disuelta y dispersada en el ecosistema.

En casi todos estos usos, la sal entra al medio ambiente luego de que ha sido totalmente consumida, ingresa a través del suelo, del agua, del aire y finalmente es transportada a los océanos donde se acumula.

La sal es un compuesto soluble que retiene su identidad hasta que el enlace entre el sodio y el cloruro se rompe con la entrada de energía. Por ejemplo, en la manufactura de cloro-soda usando electrólisis, los enlaces se rompen y cada elemento se separa, el cloro es liberado como gas y el sodio se combina con H<sub>2</sub>O para formar NaOH. El flujo de sal termina y comienza el flujo de material de cloro y soda cáustica. En este nuevo flujo de material puede ser requerido el agregado de sal para la manufactura de algún producto. El cloro y la soda cáustica son usados para la manufactura de otros productos, que son normalmente reciclados, arrojados a la atmósfera o enterrados.

Los productos que utilizaron sal durante su fabricación y que pueden ser reciclados son los plásticos de PVC, vidrio, elásticos, etc.

La sal directamente puede ser reciclada por tratamiento de agua usando la desalinización para recuperar NaCl (Kostick, Dennis S., 1993).

La salmuera residual que se obtiene a partir de la desalinización del agua de mar para obtener agua potable, podría ser aprovechada utilizando los procesos mencionados anteriormente para extraer todas las sales presentes en la salmuera (Ahmed, 2002).

### 2.7.3. CARBONATO DE SODIO

Los productores no realizan el reciclaje de soda ash, de todas formas los fabricantes de vidrio reciclan vidrio y de esta manera reducen el consumo de carbonato de sodio. (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/sodaash/610300.pdf>).

### 2.7.4. SULFATO DE SODIO

El sulfato de sodio puede ser recuperado de

las aguas residuales en el proceso de obtención de otras sales, como thernardita. De todas formas si la solución es muy diluída (< 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) el proceso de cristalización es energéticamente intensivo. En estos casos, puede ser considerado un proceso de membrana, un proceso de precipitación o métodos bioquímicos. (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

El sulfato de sodio forma parte de una gran escala industrial de reciclado, en la cual el material de deshecho se convierte en un producto con salida en el mercado. (The Industrial Minerals Handybook II, 1995)

## 2.8. SALUD Y SEGURIDAD

### 2.8.1. SALES DE LITIO

El carbonato de litio es utilizado en el tratamiento de maníacos depresivos, en dosis de 170 a 280 mg/día, también es utilizado en el tratamiento de herpes, alcoholismo y cáncer.

El ión litio es considerablemente más tóxico que el sodio, una dosis de 5 gr de cloruro de litio puede ser fatal.

### 2.8.2. CLORURO DE POTASIO

Se lo considera una sustancia no tóxica, por lo tanto no son necesarias medidas de protección de almacenamiento y manipulación.

La dosis diaria terapéutica (por ejemplo para tratamiento de deficiencia de potasio) es de 1 a 10 gramos por ingestión oral.

### 2.8.3. CLORURO DE SODIO

En todos los mamíferos, el sodio regula el volumen de sangre y mantiene el balance de fluidos y presión dentro y fuera de las células. También juega un rol importante en la transmisión del impulso nervioso, en la acción del corazón y en el metabolismo de carbohidratos y proteínas. El ión cloruro es esencial en el mantenimiento del balance ácido-base en la sangre y del balance osmótico en los tejidos, también es necesario para la activación de enzimas esenciales y para la formación de ácido clorhídrico en el estómago.

El requerimiento diario es difícil de establecer, dado que depende de la eliminación,

pero se recomienda un consumo diario de 1,1 a 3,3 gr para los adultos. El consumo excesivo puede provocar hipertensión arterial.

Excepto en el caso de infantes, la toxicidad oral de sal es apenas significativa, se considera una dosis tóxica de 200 a 280 gr para un adulto de 70 kilogramos.

#### 2.8.4. CARBONATO DE SODIO

Bajo condiciones normales de trabajo, no se producen efectos tóxicos. La dosis letal para humanos, por ingestión oral es de 15 gr, no se deben inducir vómitos y se debe solicitar ayuda médica. El carbonato de sodio tiene un efecto irritante sobre la piel y las membranas de las mucosas, en estos casos se debe lavar con abundante agua (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

Es común que los trabajadores en las minas de trona presenten irritación de nariz e incluso sangrado. La concentración máxima permitida para las partículas de trona en el aire es de 15 mg/m<sup>3</sup>.

Murray *et al.*, 1971, desarrollaron un método para determinar la concentración de polvo de trona en la atmósfera, usando un captador de muestras enano. Los resultados obtenidos fueron equivalentes a los usados en el método de muestreo gravimétrico, pero presenta la ventaja de emplear cortos períodos de muestreo, lo cual es favorable para obtener una estimación de la concentración de polvo durante las operaciones individuales de extracción. Como este nuevo método no permite la diferenciación entre los carbonatos y los componentes insolubles del mineral, para obtener una verdadera representación de los factores que afectan la salud ocupacional de los trabajadores de esa industria, es necesario desarrollar métodos de análisis más detallados.

#### 2.8.5. SULFATO DE SODIO

El sulfato de sodio es permitido como aditivo en la industria alimenticia. La inhalación del sulfato de sodio en polvo causa irritación de las membranas de las mucosas y a través del contacto prolongado con la piel produce sequedad. En la medicina es usado como laxante, diurético y antiácido (Handbook of Extractive Metallurgy, 1997).

## 2.9. BIBLIOGRAFÍA

- AHMED, M.; ARAQUEL A.; HOEY D.; THUMARUKUDY M.R.; GOOSEN M.F.A.; AL-HADDABIM.; AL-BELUSHI A., 2003. "Feasibility of salt production from inland RO desalination plant reject brine: a case study". *Desalination*, (158): 109-117.
- AITALA, R.; HENDRICKSON F. 1982. "The natural-synthetic soda ash rivalry intensifies fundamental cost structures for natural and synthetic soda ash production". 5<sup>th</sup> Industrial Minerals International Congress, Madrid: 89-97.
- ALONSO, E., GIL, J., GOMEZ, A., 1990. "Flotación de sales solubles de potasio". IV Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas, Jujuy, Argentina: 293-313.
- ALURRALDE, P., NANNI, N., PARTY, L., 1988. "Aprovechamiento integral de recursos de salares de la Puna Salteña". Primeras Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales, Salta, Argentina.
- BRENNER, D.K., ANDERSON, E.W., LYNN, S., PRAUSNITZ, J.M., 1992. "Liquid-liquid equilibria for saturated aqueous solutions of sodium sulfate + 1-propanol, 2-propanol, or 2-methylpropan-2-ol". *Journal of Chemical and Engineering Data*, 37 (4): 419-422.
- BURNS, M., COATES, G., BARNARD, L., 1994. "Use of Jameson cell flotation technology at Cleveland Potash Ltd., North Yorkshire, England". *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C, Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, May-August (103): C162-C167.
- CARRASCO, F., ESPLUGAS, S., 1985 a. "La combustión sumergida". *Afinidad, Revista*, 42 (Enero-Febrero): 75-81.
- CARRASCO, F., ESPLUGAS, S., 1985 b. "Simulación experimental de la combustión sumergida mediante borboteo de aire caliente". *Afinidad, Revista*, 42 (Marzo-Abril): 208-212.
- CERVERA, R.H., GUTIÉRREZ, L.V., CRUBELLATI, R., 1998. "Attenuation of contaminants in the process of obtaining a sodium sulfate at laboratory scale".

- Proceedings of the IV International Conference on Clean Technologies for the Mining Industry. Environment & Innovation in Mining and Mineral Technology, Universidad de Concepción, Chile, (2): 901-909.
- CERVERA, R.H., NOLASCO, E.J., GUTIEERREZ, L.V., 1999. "Control parameters in the sodium sulfate purification process". International Mining and Environmental Congress. Clean Technology: third Millennium Challenge, Lima, Perú.
- CIFTCI, S.; KIM, N.K., 1999. "Control schemes for an industrial rotatory calciner with a heat shield around the combustion zone". Industrial and Engineering Chemical Research, (38): 1007-1023.
- COLE, L., 1930. "The Salt Industry of Canada". Canada- Department of Mines, Chapter IV: 74-89.
- COMISION NACIONAL DE INVESTIGACIONES ESPACIALES, 1979. "Prospección de litio en la Puna". Argentina: 1-6.
- CORDINI, R., 1967. "Reservas salinas de Argentina". Instituto Nacional de Geología y Minería, Anales 13: 108.
- CRONAN, C., 1956. "Submerged combustion flames anew". Chemical Engineering, 63 (2): 163-167.
- DOUGLAS, E.W., ANDERSON, C.O., 1941. "Sumerged combustion as applied to sodium sulfate production". Chemical & Metallurgical Engineering, (5): 135-137.
- EVANS, R. K., 1986. "Further developments of the Salar de Atacama, Chile". 7<sup>th</sup> Industrial Minerals International Congress, Monte Carlo: 87-91.
- FOOT, D.G., HUIATT, J.L., FROISLAND, L.J., 1984. "Potash recovery from process and waste brines by solar evaporation and flotation". Bureau of Mines. RI/8911:1-26.
- GALLI, D., VILLALBA, H., ROJO, M., VILLEGAS, C., 2001. "Sulfato de sodio anhidro en el salar de La Laguna, Bolivia". Congreso Argentino de Geología Económica, Salta, Actas 2: 79-84.
- GALLI, D., VITURRO, C., VILLA, W., SARAVIA, L., LESINO, G., 1987. "Poza solar para la anhidración del sulfato de sodio por cambio de fase". XIV Jornadas sobre Investigaciones en Ciencias de la Ingeniería Química y Química Aplicada, Santa Fé, Argentina, (2): 519-524.
- GASKA, R.A., GOODENOUGH, R.D., STUART, G.A., 1965. "Ammonia as a solvent". Chemical Engineering Progress, 61(1): 139-144.
- HANCER, M., HU, Y., FUERSTENAU, M., MILLER, J., 1997. "Amine flotation of soluble sulfate salts". XX International Mineral Processing Congress, Aachen, (3): 715-723.
- HANDBOOK OF EXTRACTIVE METALLURGY, 1997. Edited by Fathi Habashi, (4): 2035-2036, 2040, 2090-2092, 2132, 2194-2196.
- HOLLAND, 1951. "New Type Evaporator". Chemical Engineering, January: 106-107.
- INDUSTRIAL MINERALS AND ROCKS, 1983. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. S. Lefond (Ed.), (2): 1187-1206, 1218-1219.
- KOSTICK, D.S., 1993. "The material flow of salt". Bureau of mines. IC/9343: 19-24
- KUNASZ, I., 1983. "Lithium Raw Materials" Industrial Minerals and Rocks. 5<sup>th</sup> Edition, (2): 876.
- KVIDAHL, R.; RALEIGH, CH., 1982. "New developments in trona mining". 5<sup>th</sup> Industrial Minerals International Congress, Madrid, España: 69-73.
- LASKOWSKI, J., 1994. "Flotation of potash ores". Reagents for Better Metallurgy (P.S. Mulukutla, ed.), SME, Littleton: 225-243.
- LASKOWSKI, J., VURDELA, R., LIU, Q., 1988. "The colloid chemistry of weak-electrolyte collector flotation". XVI International Mineral Processing Congress, Amsterdam: 703-714.
- LESINO, G., MANGUSSI, J., SARAVIA, L., GALLI, D., RIERA, J., 1980. "Incorporación de las pozas solares al proceso industrial de producción de sulfato de sodio". Actas de la 6<sup>o</sup> Reunión de Trabajo de ASADES, Catamarca: 143-164.
- LESINO, G., SARAVIA, L., GALLI, D., 1988. "Aplicaciones de energía solar en la producción de sales". Primeras Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales, Salta, Argentina.
- LESINO, G., SARAVIA, L., MANGUSSI, J.,

- CASO, R., GALLI, D., RIERA, J., 1981. "Construcción y operación de la poza de sulfato de sodio de Sociedad Minera Pompeya S.A." Actas de la 7° Reunión de Trabajo de ASADES, Rosario, Argentina: 69-74.
- LEUTZ, R., 1974. "The recovery of sodium chloride from sea water". International Journal of Mineral Processing, Revista, (2): 163-171.
- MANGUZZI, J., LESINO, G., SARAVIA, L., GALLI, D., 1980. "Incorporación de las pozas solares en el proceso industrial de producción de sulfato de sodio". Actas de la 6° Reunión de Trabajo de ASADES: 65-83.
- MANNION, L. E., 1983. "Sodium Carbonate Deposits". Industrial Minerals and Rocks. 5<sup>th</sup> Edition. S.J. Lefon Ed. Society of Mining Engineers, (2): 1187-1205.
- MC CONNELL, R., GILCHRIST, I., 2001. "Improvements in recovery efficiency at Cleveland Potash". Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C, Mineral Processing and Extractive Metallurgy, January-April (110): C55-C59.
- MILLER, J., YALAMANCHILI, M., 1994. "Fundamental aspects of soluble salt flotation". Minerals Engineering, 2/3 (7): 305-317.
- MURRAY, J., TERRY, L.S., 1971. "A method for sampling and analyzing trona dust". Bureau of mines. IR/7506: 1-4.
- O'BRIEN T.F., 1986. "Control of sulfates in membrane-cell brine systems". Modern chlor-alkali technology. Society of Chemical Industry, Kevin Wall Editor, (3) Chapter 23: 327-349.
- OOSTERHOF, H.; DE GRAAUW, J.; WITKAMP, G-J.; VAN ROSMALEN, G., 2002. "Continuous double recrystallization of light soda ash into super dense soda ash". Crystal Growth and Design, 35 (2): 151-157.
- ÖZCAN, Ö.; CELIK, M.S.; NICKOLOV, Z.S.; MILLER, J.D., 2003. "Effect of thermal stability on the flotation response of sodium carbonate salts". Minerals Engineering, (16): 353-358.
- PANORAMA MINERO, 1992. "El salar del hombre muerto", Revista, Enero-Febrero (172): 15-16.
- PANORAMA MINERO, 1994. "El salar del hombre muerto", Revista, Marzo-Abril (180): 23-25.
- PANORAMA MINERO, 1996. "Los avances del salar del hombre muerto", Revista, Septiembre (205): 60-65.
- PANORAMA MINERO, 2002. "FMC-proyecto Fenix. Minera del altiplano S. A.", Revista, Julio (273): 18-22.
- PAWLIK, M., LASKOWSKI, J., ANSARI, A., 2003. "Effect of carboxymethylcellulose and ionic strength on stability of mineral suspensions in potash ore flotation systems" J. of Colloid & Interface Science. (260): 251-258.
- RICHARDS, A., 1960. "Informe sobre las posibilidades de producción de sal solar de buena calidad en el Ecuador". Por iniciativa del Ministerio del Tesoro y de la misión de operaciones de los Estados Unidos. Administración de Cooperación Internacional: 1-90.
- ROMAN, R., FUERSTENAU, M., SEIDEL, D., 1968. "Mechanisms of soluble salt flotation". Parte I, Trans AIME (241): 56-64.
- SARAVIA, L., LESINO, G., BEKERMAN, C., RAGOT, D., 1977. "Aspectos técnicos del funcionamiento de una poza solar". Actas de la 3° Reunión de Trabajo de ASADES, Mendoza: 85-100.
- SARQUÍS, P., GONZÁLEZ, M., 2000. "Flotación de KCl a partir de sal recristalizada". VI Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales, Salta, Argentina, (1): 195-200.
- SARQUÍS, P., LENZO, R., 1994. "Separación de silvita con colectores catiónicos". III Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales, San Luis, Argentina: 153-156.
- SCHALAMUK, I., DEL BLANCO, M., MARCHIONNI, D., ROMERO, S., CÁBANA C., 1999. "Salinas y sulfateras de la región pampeana, Buenos Aires y La Pampa". En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. Z.O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Buenos Aires, Anales 35: 1947-1962.
- SCHUBERT, H., 1967. "What goes on during potash flotation". Engineering and Mining Journal, 168 (3): 94-97.

- SEDIVY, V., 1996. "Purification of salt for chemical and human consumption". Industrial Minerals, Zurich, Suiza. Industrial Minerals: 1-19.
- SZARKA, G., 1992. "Tecnologías modernas de explotación de sal por disolución con sondeos individuales: métodos con columna de explotación cementera e inyección intermedia de agua". Congreso Mundial de Minería-Perspectivas para la Minería, Madrid, España, (1): 735-744.
- TABOADA, M., PALMA, P., GRABER, T., 2003. "Crystallization of potassium sulfate by cooling and salting-out using 1-propanol in a calorimetric reactor". Cryst. Res. Technol., 38 (1): 21-29.
- THE INDUSTRIAL MINERALS HANDBOOK III. "Lithium Minerals and Brines": 113-116.
- TING, A.M., LYNN, S., PRAUSTNITZ, J.M., 1992. "Liquid-liquid equilibria for aqueous systems containing N, N-diethylmethanamine and sodium chloride or sodium sulfate". Journal of Chemical Engineering Data, 37 (2): 252-259.
- TITKOV, S., SABIROVB, R., PANTELEEVA, N., 2003. "Investigations of alkylmorpholines, collectors for a new halite flotation process". Minerals Engineering, 16 (11): 11661-11666.
- UDYMA, P.G., KOLACH, T.A., 1966. "Hydrodynamics and heat transfer in submerged combustion apparatus". British Chemical Engineering, 2 (2): 106-109.
- WANG, Q., ALONSO, E., LASKOWSKI, J., 1995. "The effect of frothers on potash ore flotation". Proceedings of the XIX International Mineral Processing Congress, Flotation Operating Practices and Fundamentals-San Francisco, USA, (3): 49-53.
- WEINGAERTNER, D.A., LYNN, S., HANSON, D.N., 1991. "Extractive crystallization of salts from concentrated aqueous solution". Industrial and Engineering Chemical Research, (30): 490-501.
- WEISMAN, W., ANDERSON, R.C., 1953. Mining Engineering, 5 (7): 711-715.
- YALAMANCHILI, M., KELLAR, J., MILLER, J., 1993. "Adsorption of collector colloids in the flotation of alkali halide particles". International Journal of Mineral Processing, (39): 137-153.
- YALAMANCHILI, M., MILLER, J., 1995. "Removal of insoluble slimes from potash ore by air-sparged hydrocyclone flotation". Minerals Engineering, 1/2 (8): 169-177.
- PAGINAS WEB
- <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/sodaash/610300.pdf>
- [www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/ch08/bgdocs/b08s12.pdf](http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/ch08/bgdocs/b08s12.pdf), "Background Report AP-42 section 5.16. Sodium carbonate production" US. Environmental Protection Agency.
- [www.people.virginia.edu/~jtd/iccidd/iodman/iodman8.htm](http://www.people.virginia.edu/~jtd/iccidd/iodman/iodman8.htm)
- [www.saltinstitute.org](http://www.saltinstitute.org)
- [www.taxlinks.com/rulings/findinglist/revrulmaster.htm](http://www.taxlinks.com/rulings/findinglist/revrulmaster.htm), "Rev.Rul.82-175 1982-2 C.B. 115, 1982-42 I.R.B. 7."
- [www.uach.cl/organizacion/vicerrectoria/finanzas/ambiental/reciclaje.htm](http://www.uach.cl/organizacion/vicerrectoria/finanzas/ambiental/reciclaje.htm)

## Capítulo 3

# MATERIALES Y PRODUCTOS QUÍMICOS A BASE DE SALES INORGÁNICAS

### 3.1. SALES DE LITIO

#### 3.1.1. CLORURO DE LITIO

##### Propiedades físicas y químicas

Algunas de las propiedades físicas más importantes del cloruro de litio se observan en la siguiente tabla:

Propiedades físicas del cloruro de litio	
Masa molecular	42,40
Punto de fusión	614°C
Punto de ebullición	1382°C
Densidad	2,07 g.cm <sup>-3</sup>

Fuente: Bauer, 1990

La sal anhidra se obtiene directamente por cristalización a temperaturas superiores a 95°C, y es muy higroscópica. Es un compuesto muy soluble en agua como se indica en la siguiente tabla:

Temperatura (°C)	Solubilidad (g de sal /100 g de agua)
20	83,2
40	89,8
60	98,4
80	111,9
100	128,3

Fuente: Bauer, 1990

A diferencia de los cloruros de otros metales alcalinos, es fácilmente soluble en alcoholes y en piridina. Su solubilidad en etanol a 25°C es de 2,5 g /100 g y 17 g /100 g en metanol.

Dado que esta sal es extremadamente higroscópica, se la emplea en el secado de gases y como deshumificante en acondicionadores de aire. Debido a que el LiCl fundido disuelve muy fácilmente los óxidos metálicos, se utiliza como un componente de fundentes para soldaduras de aluminio y de aleaciones metálicas livianas. Al igual que el carbonato de litio, se emplea en los baños de criolita en las celdas de reducción electrolítica del Al, donde es convertido a LiF. Esta sal disminuye el punto de fundición del baño y permite operar a bajas temperaturas, aumentando la conductividad eléctrica y re-

duciendo el consumo de carbón. Tiene un amplio uso en la industria del vidrio y de los cerámicos.

La mayor parte del LiCl producido se emplea como material de partida para la producción de litio metálico por fusión electrolítica. También se usa, en su composición fundida eutéctica con KCl, en metalurgia. La composición es de 59% de LiCl y 41% en KCl, y la mezcla funde a 352°C (Bach y Wasson, 1981; Bauer, 1990; Industrial Minerals and Rocks, 1994; Harben y Edwards, 1997a; Mari y Hevia, 1996).

#### 3.1.2. CARBONATO DE LITIO

##### Propiedades físicas, químicas y usos

Propiedades físicas del carbonato de litio	
Masa molecular	73,89
Punto de fusión	726°C
Densidad a 25°C	2,11 g.cm <sup>-3</sup>
Densidad aparente	0,8 g.cm <sup>-3</sup>

Fuente: Bauer, 1990

El carbonato de litio, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, es una de las sales más importantes del litio. A 800°C, en atmósfera de hidrógeno, se descompone parcialmente en Li<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. Como todos los carbonatos insolubles de los metales alcalino-térreos, reacciona en suspensión acuosa en presencia de ácido carbónico, según la siguiente reacción:



El carbonato de litio es poco soluble en agua; la misma decrece con el incremento de la temperatura como se indica en la tabla siguiente

Solubilidad del carbonato de litio	
Temperatura (°C)	Solubilidad (g de sal/100 g H <sub>2</sub> O)
0	1,54
20	1,33
40	1,17
60	1,01
80	0,85
100	0,72

Fuente: Bauer, 1990

El carbonato de litio es el material de partida para la producción industrial de los restantes com-

puestos de litio, y de litio metálico. Los usos principales de este compuesto se detallan a continuación:

<b>CARBONATO DE LITIO</b>	
<b>USOS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Industrias del vidrio y de los cerámicos	<p>Estas industrias emplean cantidades importantes de carbonato de litio (como aditivo) en la fabricación de vidrios borosilicatos (para tubos de televisores, y vitrocerámicos), esmaltes, fibra de vidrio (como refuerzo de hormigones), vidrios especiales, y en cerámicos (enlozados) para productos con bajos coeficientes de expansión térmica. La función de la sal es reducir el punto de fusión de la mezcla (muy importante en los esmaltados). También puede emplearse para modificar algunas propiedades importantes del vidrio, como ser la viscosidad y el coeficiente de expansión térmica.</p> <p>La disminución del punto de fusión y una baja viscosidad de la mezcla, permiten mejorar la calidad del vidrio. Tales mejoras están referidas a disminuir los defectos, como ser la eliminación rápida de pequeñas burbujas, y la fusión parcial de los granos de la materia prima.</p> <p>En cerámicos, el carbonato de litio reduce el coeficiente de expansión térmica.</p>
Industria del aluminio	<p>El carbonato de litio interviene en el proceso Hall-Heroult para la obtención de dicho metal. Dicho proceso consiste en efectuar la electrólisis de una mezcla fundida de bauxita, disuelta en criolita y fluorita. El carbonato de litio se agrega a la cuba electrolítica donde se convierte en fluoruro de litio, según la siguiente reacción:</p> $3\text{Li}_2\text{CO}_3 + 2\text{AlF}_3 \rightarrow 6\text{LiF} + 3\text{CO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ <p>La sal produce los siguientes efectos: a) disminución del punto de fusión del baño (entre 10 y 25°C), lo cual permite a la celda operar a una menor temperatura y, en consecuencia, reducir el consumo de energía entre 3 y 10%; b) disminución de la densidad y de la viscosidad del fundido.</p> <p>La presencia de Li reduce la volatilidad de las sales de flúor, lo cual es importante debido a las estrictas regulaciones ambientales. Por esta razón, está reemplazando al <math>\text{CaF}_2</math>.</p>
Medicinales	<p>En psiquiatría, se emplea el carbonato de litio altamente purificado (en dosis de 150-500 mg) en pacientes maníaco-depresivos, en manías agudas, y en enfermedades esquizo-afectivas. Se han informado tratamientos exitosos de herpes, alcoholismo y cáncer, empleando esta sal, complementados con quimioterapia.</p> <p>Otras sales de Li, como el citrato, se emplean con igual propósito. No presentan riesgos para la salud.</p>
Baterías	<p>Hay un considerable incremento en la utilización de baterías de litio. Las mismas se caracterizan por almacenar gran cantidad de energía por unidad de peso y de volumen. La utilización de estas baterías se extiende a productos tales como calculadoras, cámaras fotográficas y relojes; también en productos que emplean baterías recargables como teléfonos portátiles, video cámaras y, potencialmente, en vehículos (Bach y Wasson, 1981; Bauer, 1990; Industrial Minerals and Rocks, 1994; Harben y Edwards, 1997a; McCracken y Haigh, 1998).</p>

CLORURO DE POTASIO	
USOS	OBSERVACIONES
<b>Fertilizantes</b>	El potasio forma parte de los elementos esenciales denominados mayores de la planta (aquellos cuyo requerimiento es de 1mg / g de materia seca). Se absorbe en forma iónica ( $K^+$ ), el que es aportado por el KCl, y no forma parte de ninguna estructura química de los vegetales. Su función es la de activar numerosas enzimas y, debido a su abundancia en las células, es el principal contribuyente del potencial osmótico de las mismas.
<b>Otros</b>	Se emplea en la producción electrolítica de hidróxido de potasio y de otros compuestos de este metal. Otras aplicaciones importantes están en la industria del petróleo, en la fundición del Al, en el enchapado metálico, y aplicaciones en las industrias farmacéutica y alimenticia (Schultz <i>et al.</i> ,1993; Huffman, 1980; Salisbury y Ross, 1991).

### 3.2. CLORURO DE POTASIO

#### Propiedades físicas, químicas y usos

El cloruro de potasio, KCl, es una sal que cristaliza en el sistema cúbico, formando cristales incoloros, no higroscópicos.

A continuación, se indican algunas de las más importantes propiedades físicas de este compuesto.

Propiedades físicas del cloruro de potasio	
Masa molecular relativa	74,55
Punto de fusión	771°C
Densidad	1,987 g.cm <sup>-3</sup>
Índice de refracción $n_D^{20}$	1,4903
Calor específico	693,7 J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Calor de fusión	337,7 kJ / kg
Entalpía de formación	-436,7 kJ / mol
Entropía	82,55 J.mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Dureza Mohs	2-2,5
Dureza Brinell	14 HB
Constante dieléctrica (a 10 <sup>6</sup> Hz)	4,68
Coefficiente de expansión térmica (15-25°C)	33,7.10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

Fuente: Schultz *et al.*,1993

La solubilidad de esta sal en agua se indica a continuación:

Temperatura (°C)	Solubilidad (g de sal/100 g de agua)
0	28,1
10	31,2
20	34,2
30	37,2
40	40,2
50	43,1
60	45,9
70	48,6
80	51,3
90	53,8
100	56,2

Fuente: Schultz *et al.*,1993

### 3.3. CLORURO DE SODIO

#### Propiedades físicas, químicas y usos

El cloruro de sodio es una sal blanca con una buena solubilidad en agua. Químicamente puro presenta dos propiedades: a) no es higroscópico, pero pasa a serlo en presencia de sales de Mg como impurezas; y b) cristaliza en el sistema cúbico a partir de soluciones acuosas saturadas. En presencia de impurezas, forma cristales octaédricos o dodecaédricos. Las mezclas de ácidos orgánicos con NaCl son altamente corrosivas.

La sal es soluble en solventes polares e insoluble en solventes no polares. Su solución acuosa es neutra.

Se indica en la siguiente tabla la solubilidad de la sal con relación a distintos solventes.

Solvente	Temperatura (°C)	g NaCl / 100 g agua
Metanol	25	1,40
Etanol	25	0,065
Acido fórmico	25	5,21
Etilenglicol	25	7,15
Monoetanolamina	25	1,86
Amoníaco (líq.)	-40	2,15
Agua	0	35,7

Fuente: Heiss y Kuhacek, 1983

Algunas de las propiedades físicas más importantes de este compuesto se indican a continuación:

Propiedades físicas del cloruro de sodio	
Punto de ebullición	2316°C
Punto de fusión	801°C
Densidad a 25°C	2,1615 g.cm <sup>-3</sup>
Dureza Mohs	2-2,5
Dureza Brinell	14 HB
Constante dieléctrica	5,9
Índice de refracción	1,5443
Resistividad eléctrica a 20°C	4,6.10 <sup>16</sup> Ω.cm
Resistividad eléctrica a 100°C	1,38.10 <sup>13</sup> Ω.cm
Conductividad térmica a 17°C	0,072 W.cm <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Coefficiente de expansión lineal	40,5 μm/mK
Entalpía de formación a 25°C	-410,9 kJ.mol <sup>-1</sup>
Entropía a 25°C	72,36 J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Calor latente de fusión	0,52 kJ.g <sup>-1</sup>
Calor latente de evaporación	2,91 kJ.g <sup>-1</sup>
Viscosidad de la solución acuosa saturada	1,93 mPa.s
Densidad del NaCl fundido a 801°C	1,549 g.cm <sup>-3</sup>
Viscosidad del NaCl fundido a 850°C	1,29 mPa.s
Tensión superficial del NaCl fundido a 850°C	110 mN.m <sup>-1</sup>
Conductividad eléctrica del NaCl fundido a 850°C	3,7 S.cm <sup>-1</sup>

Fuente: Westphal *et al.*, 1993

### Sal de mesa

La sal de mesa se emplea habitualmente como un transportador de yodo, un nutriente traza. En el cuerpo humano, el yodo interviene en la formación de la hormona tiroxina. Varias enfermedades humanas están asociadas con el funcionamiento inadecuado de la glándula

tiroides. Es necesario distinguir entre aquellas que se deben a una producción excesiva de la hormona (hipertiroidismo), y aquellas que se deben a una producción insuficiente de la misma (hipotiroidismo). Cantidades inadecuadas de yodo en la dieta producen la enfermedad conocida como bocio.

La recomendación diaria en la dieta aconseja unos 150 mg de yodo en los adultos. Sin embargo, suele superarse dicha cantidad ya que los alimentos para animales contienen yodo como aditivo.

El único agente iodante permitido en los EEUU en la sal de mesa es el KI. Su concentración es inferior a 0,01%. En ambientes húmedos, esta sal es inestable y –muy especialmente– en ambientes ácidos. En consecuencia, la solución iodada que se agrega a la sal de mesa contiene Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> para brindar mayor alcalinidad. Como estabilizador se emplea tiosulfato de sodio o dextrosa. Sin la presencia de alguno de estos compuestos, el KI se oxida a yodo, desnaturalizando la sal. En algunos países la sal de mesa se usa como transportador de iones fluoruro, el cual previene las caries.

### Sustitutos comerciales del NaCl

La mayoría de los sustitutos comerciales de esta sal están formulados a base de KCl. Los ingredientes típicos que se le agregan son: citrato de potasio, ácido fumárico, cloruro de amonio, fosfato diácido de calcio, fosfatos de potasio, ácido cítrico, ácido tartárico, bitartrato de potasio, ácido glutámico y glutamato de potasio. Los mismos tienen la finalidad de modificar las principales características que presenta el KCl como sustituto, es decir, la sensación refrescante cuando se disuelve en la boca, y su característico sabor amargo.

CLORURO DE SODIO	
USOS	OBSERVACIONES
Industria alimenticia	<p>Históricamente, esta sal se utiliza para saborizar y preservar carnes y pescados. Con el propósito de dar gusto a los alimentos, sólo es superada por el consumo de azúcar.</p> <p><i>Intensificar el gusto:</i> El cloruro de sodio mejora el sabor de muchos alimentos, contribuyendo a su aceptación por los consumidores. Sin la presencia de esta sal, la manteca tiende a ablandarse, los quesos a tener gusto amargo y acidificarse, y las carnes procesadas carecen de textura y sabor.</p> <p><i>Preservación de alimentos:</i> Dado que retarda el crecimiento de microorganismos, esta sal preserva carnes y pescados, quesos, pickles, margarina, aceitunas y muchos otros alimentos.</p> <p><i>Control de la fermentación y desarrollo del color:</i> En fiambres y embutidos, el cloruro de sodio promueve el color natural de estos productos, al cual los consumidores están acostumbrados. Esto asegura consistencia en el color, sabor y en la textura de los productos terminados. Con relación a la textura, el cloruro de sodio desarrolla consistencia en quesos y embutidos. Ayuda también a desarrollar la cáscara característica de los quesos duros.</p>
Industriales	<p>Se utiliza de manera creciente en la regeneración de resinas de intercambio catiónico, empleadas para "ablandar el agua".</p> <p>En ganadería, el cloruro de sodio es un nutriente (<math>\text{Na}^+</math>) para animales, y también actúa como un transportador de minerales traza y de vitaminas.</p> <p>Se lo utilizó de manera experimental para mejorar la remoción de <math>\text{SO}_2</math> mediante piedra caliza durante el proceso de combustión del carbón (Heiss y Kuhajek, 1983).</p>

Habitualmente, una amplia variedad de especias, hierbas y condimentos se emplean en las dietas que requieren un bajo contenido de sodio, con el fin de contrarrestar el poco gusto de los alimentos no salados (Heiss y Kuhajek, 1983).

ácido carbónico. Junto con el cloruro es la sal más importante del sodio, y es una de las materias primas más utilizadas en la industria química. La amplia variedad de usos, principalmente en limpieza y en la fabricación de vidrio, lo hacen un compuesto indispensable.

### 3.4. CARBONATO DE SODIO

#### Propiedades físicas, químicas y usos

El carbonato de sodio es la sal neutra del

Existen los siguientes hidratos de este compuesto: carbonato de sodio monohidratado,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; carbonato de sodio heptahidratado,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; y carbonato de sodio decahidratado,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . En la tabla siguiente se indican las principales propiedades físicas de dichas sales.

Propiedades físicas del carbonato de sodio y sus hidratos				
	Anhidro	Monohidrato	Heptahidrato	Decahidrato
Fórmula	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Masa molecular	105,99	124,00	232,10	286,14
Densidad a 20°C ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2,533	2,25	1,51	1,469
Punto de fusión °C	851	105	35,37	32,0
Calor de fusión ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ )	316	----	-----	-----
Capacidad calorífica específica a 25°C ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1,043	1,265	1,864	1,877
Calor de formación ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ )	10,676	----	-----	-----

Fuente: Thieme, 1993

<b>CARBONATO DE SODIO</b>	
<b>USOS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Industria química	<p>Se emplea para neutralizar ácidos orgánicos e inorgánicos o sales acídicas, y para mantener el pH constante en procesos donde se liberan ácidos. Interviene en la producción de agentes blanqueadores, bórax, fertilizantes, colorantes, taninos, agentes de limpieza, catalizadores, criolita, adhesivos, carbonatos metálicos, nitrato de sodio, perboratos y en pigmentos. Se emplea también en la fabricación de detergentes sintéticos y en jabones. Se utiliza, además, para producir sales de Na: fosfatos, polifosfatos, nitratos, cromatos, dicromatos, citratos, tartratos y sales ácidas. En soluciones acuosas se usa para remover SO<sub>2</sub> formando Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> y NaHCO<sub>3</sub>, según las siguientes reacciones:</p> $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{CO}_2$ $\text{CO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaHCO}_3$ $2 \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + 2 \text{NaHCO}_3$
Otras aplicaciones	<p><i>Industria del papel y de la pulpa:</i> en reacciones de neutralización, limpieza y tratamiento de papel reciclado.</p> <p><i>Industria petroquímica:</i> en reacciones de neutralización.</p> <p><i>Industria de la seda artificial:</i> deacidificante de la seda artificial.</p> <p><i>Industria textil:</i> en la coloración, limpieza, y en procesos de finalización de algodón y lana.</p> <p><i>Plantas de hidrogenación:</i> en procesos de purificación de gas por desulfurización.</p> <p><i>Industria del hierro y del acero:</i> en la remoción de azufre y fósforo del acero y del hierro fundido.</p> <p><i>Industria minera:</i> como regulador de pH y como reactivo en la síntesis de reactivos de flotación.</p> <p><i>Industria de metales pesados:</i> obtención de Sb, Pb, Cr, Co, Ni, Bi y Sn por lixiviación alcalina a partir de los minerales portadores.</p> <p><i>Industria del vidrio:</i> Es la materia prima más utilizada para introducir Na<sub>2</sub>O en el vidrio. Este óxido actúa como fundente, esto es, favorece la formación del vidrio disminuyendo su temperatura de fusión. Los óxidos que así actúan son los modificadores de red y, dentro de ellos, los alcalinos son los que mejor cumplen esta función.</p> <p><i>Industria del aluminio:</i> en la reacción con bauxita.</p> <p><i>Industria del esmalte:</i> sirve como materia prima para introducir Na<sub>2</sub>O en el esmalte. El Na<sup>+</sup> (como los otros iones alcalinos) actúa como modificador del retículo vítreo, provocando la relajación de la estructura vítrea y, en consecuencia, disminuyendo el punto de ablandamiento y fluidez del esmalte. Por otra parte, dado que el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es soluble en agua, se utiliza para fabricar frita. Normalmente las fritas son el resultado de la fusión de los compuestos solubles (carbonatos de los diferentes álcalis, bórax y ácido bórico) y de otros componentes que se agregan para ajustar la composición química de la misma. Los esmaltes basados en fritas se componen de una o varias fritas, con adición de un plastificante como caolín plástico lavado, molidos por vía húmeda en un molino de bolas hasta una granulometría fina. Estos esmaltes tienen como propósito la necesidad de insolubilizar los compuestos solubles en agua, transformándolos por fusión y brusco enfriamiento en un cuerpo vítreo insoluble.</p> <p><i>Industria de los alimentos:</i> hidrólisis de proteínas, producción de margarina y almidón, y azúcar de remolacha.</p> <p><i>Otras ramas de la industria:</i> se emplea además en el tratamiento de aguas y en el desengrasado de superficies metálicas.</p> <p>En protección ambiental, se emplea en la purificación de gases industriales (Thieme, 1993; Mari, 1982; Fernández Navarro, 1985; Pechey, 1998; Hevia, 2003).</p>

Propiedad	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O
Masa molecular	142,040	322,190
% de agua de cristalización	0	55,914
Punto de fusión	884,0	32,384
Cristales	Rómbicos	Monoclínicos
Indíces de refracción n <sub>D</sub>	1,464; 1474; 1,485	1,394; 1,396; 1,398
Densidad (g.cm <sup>-3</sup> )	2,697	1,468
Capacidad calorífica (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	899,2	1825,7
Calor de fusión( kJ.kg <sup>-1</sup> )	147,98	214,52
Constante dieléctrica a 10 <sup>3</sup> Hz	7,80	7,90
Entropía (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	149,60	588,2
Entalpía de formación (kJ/mol)	-1385	-4327
Dureza Mohs	2,7	1,5-2

Fuente: von Plessen, 1993

Las principales propiedades químicas son:

a) Descomposición térmica: el carbonato de sodio descompone a óxido de sodio y dióxido de carbono en vacío y en ausencia de sustancias activantes tales como vapor de agua, comienza a los 1000°C. La presión de disociación es de 0,2 kPa y se incrementa a 10,3 kPa a 1450°C.

b) Reacción con agua y dióxido de carbono: el carbonato de sodio es higroscópico. En contacto con el aire y con una humedad relativa de 96%, su peso se incrementa 1,5% en 30 minutos. Si este compuesto se almacena en ambientes levemente húmedos, su alcalinidad decrece debido a la absorción de humedad y CO<sub>2</sub> de la atmósfera, según la siguiente reacción:



c) Reacción con elementos: el carbonato de sodio reacciona exotérmicamente con cloro a temperaturas superiores a 150°C formando NaCl, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NaClO<sub>4</sub>. Si se encuentra fundido, ataca los siguientes elementos: Pt, Au, V, Ti, Zr, Mo, Tu y al Fe a 1200°C. En todos los casos, libera CO<sub>2</sub> y forma complejos metálicos óxido-óxido de sodio. A temperaturas superiores, el Na<sub>2</sub>O formado reacciona con un exceso de metal para formar vapor de sodio. El carbonato de sodio reacciona muy lentamente a 1500°C con Cu y Ni.

### 3.5. SULFATOS DE SODIO

#### Propiedades físicas, químicas y usos

El sulfato de sodio es una sal que se conoce desde el siglo XVI. Fue descrita por primera vez por J.R.Glauber en 1658. La tabla superior compara las propiedades físicas del sulfato de sodio anhidro (tenardita) y la forma decahidratada conocida como la sal de Glauber. La forma heptahidratada es inestable y puede detectarse en soluciones saturadas por debajo de los 12°C.

En la tabla siguiente se indica la solubilidad del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en agua en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	% de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> disuelto
10	8,25 a *
15	11,7 a
25	21,8 a
30	29,9 a
33	33,2 a,b
50	31,7 b
75	30,4 b
100	29,7 b

Fases sólidas: a= Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O; b= Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (tenardita)

Fuente: von Plessen, 1993

Con relación a las propiedades químicas, el sulfato de sodio anhidro, en presencia de aire húmedo, toma agua de cristalización con un considerable incremento en volumen. Esto ocasiona daños considerables en la industria de

la construcción, ya que aquellos edificios hechos de concreto sufren fisuras como consecuencia de soluciones conteniendo sulfato de sodio.

Su reactividad varía ampliamente con la temperatura. En estado sólido y a temperatura

ambiente, el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  es relativamente inerte, pero forma ácidos en presencia de ácido sulfúrico. Impurezas de sílice, alumina y óxidos de hierro facilitan su descomposición, por encima de  $1100^\circ\text{C}$ , a  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{O}_2$ , y  $\text{Na}_2\text{O}$ .

<b>SULFATOS DE SODIO</b>	
<b>USOS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Industria del vidrio	<p>El <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> que se adiciona a la mezcla constituye un aporte indirecto de <math>\text{Na}_2\text{O}</math> al vidrio.</p> <p>Su uso en esta industria está declinando debido a las siguientes desventajas: a) la liberación de <math>\text{SO}_2</math> de la mezcla de fusión origina problemas de polución; b) una fuerte acción agresiva sobre el material refractario; c) el difícil mantenimiento del equilibrio carbón-sulfato; y d) puede inducir perturbaciones en el vidrio (burbujas de sulfato, coloración amarillenta).</p> <p>Por estas razones, sólo se puede introducir, como máximo, entre un 20-25% del total de <math>\text{Na}_2\text{O}</math> en forma de sulfato en algunas fabricaciones de vidrio plano.</p> <p>Las especificaciones exigen un 92% mínimo de esta sal, un contenido máximo de cloruros del 2%, y un contenido de insolubles en agua del 2% como máximo para vidrios planos, y del 1,8% como máximo en vidrios para envases.</p> <p>El uso de sulfato exige la adición aproximada de 6 a 8% de su peso en carbón para su reducción a sulfito. Como fuentes de sulfato de sodio pueden emplearse tenardita, glauberita y mirabilita, aunque la forma anhidra es la más común.</p>
Detergentes	<p>Las propiedades inertes del <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> hacen de esta sal un componente adecuado en los detergentes hogareños. Se hace mucho hincapié tanto en la blancura como en el tamaño de partículas del <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math>, las cuales mejoran la apariencia y las propiedades de manejo de los detergentes. El <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> anhidro es el preferido debido a su blancura y su elevada pureza.</p>
Otros	<p>En la industria de las tinturas, tanto el <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> como el <math>\text{NaHSO}_4</math> se usan para diluir o estandarizar el colorante y para ajustar el pH.</p> <p>En la industria del papel se aplica en el proceso de producción de pulpa de papel denominado <i>Kraft</i>. Los reactivos que se usan en la digestión de la pulpa consisten de 2/3 de <math>\text{NaOH}</math> y 1/3 <math>\text{Na}_2\text{S}</math>, los cuales se obtienen empleando como materia prima <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> de baja calidad.</p> <p>El <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> se emplea en alimento para el ganado. Un interés reciente está puesto en el uso de la sal de Glauber como medio para almacenar energía, el que se encuentra en su etapa experimental. Sin embargo, presenta el inconveniente de requerir un volúmen muy elevado de sulfato.</p> <p>El <math>\text{NaHSO}_4</math> en estado sólido provee la acidez suficiente para usos hogareños como limpiadores de toilettes, también se emplea en la limpieza de radiadores de automóviles, para ajustar el pH en piletas de natación y como desinfectante de pisos.</p> <p>Industrialmente, se usa en el tratamiento electroquímico de metales, como un agente reductor de colorantes y en el endurecimiento de ciertos tipos de cementos (Canning, 1983; Mari, 1982; Fernández Navarro, 1985; Harben y Edwards, 1997b).</p>

Se indica a continuación los usos de esta sal en distintos procesos de reducción.

Usos del sulfato de sodio en procesos de reducción	
Proceso	Reacción
Leblanc	$\text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{C} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaS} + 2 \text{CO}_2$
Producción de sulfuro de sodio	$\text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{C} \rightarrow \text{Na}_2\text{S} + 2 \text{CO}_2$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{S} + \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
Producción de hidróxido de aluminio (Proceso Peniakoff)	$2 \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (bauxita)} + 2 \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{C} \rightarrow 4 \text{NaAlO}_2 + 2 \text{SO}_2 + \text{CO}_2$ $2 \text{NaAlO}_2 + \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Al(OH)}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$
Digestión de rocas fosfáticas para producción de fertilizantes	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 2 \text{Na}_2\text{SO}_4 + 8 \text{C} \rightarrow \text{CaNa}_4(\text{PO}_3\text{S})_2 + 2 \text{CaO} + 8 \text{CO}$
Producción de silicato de sodio	$2 \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow 2 \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2 \text{SO}_2 + \text{CO}_2$

Fuente: von Plessen, 1993

### 3.6. BIBLIOGRAFÍA

- BACH, R.; WASSON, J.R., 1981. "Lithium and Lithium Compounds". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume 14, 448-476.
- BAUER, R.J., 1990. "Lithium and Lithium Compounds". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A15, Fifth Edition, 393-413.
- CANNING, T., 1983. "Sodium Sulfates". En: Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons, 245-256.
- FERNÁNDEZ NAVARRO, J.M., 1985. "El vidrio". Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Cerámica y Vidrio. Madrid.
- HARBEN, P.; EDWARDS, G., 1997a. "MINSAL Lithium Carbonate – Metamorphosis for lithium". Industrial Minerals, February, 25-39.
- HARBEN, P.; EDWARDS, G., 1997b. "Salts of the Atacama". Industrial Minerals, July, 43-51.
- HEISS, J.; KUHAJEK, E., 1983. "Sodium Chloride". En: Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons, 205-223.
- HEVIA, R., 2003. "Esmaltes Cerámicos". En: Durán, A. (Ed.): Introducción a los Esmaltes Cerámicos, Faenza Editrice Ibérica S.L., 15-56.
- HUFFMAN, E.O., 1980. "Fertilizers". Encyclopedia of Chemical Technology. 3rd. Edition, 31-125.
- INDUSTRIAL MINERALS AND ROCKS, 1994. Donald Carr (Ed.). Littleton. EEUU.
- MARI, E., 1982. "Los vidrios". Editorial AmericaLee. Buenos Aires.
- MARI, E.; HEVIA, J.P., 1996. "El litio en los materiales cerámicos". Cerámica y Cristal, Agosto, (118): 29-37.
- MCCRACKEN, D.; HAIGH, M., 1998. "Lithium minerals: in a state of flux". Industrial Minerals, August, 57-61.
- PECHEY, R., 1998. "Soda ash review. A natural bias for trona". Industrial Minerals, May, 23-33.
- SALISBURY, F.; ROSS, C., 1991. "Fisiología Vegetal". Grupo Editorial Iberoamérica. México.
- SCHULTZ, H.; BAUER, G.; HAGEDORN, F.; SCHMITTINGER, P., 1993. "Potassium Compounds". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A22, Fifth Edition, 39-103.
- THIEME, C., 1993. "Sodium Carbonates". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A24, Fifth Edition, 299-316.
- VON PLESSEN, H., 1993. "Sodium Sulfates". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A24, Fifth Edition, 355-366.
- WESTPHAL, G.; KRISTEN, G.; WEGENER, W.; AMBATIELLO, P.; GEYER, H.; EPRON, B.; SEEBODE, K.; KOWALSKI, U., 1993. "Sodium Chloride". En: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A24, Fifth Edition, 317-340.

## Capítulo 4

### INFORMACIÓN ECONÓMICA DE LAS SALES

#### 4.1. PRODUCCIÓN Y CONSUMO

##### 4.1.1. LITIO

El principal productor mundial de litio es Chile con el 42,2% de la producción mundial, seguido por Argentina (23,1%), Estados Unidos (s/d), China (12,8%), Australia (12,8%) y Rusia

(10,3%). La producción en 2001, se estimó en 19.470 Mt de óxido de litio y las reservas mundiales ascienden a 9,54 Mt de óxido de litio (Mineral Commodity Sumaries, 2002). Los únicos países productores de litio a partir de salmueras en el mundo son Chile, Argentina y Estados Unidos; los demás países producen litio a partir de rocas portadoras de minerales de litio (pegmatitas).

Principales países productores de litio*			
País	Producción (t)		
	2000	2001 <sup>e</sup>	% (2001)
Chile <sup>s</sup>	5.300	6.400	32,90
Argentina <sup>s</sup>	2.700	4.500	23,10
China	2.400	2.500	12,82
Australia	2.400	2.500	12,82
Rusia	2.000	2.000	10,30
Zimbabwe	740	700	3,60
Canadá	710	700	3,60
Portugal	140	140	0,71
Brasil	30	30	0,15
Estados Unidos <sup>s</sup>	s/d	s/d	s/d
<b>Total</b>	<b>16.420</b>	<b>19.470</b>	<b>100</b>

e: estimado / s: litio proveniente de salmueras / litio contenido en sales  
Fuentes: Mineral Commodity Sumaries y Secretaria de Minería de la Nación, 2002

En los últimos años, la producción de litio a bajo costo, a partir de salmueras litíferas, causó un impacto en el mercado mundial, produciendo el cierre de muchas compañías; los países más afectados fueron China, Rusia y Estados Unidos. Como ejemplo de lo anterior, en los Estados Unidos la única compañía que permanece en producción se encuentra en Nevada donde explota salmueras litíferas destinadas a la producción de carbonato de litio. Además, ubicó a la Argentina y Chile como líderes mundiales en la producción de sales de litio. Muchos países cambiaron su régimen comercial, al preferir importar carbonato de litio proveniente de Sudamérica debido al costo menor o igual al del producto local (Ober, 1999).

El incremento en la producción de litio en el continente sudamericano ha producido que el

precio del carbonato de litio se mantuviera estable en el periodo 1991 - 2000.

##### 4.1.2. POTASIO

Los principales países productores de potasio son Canadá, Alemania, Rusia, Bielorusia, Israel, Estados Unidos, Jordania, Francia, España y el Reino Unido. La producción y comercio dentro de la industria del potasio puede ser considerada como un oligopolio de sólo 14 países, los cuales producen esencialmente para la agricultura. Rusia y Bielorusia poseen el 34% de la capacidad mundial de producción, en conjunto Estados Unidos y Canadá alcanzan el 35%, el oeste europeo el 18% y Jordania e Israel el 7%.

Principales productores y consumidores de litio					
Posición	Productores (minerales/prod. químicos)	Importadores		Exportadores	
		(óxido)	(carbonato)	(óxido)	(carbonato)
1	Chile	Reino Unido	Estados Unidos	Estados Unidos	Chile
2	Argentina	Alemania	Japón	China	Argentina
3	Rusia	Japón	Alemania	Alemania	Alemania
4	Australia	Francia	Reino Unido	Reino Unido	China
5	Canadá	Italia	Canadá	Rusia	Reino Unido
6	Zimbabwe	Brasil	Italia	Bélgica	Rusia
7	China	Sur Corea	Francia	Holanda	Holanda
8	Brasil	Bélgica	Sur Corea	Francia	-

Fuente: Industrial Minerals Handybook III, 1999

El crecimiento en la demanda de potasio está directamente relacionado a la demanda de fertilizantes, la cual a su vez, está relacionada al crecimiento de la población, en conjunto con la urbanización y la necesidad de una más eficiente producción de alimentos.

Las fluctuaciones en la demanda se deben a factores tales como las condiciones climáticas, los cambios en las políticas de gobierno, el precio y la cantidad de "NPK" utilizada en los cultivos (8 hectáreas requieren en promedio una tonelada de potasio). Los países asiáticos dominan la

importación de potasio a nivel mundial y las variaciones en sus importaciones tienen un impacto directamente en los precios mundiales de los fertilizantes. En América Latina se prevé un crecimiento en la demanda de potasio cercano al 2,0 – 2,5% por año (Industrial Minerals Handybook III, 1999).

#### 4.1.3. CLORURO DE SODIO

La producción de cloruro de sodio a escala mundial alcanzó las 200.000 t durante 1999 y 2000, lo cual significó un incremento del 7,5% en comparación al año anterior (186 Mt en 1998). Durante el 2000, la producción aumentó a 217 millones de toneladas.

La producción de cloruro de sodio a gran escala se lleva a cabo en más de 100 países. Los Estados Unidos es el mayor productor mundial con el 20,7%, seguido por China (15,5%), Alemania (7,6%), Canadá (6,7%), India (4,7%), Australia (4,4%), México (4,2%), Francia (3,6%) y Brasil (3,0%). Estados Unidos y la Unión Europea en conjunto superan el 50% de la producción mundial.

Del total producido de cloruro de sodio, el mayor volumen se destina al consumo doméstico seguido por la industria química. Productos derivados como el óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y gas cloro ( $\text{Cl}_2$ ), el hidróxido de sodio y el carbonato de sodio representan los más importantes componentes comerciales del sodio

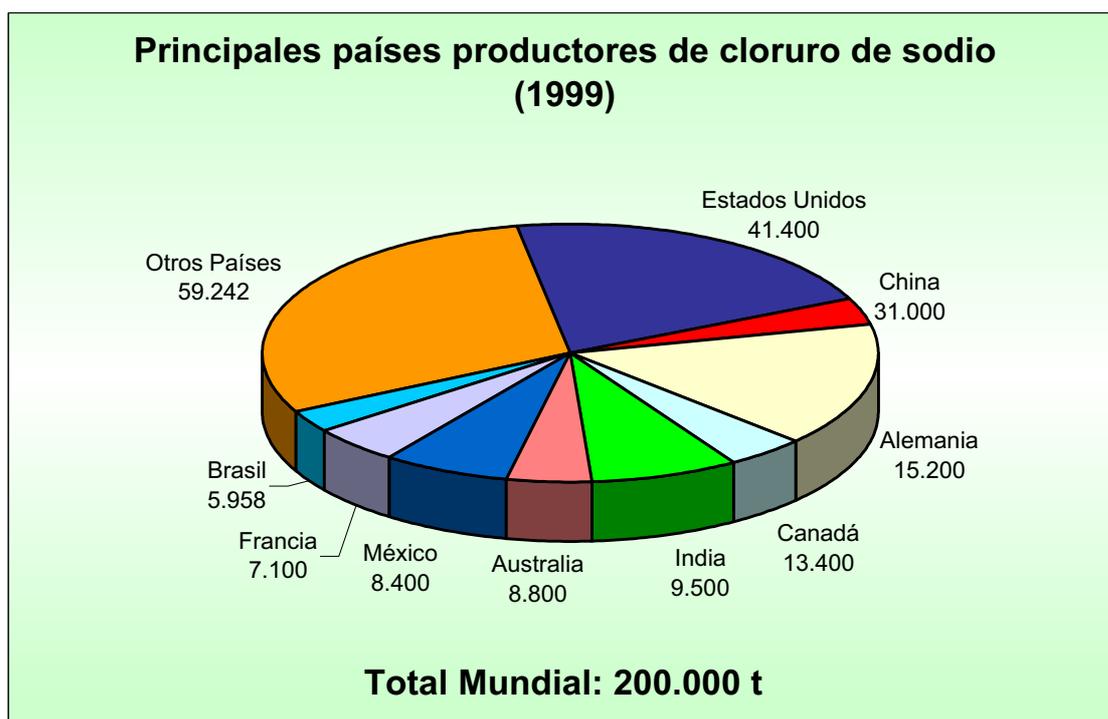
Los recursos mundiales de cloruro de sodio son ilimitados.

Principales países productores de potasio		
País	Producción (t $\text{K}_2\text{O}$ )	
	1998	1999 <sup>e</sup>
Canadá	9.000.000	8.100.000
Rusia	3.500.000	4.170.000
Bielorusia	3.400.000	3.540.000
Alemania	3.200.000	3.300.000
Israel	1.500.000	1.580.000
Estados Unidos	1.300.000	1.300.000
Jordania	850.000	1.100.000
Francia	656.000	430.000
España	635.000	710.000
Inglaterra	575.000	450.000
Brasil	243.000	260.000
China	120.000	120.000
Ucrania	60.000	70.000
Chile	22.000	20.000
Azerbaijan	5.000	5.000
Otros Países	s/d	s/d
<b>Total</b>	<b>25.100.000</b>	<b>25.200.000</b>

Fuente: Mineral Commodity Summaries, 2000

Principales productores y consumidores de cloruro de sodio			
Posición	Productores	Importadores	Exportadores
1	Estados Unidos	Japón	Australia
2	China	Estados Unidos	México
3	Alemania	Canadá	Alemania
4	Canadá	Bélgica	Holanda
5	India	Taiwán	Estados Unidos
6	Australia	Suecia	Canadá
7	México	Alemania	Chile
8	Francia	Finlandia	Bahamas
9	Reino Unido	Italia	Francia
10	Rumania	Noruega	Rumania
11	Italia	Hungría	India
12	Polonia	Nigeria	Togo
13	España	Bangla Desh	China
14	Brasil	Indonesia	Polonia
15	Holanda	Holanda	Reino Unido
16	Turquía	Bulgaria	Dinamarca
17	Chile	Malasia	<b>Argentina</b>
18	<b>Argentina</b>	Brasil	Antillas Holandesas
19	Bahamas	España	Italia
20	Egipto	Francia	Namibia
21	Pakistán	Reino Unido	Egipto
22	Irán	Hong Kong	Sudáfrica
23	Portugal	Sudáfrica	Senegal
24	Sudáfrica	República Checa	Belgica

Fuente: The Industrial Minerals Handy book, 1999



#### 4.1.4. SULFATO DE SODIO

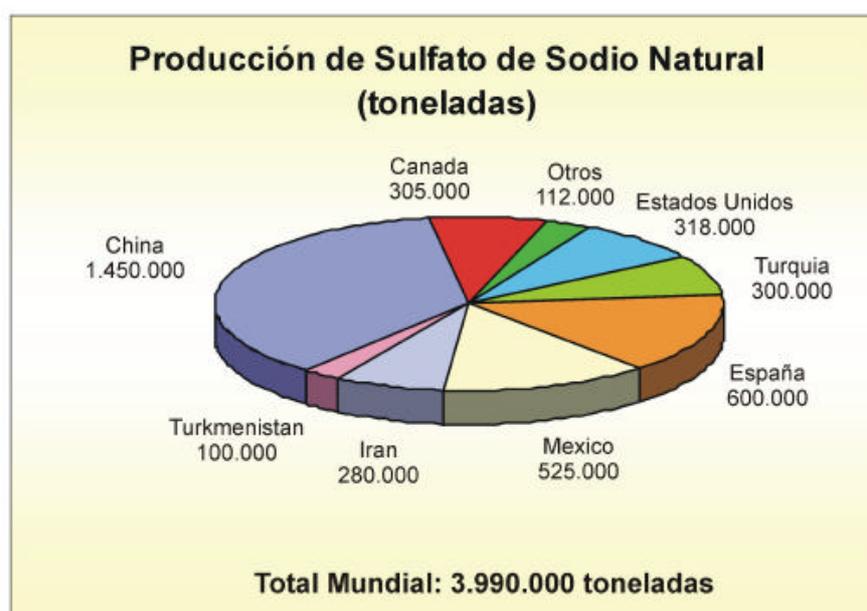
La producción mundial de sulfato de sodio está dividida entre el sulfato de sodio natural y el sintético. En 1999, la producción de sulfato de sodio natural alcanzó las 4 Mt y del sintético 1,5 millones de toneladas, un 10% superior al período anterior. Las ventas totales del sulfato de sodio, natural y sintético fue de aproximadamente 60 millones de dólares (Minerals Commodity Summaries, 2000).

Los principales productores mundiales de sulfato de sodio natural son China, España, México, Turquía, Canadá y los Estados Unidos, mientras que los principales productores de sulfato de sodio sintético son Estados Unidos, Bélgica, Japón, Italia, Francia, Alemania, Austria y un gran número de países industrializados. Otros países que presentan recursos de sulfato de sodio, en menor proporción, son Botswana, China, Egipto, Italia, Mongolia, Rumania y Sudáfrica (The Industrial Minerals Handybook, 1999).

Principales productores y consumidores de sulfato de sodio			
Posición	Productores	Importadores	Exportadores
1	España +	Australia	Austria
2	China +	Francia	Bélgica
3	Estados Unidos +	Hong Kong	Canadá
4	México +	Japón	China
5	Canadá +	Corea	México
6	Irán +	Malasia	España
7	Japón x	Singapur	Suecia
8	Italia x	Tailandia	Taiwán
9	Turquía +	Estados Unidos	Turquía
10	Alemania x		Estados Unidos
11	Austria x		
12	Suecia x		
13	Taiwán x		
14	Reino Unido x		
15	Chile +		

+ : Sulfato de sodio natural y sintético / x : Sulfato de sodio sintético

Fuente: The Industrial Minerals Handybook, 1999



Como referencia, en 1999 en los Estados Unidos el consumo de sulfato de sodio se distribuyó de la siguiente manera: 45% detergentes y jabones, 18% textiles, 13% vidrio y 14% otros.

Las reservas de sulfato de sodio son suficientes para los próximos cientos de años con el nivel de consumo mundial actual (The Industrial Minerals Handybook, 1999).

#### 4.1.5. CARBONATO DE SODIO

Cerca de 40 países producen 33 Mt por año de carbonato de sodio (natural y sintético) de grado comercial. Los principales países productores de carbonato de sodio natural son: Estados Unidos, Kenia y China. Los Estados Unidos y China producen el 55% del total mundial. Los países productores de carbonato de sodio sintético son: Rusia, Alemania, Polonia, Bulgaria, Francia, Inglaterra, India y Japón.

Se estima que el consumo mundial de carbonato de sodio aumentará en los próximos años debido al crecimiento en la demanda de las naciones en desarrollo, especialmente en el lejano oriente y Sudamérica. Se calcula un crecimiento en la demanda del 1,5 – 2% anual. Es importante destacar que los problemas económicos ocurridos en Asia durante el período 1997 – 1999 redujeron las exportaciones por parte de los Estados Unidos, a esta parte del mundo. China en cambio, incrementó sus

exportaciones a países de Asia del este.

El 50% del consumo del carbonato de sodio se destina a la industria del vidrio.

Principales países productores de carbonato de sodio		
Países	Producción (Mt)	
	Natural	1998
Estados Unidos	10.100	10.100
Botswana	200	190
Kenia	200	200
México	s/d	s/d
Turquía	s/d	s/d
Uganda	s/d	s/d
Otros	s/d	s/d
<b>Total (natural)</b>	<b>10.500</b>	<b>10.500</b>
<b>Total (sintético)</b>	<b>21.200</b>	<b>21.300</b>
<b>Total</b>	<b>31.700</b>	<b>31.800</b>

e: estimado  
Fuente: Mineral Commodity Sumaries 2000

#### 4.2. PRODUCCIÓN EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

La producción de carbonato y cloruro de litio para el 2002 se estima en 5.635 t con un valor de \$ 24.343.200. Estos volúmenes representan el 2,23% de la producción minera argentina y el 3,23% de minerales metalíferos (\$ 752.668.992). La única provincia que produce las dos variedades de litio es Catamarca.

Principales productores y consumidores de carbonato de sodio			
Posición	Productores	Importadores	Exportadores
1	Estados Unidos	Japón	Estados Unidos
2	China	Sur Corea	Alemania
3	Rusia	Indonesia	Francia
4	India	México	Rusia
5	Alemania	Venezuela	Reino Unido
6	Francia	Bélgica	Polonia
7	Reino Unido	Taiwán	Bulgaria
8	Polonia	Canadá	Kenia
9	Japón	Tailandia	Botswana
10	Bulgaria	<b>Argentina</b>	Rumania
11	Rumania	Brasil	Italia
12	Italia	Filipinas	España
13	España	Holanda	Holanda

Fuente: The Industrial Minerals Handybook, 1999

Producción minera de Litio				
Provincia	2001		2002	
	Cantidad (t)	Valor (\$) a precios 1992	Cantidad (t)	Valor (\$) a precios 1992
Catamarca				
Cloruro de litio	4.512	19.491.840	4.729	20.429.280
Carbonato de litio	s/d	s/d	906	3.913.920

Fuente: Secretaria de Minería de la Nación, 2002

No se cuentan con datos de producción de carbonato de sodio ni de potasio.

La producción de cloruro y sulfato de sodio, en el 2002, representó el 1,68% del total de la producción minera argentina (\$ 1.089.159.536) y el 28% de la producción de minerales no

metalíferos (\$ 65.070.120). Las principales provincias productoras son La Pampa, San Luis, Buenos Aires, Río Negro, Salta, Tucumán y Jujuy. La producción de sales estimada para el año 2002 es de 863.509 t, lo cual representa \$ 18.261.594 (todos los valores están referidos a precios 1992).

Producción de cloruro de sodio por provincia				
Provincia	2001		2002	
	Cantidad (t)	Valor (\$) a precios 1992	Cantidad (t)	Valor (\$) a precios 1992
Buenos Aires	136.890	2.669.355	116.357	2.268.962
Córdoba	23.895	465.953	20.311	396.065
La Pampa	489.436	9.544.002	416.021	8.112.410
Mendoza	4.050	78.975	3.443	67.139
Río Negro	95.175	1.855.913	80.899	1.577.531
Salta	16.561	322.945	14.077	274.502
San Luis	220.219	4.294.266	187.186	3.650.127
Santa Cruz	729	14.216	620	12.090
Tucumán	23.364	455.591	19.859	387.251
<b>Total</b>	<b>1.010.319</b>	<b>19.701.216</b>	<b>858.773</b>	<b>16.746.077</b>

Fuente: Secretaria de Minería de la Nación, 2002

La producción de cloruro de sodio en lo referente a los años 2001 y 2002 presenta una clara caída en los volúmenes producidos, del orden del 15% aproximadamente. La principal provincia productora de cloruro de sodio es La Pampa (48,44%), le siguen San Luis (21,80%), Buenos Aires (13,55%), Río Negro (9,42%), Córdoba y Tucumán (2,30% cada una), Salta (1,64%) y por último las provincias de Mendoza

y Santa Cruz con un porcentaje menor al 1%.

Las únicas dos provincias que producen sulfato de sodio son La Pampa y Salta. La provincia de La Pampa se ubica como la principal productora de sulfato de sodio del país con el 96% de la producción nacional. El sulfato de sodio producido en Salta se obtiene como subproducto del procesamiento de ulexita para la obtención de ácido bórico.

Producción minera de sulfato de sodio por provincia				
Provincia	2001		2002	
	Cantidad (t)	Valor (\$) a precios 1992	Cantidad (t)	Valor (\$) a precios 1992
La Pampa	5.369	1.718.237	4.564	1.460.480
Salta	203	64.800	172	55.040
<b>Total</b>	<b>5.572</b>	<b>1.783.037</b>	<b>4.736</b>	<b>1.515.520</b>

Fuente: Secretaria de Minería de la Nación, 2002

Exportación de Litio 1998/2002 (U\$S FOB)						
NCM	Descripción	1998	1999	2000	2001p	2002e
2827.39.60	Cloruro de litio	11.099.588	14.063.041	23.925.567	24.512.203	19.834.837
2836.91.00	Carbonato de litio	11.234.283	2.506.657	2.802.984	2.456.039	1.049.535
e: estimado						
Fuente. Secretaria de Minería de la Nación, 2002						

### 4.3. POLÍTICA ARANCELARIA

La posición arancelaria a través de la cual ingresan y egresan las sales a los diferentes países, de acuerdo a la nomenclatura NALADISA, se presenta en el siguiente listado.

Litio	
2827.39.60	Cloruro de litio
2836.91.00	Carbonato de litio
2825.20.00	Litio óxidos e hidróxidos
Potasio	
3104.10.00	Sales crudas
3104.20.00	Cloruro de potasio
3104.30.00	Sulfato de potasio
2834.21.00	Nitrato de potasio
3105.90.00	Mezclas de sodio, nitrato y potasio
Sodio	
2501.00.11	Sal Marina
2501.00.19	Las demás sales a granel
2501.00.20	Sal de mesa
2501.00.90	Las demás sales
Sulfato de sodio	
2833.11.10	Sulfato de sodio, crudo
2833.11.50	Cloruro de sodio, otros
Carbonato de sodio	
2836.20.00	Carbonato de sodio
Fuente. Secretaria de Minería de la Nación, 2002	

### 4.4. COMERCIO EXTERIOR

#### 4.4.1. EXPORTACIONES

El principal país comprador de carbonato de litio es Estados Unidos con 252 t seguido por Japón (198 t) e India con 4 toneladas. El total exportado de carbonato de litio es 454 t equivalentes a 1.049.500 dólares FOB. Además, Argentina exportó cloruro de litio a Estados Unidos por 3.954 toneladas (19.834.837 U\$S FOB).

La producción de cloruro de litio en el país presenta un sostenido crecimiento en el período 1998 – 2001 y para el 2002 se aprecia una leve baja. La producción en los años 2000 y 2001 se

duplicó en referencia a 1998 y 1999.

En lo referente al carbonato de litio se observa una producción estable entre los 2.500.000 y 2.800.000 dólares FOB para el período 1999 – 2001. Después de haber alcanzado una producción récord en 1998 con 11 millones de dólares FOB.

Durante el 2002, la Argentina exportó cloruro de sodio, en todas sus variedades, 31.700 t por un valor de 947.957 U\$S FOB. De las diferentes variedades de cloruro de sodio exportadas, el ítem “las demás sales” (NCM 25010090) es el mayor volumen con 29.300 t y en segundo lugar “sal de mesa” (NCM 25010020) con 1.788 toneladas. Los principales países de destino fueron: Paraguay (90,5%), Uruguay (7,6%) y Chile (1,5%). Otros países con menor volumen exportado desde Argentina son: Brasil, Bolivia, Corea, México, España, Francia y Venezuela.

El total de las exportaciones para cloruro de sodio durante el 2001 fue de 27.870 t por un valor de 1.190.870 U\$S FOB y los destinos de las exportaciones del 2001 fueron: Brasil, Japón, Chile, Paraguay, Estados Unidos, Países Bajos, Perú, Reino Unido, Uruguay, Canadá y Uruguay.

En lo referente a sulfato de sodio, se registran exportaciones de la variedad “sulfato de sodio anhidro” (NCM 28331110). El total exportado de sulfato de sodio fue de 16.100 t equivalentes a U\$S FOB 621.000. El principal país de destino es Brasil (75,2%) seguido por Colombia (18,6%) y Sudáfrica (6,2%).

No se cuentan con datos de exportación de potasio y carbonato de sodio.

#### 4.4.2. IMPORTACIONES

Se importaron 3,5 t de cloruro de litio y 78 t de carbonato de litio, por un valor de 171.000 U\$S CIF en total. El mayor proveedor de cloruro de litio es China y el de carbonato de litio, Chile.

La Argentina, en el 2002, importó nitratos

Exportación de cloruro de sodio 2002 (estimado)				
NCM	Descripción	País Destino	Kilos	U\$S FOB
25010011	Sal marina	China	7	11
25010019	Las demás sales a granel, sin agregados	Chile	450.860	9.017
		Uruguay	137.000	3.064
		Corea	12.000	2.004
25010020	Sal de mesa	Bolivia	54	90
		Chile	6.391	2.698
		Rep. Dominicana	3	6
		Estados Unidos	51.141	40.919
		México	633	4.660
		Paraguay	1.160.222	104.598
		Perú	15.422	7.907
		Uruguay	489.266	67.421
		Venezuela	12.970	14.442
		Corea	51.720	16.638
		España	68	56
		Francia	44	50
25010090	Las demás sales	Brasil	1	1
		Paraguay	27.524.778	611.025
		Uruguay	1.787.064	63.143
		Zona franca Gral. Pico	5.300	206
<b>TOTAL</b>			<b>31.704.944</b>	<b>947.957</b>

Fuente. Secretaria de Minería de la Nación, 2002

Exportaciones de Sulfato de sodio 2002 (estimado)				
NCM	Descripción	País Destino	Kilogramos	U\$S FOB
28331110	Sulfato de disodio, anhidro	Brasil	12.120.160	512.752
		Colombia	3.000.000	83.250
		Panamá	3	38
		Paraguay	66	682
		Sudáfrica	1.000.000	24.000
		Uruguay	23	251
<b>TOTAL</b>			<b>16.120.252</b>	<b>620.973</b>

Fuente. Secretaria de Minería de la Nación, 2002

de potasio por un total de 14 Mt con un valor aproximado de 4 millones de dólares. Los países abastecedores son: Chile, Israel, Dinamarca y China.

Las importaciones de cloruro de sodio en 2002 fueron de 518 t, los ítems “las demás sales” y “sal marina” registraron los mayores volúmenes. El ítem “Las demás sales” (NCM 25010090) se importaron 439 t originarias de Estados Unidos (43,6%), Chile (21,2%), España

(13,2%), Países Bajos (7,0%), Alemania (6,8%), China (4,6%), y otros países (3,6%).

Dentro del ítem “sal marina”, (NCM 25010011), se importaron 34 t provenientes de Chile (82,3%), Alemania (7,15%) y otros países europeos (10,55%).

En referencia a las importaciones, durante el 2001 alcanzaron un total de 819 t de cloruro de sodio.

Importaciones de litio 2002				
NCM	Descripción	País Origen	Kilos	U\$S CIF
28273960	Cloruro de litio	Estados Unidos	1.629	136
		China	6.151	3.000
		Bélgica	1.499	279
		Suiza	537	1
		Alemania	516	5
28369100	Carbonatos de litio	Argentina (a)	906	300
		Chile	136.194	77.000
		Estados Unidos	18.805	650
		China	3.838	280
		Alemania	680	40
<b>TOTAL</b>			<b>170.755</b>	<b>81.691</b>
(a) Mercadería de origen Argentino pero procedente de Brasil				
Fuente. Secretaria de Minería de la Nación, 2002				

Importaciones de cloruro de sodio 2002				
NCM	Descripción	País Origen	Kilos	U\$S CIF
25010011	Sal marina	Chile	28.000	6.573
		Alemania	2.431	2.241
		Indet (Europa)	3.600	3.129
25010019	Las demás sales a granel	Estados Unidos	508	150
		Australia	0	1
25010020	Sal de mesa	Chile	18.000	4.331
		Estados Unidos	20	92
		Venezuela	26.150	8.494
		Italia	46	200
25010090	Las demás sales	Brasil	7.350	1.005
		Chile	93.296	43.799
		Estados Unidos	191.395	59.117
		Múxico	278	976
		Paraguay	0	0
		Uruguay	3.600	3.309
		China	20.000	6.868
		India	3.000	212
		España	58.001	27.383
		Italia	484	625
		Países Bajos	30.625	3.322
		Suiza	1.003	7.938
		Alemania	30.069	20.938
<b>TOTAL</b>			<b>819.027</b>	<b>325.990</b>
Fuente. Secretaría de Minería de la Nación, 2002				

En el 2002 se importaron, 48.400 t de sulfato de sodio anhidro (NCM 28331110) por un valor de 4.845.161 U\$S CIF. Los principales países proveedores de esta commodity fueron: España (56,4%), China (24,4%), Chile (19,0%) y Alemania (0,2%).

Las importaciones en el período anterior (2001) arrojaron un total de 52.500 t, provenientes principalmente de Chile y España.

No se poseen datos de importación de carbonato de sodio.

Importaciones de nitratos de potasio 2002				
NCM	Descripción	País Origen	Kilos	U\$S CIF
28342110	Nitratos de potasio, con un contenido de KNO <sub>3</sub> inferior o igual al 98%, en peso	Chile	3.140.468	11.381.026
		Israel	34.400	129.450
		Dinamarca	159.412	542.100
		Finlandia	100	6
		Alemania	470	100
28342190	Los demás nitratos de potasio	Chile	555.389	1.845.901
		China	10.336	23.500
		Israel	16.818	31.450
		Japón	32	1
<b>TOTAL</b>			<b>582.575</b>	<b>1.900.852</b>

Fuente. Secretaría de Minería de la Nación, 2002

Importaciones sulfato de sodio 2002				
NCM	Descripción	País Origen	Kilos	U\$S CIF
28331110	Sulfato de disodio, anhidro	Chile	8.308.000	921.805
		Estados Unidos	106	1.519
		México	53	487
		China	10.200.000	1.179.887
		España	29.847.750	2.730.466
		Alemania	8.102	10.997
<b>TOTAL</b>			<b>48.364.011</b>	<b>4.845.161</b>

Fuente. Secretaria de Minería de la Nación, 2002

## 4.5. PRECIOS

En la tabla que sigue se discriminan los precios para distintos productos y calidades (Mineral Commodity Summaries, 2002).

## 4.6. ESPECIFICACIONES

### 4.6.1. LITIO

Los requerimientos para la industria del vidrio: mínimo 5% Li<sub>2</sub>O, <0,2% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,1% humedad, tamaño <810/>150 micrones.

El carbonato de litio proveniente de salmueras debe tener como mínimo 99% Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, con bajo contenido de elementos alcalinos y un máximo de 0,02% de insolubles.

### 4.6.2. SALES DE POTASIO

El principal uso del cloruro y sulfato de potasio, a nivel mundial, es como fertilizante, al

Precios por producto y calidad	
Producto	U\$S FOB
<b>Litio (2002)</b>	
Carbonato de litio	4,33 – 4,47 / kg
Cloruro de litio	11,00 / kg
Hidróxido de litio	5,74 / kg
Bromuro de litio	12,83 / kg
Fluoruro de litio	16,95 / kg
Litio (metal)	85,92 / kg
n-butil-litio en n-hexano (15%)	44,88 / kg
<b>Potasio</b>	
Cloruro de potasio (mínimo 60% K <sub>2</sub> O)	160 / t
Nitrato de potasio grado fertilizante	358 / t
<b>Cloruro de sodio</b>	
NaCl de salmuera	5,70 – 6,90 / t
Sal de roca	20 / t
Grado químico	4,30 / bolsas de 36 kg
<b>Sulfato de sodio (2000)</b>	
Sulfato de sodio impuro (salt cake)	73 / t
Sulfato de sodio anhidro	124 – 126 / t
Sulfato de sodio grado vidrio	95 – 110 / t
Sulfato de sodio grado detergente	75 – 90 / t
<b>Carbonato de sodio</b>	
Na <sub>2</sub> O 58% (USA)	105 – 158 / t
Sintético (Europa)	175 – 190 / t

ser un nutriente primario junto con el fósforo y el nitrógeno. La utilización del potasio en nutrientes es cercana al 95% de la producción mundial y en particular como fertilizante para cereales seguido por oleaginosas.

#### 4.6.3. SULFATO DE SODIO

Se considera que el sulfato de sodio impuro es incoloro y contiene entre 90 y 99% de pureza y su principal uso es la fabricación de pulpa. El sulfato de sodio refinado (sulfato de sodio anhidro) es un polvo blanco, cristalino con densidad 1232 – 1392 kg/m<sup>3</sup>; pureza mayor a 99% (detergentes, vidrio, farmacéutico, tinturas, vidrios cerámicos).

#### 4.6.4. CLORURO DE SODIO

Ver cuadro requerimientos cloruro de sodio.

<b>CARBONATO DE LITIO proveniente de salmueras (especificaciones químicas)</b>		
	Polvo	Granular
	Máximo	Máximo
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> mínimo	99,0%	99,0%
Cl	0,02%	0,02%
Na	0,12%	0,18%
K	3 ppm	3 ppm
Ca	0,04%	0,068%
Mg	0,011%	0,025%
SO <sub>4</sub>	0,10%	0,10%
B	10 ppm	10 ppm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00%	0,00%
H <sub>2</sub> O	0,20%	0,20%
LOI	0,70%	0,80%
Insolubles	0,02%	0,02%

Fuente: Industrial Minerals Handybook III

<b>Especificaciones para sulfato y cloruro de potasio</b>				
<b>Grado</b>	<b>Mínimo K<sub>2</sub>O % en peso</b>	<b>Tamaño aproximado de partícula</b>		
		<b>Mesh (Tyler)</b>	<b>Milímetros (mm)</b>	<b>Variedad de potasio</b>
Granular	61,50,22	-6 a +20	3,35-0,85	sulfato y cloruro
Blend	60	-6 a +14	3,35-1,18	cloruro
Grueso	60	-8 a +28	2,4-0,6	cloruro
Estándar	60,50,22	-28 a +65	1,2-0,21	sulfato y cloruro
Especial Estándar	60	-35 a +150	0,4-0,11	sulfato y cloruro
Soluble/suspensión	62	-35 a +150	0,4-0,11	cloruro
Químico	63	NA	NA	cloruro

Blend: grado con punto medio entre 8 y 10 mesh, introducido por Canadá

Fuente: Industrial Minerals Handybook III, 1999

<b>Principales requerimientos del cloruro de sodio para diferentes industrias</b>	
Industria química	mínimo 95% NaCl 2,5% humedad 0,1% Ca, Mg y K 0,5% insolubles
Industria alimenticia	Mínimo 97,5% NaCl máximo 1 ppm As 4 ppm metales pesados (Pb) 2% Ca y Mg 0,00016% Fe (para sal yodada) 0,010 – 0,006 iodo
Sal especial (para procesos alimentarios)	mínimo 99,95% NaCl 0,02 – 0,06% CaSO <sub>4</sub> máximo. 0,02% CaCl <sub>2</sub> 0,01% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,4 ppm Cu 1,5 ppm Fe 20 ppm insolubles 0,1% humedad superficial

Fuente: The Industrial Minerals Handybook III

Principales requerimientos del sulfato de sodio para diferentes industrias	
Industria del vidrio	baja concentración de hierro 99,3 – 99,7% de pureza
Industria de detergentes	mínimo 99,2% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Papel Kraft	mínimo 96% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> máximo 2% NaCl 1% Mg como MgSO <sub>4</sub> 117% Ca como CaSO <sub>4</sub>
Industria alimenticia	mínimo 99,0% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> después del secado < 3 ppm de arsénico <10 ppm de metales pesados (como plomo) Se < 0,0003% perdida en el secado < 1% (anhidro) y 51 – 57 en el decahidratado Se comercializa en tamaño fino, estándar y grueso
Fuente: Industrial Minerals Handybook III	

El mercado del sulfato y cloruro de sodio es un mercado maduro y su consumo mundial sigue creciendo proporcionalmente al crecimiento de la población y al crecimiento de los productos de consumo doméstico. Las operaciones que tengan el menor costo, ofreciendo una alta calidad y un bajo costo de transporte, liderarán la producción mundial de cloruro y sulfato de sodio.

La demanda de potasio tiene un crecimiento lineal con la producción de fertilizantes y esté con el crecimiento de la población del mundo. Las fluctuaciones periódicas en la demanda del potasio está regida por factores como las condiciones climáticas en las áreas de siembra (el efecto de la corriente del Niño), cambios en las políticas gubernamentales en la agricultura, el precio del producto y/o fluctuaciones en el intercambio entre los países, y/o la variación en las tasas de utilización de NPK.

El litio sigue siendo actualmente un producto en desarrollo. Sus aplicaciones en varias fases de la industria metalúrgica y química tiene una rápida diversificación y expansión en los últimos años.

Otras aplicaciones para el litio son la industria

nuclear y en baterías, al poseer un bajo peso atómico y un alto potencial electroquímico. Un análisis sobre la demanda de los recursos de litio, desde 1963 establece un crecimiento en el consumo con una tasa anual del 3 al 5%, con un incremento en las reservas de por lo menos 10 veces.

#### 4.7. BIBLIOGRAFÍA

- MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2002. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2000. U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- OBER, 1999. Minerals Yearbook 1999. U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- SECRETARÍA DE MINERÍA DE LA NACIÓN, 2002. Estadística minera de la República Argentina. Dirección de Economía minera y desarrollo.
- THE INDUSTRIAL MINERALS HANDYBOOK III, 1999.