

LA INDUSTRIA DEL YODO EN CHILE: PROCESOS, PRODUCCION, MERCADO Y USOS

DRA. INGRID GARCÉS MILLAS

FUENTE: GARCÉS MILLAS, INGRID "MINERALES INDUSTRIALES: BORO, LITIO, SALITRE Y SUS DERIVADOS. RECURSOS, PROCESOS ASOCIADOS, MERCADOS Y USOS", 2000, REGISTRO N°13602, UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA. CHILE.



LIBROS



INDICE

INTRODUCCION	4
CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS	6
TECNOLOGIAS	6
Química Del Yodo	6
DESCRIPCION DEL PROCESO DE PRODUCCION DE YODO	11
Plantas María Elena y Coya	11
Planta de Yodo A	13
Planta de Yodo B	15
Planta de Yodo C	16
Tratamientos de tortas y repaso	17
RESERVAS Y RECURSOS	18
MERCADO	19
USOS Y APLICACIONES	21
Nuevas aplicaciones y Ensayos	21
Sustitutos	22
PROYECTOS FUTUROS	23
REFERENCIAS	24



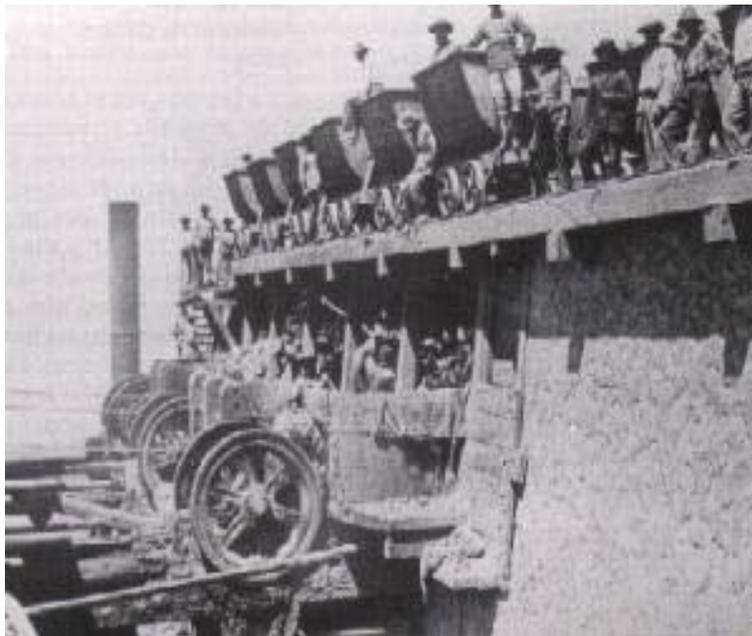
YODO

Chile es el mayor productor y exportador de yodo del mundo. Este elemento, que se obtiene del caliche como subproducto del salitre, es utilizado principalmente en medicina como desinfectante, en agricultura como complemento alimenticio, en productos farmacéuticos como medio de contraste para rayos X, en producción de fibras sintéticas y moléculas orgánicas, etc. Desde el punto de vista del mercado, la producción de yodo está asegurada, por cuanto existen futuros proyectos de explotación, demanda, aunque leve, ésta se presenta con tendencia al alza, y fundamentalmente, el manejo del mercado internacional lo tiene la Sociedad Química y Minera de Chile, SQM, quien en 1997 consolidó su posición de liderazgo como mayor productor y comercializador a nivel mundial.

El uso del yodo en procesos de alta tecnología ha generado un aumento mundial en la demanda del 45 % en los últimos años. Sin embargo, existen dos aplicaciones en las cuales el crecimiento esperado es superior al promedio de la industria: los medios de contraste y los biocidas. Adicionalmente, los fungicidas de uso agrícola es una nueva área que tiene un gran potencial de desarrollo en el mediano y largo plazo. Por su parte el precio internacional se ha mantenido en recuperación, motivado por el aumento de la mayor demanda de este producto. Tanto así que SQM, para el 2000 cuenta con una producción de 8000 toneladas de yodo, abasteciendo un tercio de la demanda mundial y exportando a más de 50 países en los cinco continentes.

1. INTRODUCCION

Hayes, en 1840, basado en muestras de mineral tomadas por John H. Blake, en Iquique en 1837, fue el primero en anunciar la existencia de yodo en el caliche. En 1830, Blake había informado públicamente que migas de pan se tornaban azules en las aguas madres de las paradas, lo que delataba la existencia de yodo, pero no identificó al descubridor. Durante 1815 y 1865, el yodo sólo se fabricó en Europa, siempre a partir de algas marinas. La primera producción europea fue en Glasgow, Escocia. En 1866, George Smith comenzó a extraerlo de los caliches de Tarapacá, en La Noria, a partir de 1874 y por muchos años, casi un siglo, Anthony Gibbs & Sons, ingleses, dirigieron el monopolio mundial en el comercio del yodo.





El yodo es el más pesado de los elementos no metálicos. En la naturaleza no se encuentra en su estado libre, sino en sus formas de yoduro, yodatos y en combinaciones orgánicas. En el estado sólido, se presenta en forma de escamas rómbicas de color gris violeta con reflejos metálicos.

En Chile, la principal fuente de producción de yodo se encuentra en los depósitos de nitratos o salitre en que aparece en estratos denominados costra y caliche, presentándose en forma de yoduro, yodatos de sodio, calcio y potasio y como yodocromato de sodio. La ley en yodo en el caliche fluctúa entre 0,3 a 1,2 por mil, excepcionalmente, existen caliches que contienen 3 a 4 por mil de yodo.

Según, Crozier (1999), el yodo en Tarapacá fue descubierto en las aguas madres de salitre sódico, que ya en 1825 se conocía en Europa como el salitre chileno. “Lo paradójico del yodo es que Courtois, en París, descubrió yodo por sus efectos dañinos sobre su equipo y, en Iquique, se descubrió porque migas de pan cayeron en las aguas madres en una de las tinas.

Los descubridores más probables del yodo en Tarapacá son el dúo inglés William Bollaert y George Smith, que prepararon un amplio estudio en 1827, levantaron mapas y llevaron a cabo un catastro etnográfico, geográfico y geológico de la provincia entera, a petición de las autoridades de la zona. George Smith, inglés radicado en Iquique, fue uno de los pioneros de la tecnología del salitre. Por su parte, William Bollaert, químico profesional, entrenado en la Royal Society de Londres, llegó a Iquique en 1826, como superintendente de la mina Huantajaya.

Se atribuye a Bernard Courtois ser el primer productor industrial del yodo. Según la Enciclopedia Espasa, al poco tiempo de haberse descubierto el yodo, comenzó a obtenerse en grandes cantidades. Courtois, según el documento, obtuvo mucho provecho económico en la época del bloqueo continental, pero al volver a abrirse los puertos franceses al comercio internacional, no pudo competir con el nitro que llegaba procedente de la India Occidental, ni en otros mercados. De tal forma que, la fábrica que había montado fue a la ruina y por ende toda su fortuna obtenida con la obtención industrial del yodo.

Con el paso del tiempo, tanto los químicos europeos-franceses, alemanes e ingleses, como también los norteamericanos, estaban enterados que los caliches de Tarapacá y sus aguas madres eran ricas en yodo. Sabían que el método más efectivo para desplazar los yoduros contenidos en las soluciones provenientes de algas marinas era con ácido sulfúrico o con cloro, y que el yodo de Iquique era diferente, puesto que se hallaba en la forma de yodatos, para lo cual el reactivo más efectivo era el ácido sulfuroso.

En la década de los 50, no hubo producción significativa de yodo en la I Región. La primera noticia de la existencia de yodo en los caliches fue de Francisco Puelma, en 1855, quien en su memoria para obtener el título de ingeniero en la Universidad de Chile, describe la geografía y la geología de Tarapacá, los minerales y el proceso de extracción de salitre, tras un intenso viaje de exploración.

Al finalizar el siglo pasado, Japón se convirtió en uno de los grandes productores mundiales de yodo, con dos tercios del total. Inició su elaboración en 1888, sobre la base de algas marinas cosechadas en el distrito de Hokkaido, con producción adicional en las provincias de Chiba y Kanagawa (Yokohama).



Cinco años más tarde, Japón estaba autoabasteciéndose de todas sus necesidades de yoduro de potasio y de yodoformo. En la actualidad, los nipones son los más cercanos competidores de Chile en el liderazgo de la producción mundial de yodo.

Nuestro país, el mayor productor de yodo mundial tiene reservas estimadas en 29,5 millones de toneladas con un promedio de 683 ppm de I_2 . La mayor compañía de yodo nacional, SQM, en 1999 produjo 8.000 toneladas, a partir de sus plantas de nitratos de 7.85% en nitrato de sodio y 422 ppm de yodo. El total que explota anualmente son 22 millones de toneladas de caliche, materia prima para extraer el yodo. SQM produce yodo mediante el procesamiento de soluciones de lixiviación del caliche para la obtención de yoduro como producto intermedio en sus plantas de obtención del salitre. Posteriormente, el yoduro es tratado en las plantas de Pedro de Valdivia y Nueva Victoria para la obtención de yodo final

La calidad y cantidad de sus reservas de caliche y salmueras, le aseguran a SQM el liderazgo en este mercado. Por otra parte, el proyecto de Aguas Blancas en la II región, para la producción de yodo, sulfato de sodio y nitrato de potasio para 1999, consolidará aun más esta posición.



Japón es el segundo productor de yodo mundial, obteniéndose a partir de salmueras subterráneas asociadas con la producción de gas natural. Este país posee un total de 17 plantas con capacidad de 9.000 toneladas anuales. La variabilidad de las concentraciones de yodo de sus salmueras, hacen que la producción de sus plantas dependa de la disponibilidad de las salmueras.

2. CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS

En las siguientes tablas se detallan una serie de datos de propiedades físicas, químicas y solubilidad del yodo, en algunos compuestos y las características de calidad que debe cumplir el yodo para su comercialización.

TABLA N°1: Propiedades físicas y químicas del yodo.

PesoMolecular (gr/mol)	Estructura	Características	Punto Fusión (°C)	Punto Ebullición(°C)	nD	Peso Específico
253.,84	cristalina ortorrómbica	color gris violeta y reflejos metálicos	114	184	3.34	4.95

Fuente: Tomas Vila, 1953.



TABLA N°2: Características químicas del yodo envasable

Característica	límite	lím. cont. laboratorio	Especificación ventas
Yodo total	Min	49,5	49,5
Residuo	Max	0,046	0,050
Acidez (c/H ₂ SO ₄)	Max	0,014	0,015
Azufre (c/SO ₄)	Max	0,014	0,016
F ₂ O ₃	Max	0,003	0,03
H ₃ BO ₃	Max	0,005	0,006
Reflectancia		50,0	50,0

Fuente: Kirk-Othmer, 1961

El yodo presenta baja solubilidad en agua, mientras que en algunos solventes orgánicos es bastante soluble, propiedad que es utilizada en su proceso.

TABLA N°3: Solubilidad de yodo en agua.

Temperatura (°C)	0	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Solubilidad (g / K H ₂ O)	0.16	0.293	0.34	0.399	0.549	0.769	1.06	1.51	2.17	3.12	4.48	6.65

Fuente: Kirk-Othmer, 1961

TABLA N°4: Solubilidad de yodo en algunos solventes orgánicos.

Solvente	Benceno	Cloroformo	Ciclohexano	Glicerol	Agua	Tolueno
Solubilidad (g I ₂ / Kg solv)	164	49.7	27.9	9.7	0.34	182.5

Fuente: Kirk-Othmer, 1961



3. TECNOLOGIA

3.1 QUÍMICA DEL YODO

El yodo se presenta en el caliche, como yodatos. Parte de este yodo se disuelve junto con el nitrato, por lo que es posible su extracción. En la planta, el objetivo es reducir el yodato de sodio de las soluciones fuertes (300 g/l de NaNO_3), provenientes de la lixiviación del caliche, para llevarlo a yodo libre, para luego separarlo y purificarlo.

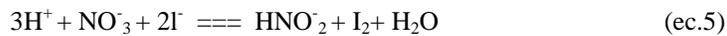
El yodo se encuentra en el caliche formando la lautarita ($\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$); por lo general, en la lixiviación se extrae como yodato (IO_3^-) con un estado de oxidación +5. El yodo se recupera por reducción a yodo libre con anhídrido sulfuroso. A medida que el yodo se reduce, se produce una variedad de iones, con varios estados de oxidación tales como I^- , I_2 , y ICl_2^- . Estos estados, son los de mayor importancia en lo que al proceso de óxido-reducción se refiere. El término medio del estado de oxidación se define como el estado de oxidación medio de todas las especies que actúan, así, este estado medio junto con el pH, la temperatura y la presión, ayudan a determinar que iones grupos de iones predominan en un punto del sistema. De los iones anteriormente nombrados el menos conocido es el ICl_2^- , que es un derivado del monoclóruo (ICl), que se puede preparar como un compuesto puro, pero que tiende a existir como ICl_2^- en las soluciones acuosas, especialmente cuando hay iones cloruro presentes. La estabilidad de este ión depende de la cercanía del ión I^- , además del estado de oxidación y del pH. El ICl_2^- puede estar presente en un gran rango de pH. El ICl_2^- se manifiesta en los procesos actuales debido al alto contenido de yodo total en agua feble y a la tendencia a generar yodo libre adicional, cuando se mezclan el agua feble con soluciones alcalinas de las plantas.

Equilibrio del yodo

Los distintos iones del yodo, a los cuales concierne la obtención del yodo, entran en reacciones reversibles unos con otros, y en algunos casos, con otros iones del agua vieja, tales como Cl^- y NO_3^- .

El conjunto de reacciones que controla el proceso es el siguiente, cabe mencionar que todas las reacciones menos dos involucran al ion hidrógeno y agua; es por esta razón que el pH es vital en el establecimiento del equilibrio del yodo.





Obtención del yodo por reducción del yodato

La mayor parte del yodo producido se obtiene del caliche, éste contiene de 0,05 a 0,1% de yodo, existente como yodato de calcio (lautarita). En la lixiviación, la lautarita se disuelve de manera que se puede considerar que en las soluciones, el yodo está presente como yodato.

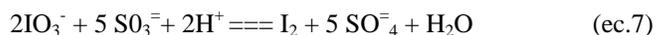
El caliche triturado, aproximadamente el 75 % del total proveniente de la mina, se carga en los estanques de lixiviación (cachuchos) de 7.500 ton de capacidad que se llenan en forma ascendente con 2.600 m³ de solución de concentración 320 gpl de nitrato, luego la solución se pone a circular a través del caliche concentrándose hasta 400 gpl. Una vez alcanzada esta concentración, el cachucho entra al sistema de lixiviación de multietapas en contracorriente a la cabeza del ciclo, mientras que el cachucho que está en la cola entra al ciclo del sulfato.

- En el primer ciclo de lixiviación del caliche, se distinguen cuatro etapas: SS, I₁, I₂, I₃, de este sistema se obtienen las soluciones concentradas en nitrato, llamadas SSNa, que se envían a la cristalización del nitrato-sódico, para separar los cristales de las aguas madres, MLR, por centrifugación. Una parte de esta solución MLR se envía a lixiviación y el resto a la planta de yodo A de Coya Sur, Figuras N°1 y N°2.

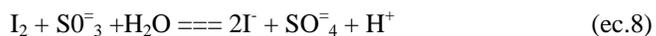
Con el fin de recuperar el yodo de estas soluciones, debe reducirse el yodato a yodo libre, con estado de oxidación cero. El reductor más adecuado en este caso es el anhídrido sulfuroso (SO₂). A medida que el yodato se reduce, se produce una serie de iones con diferentes estados de oxidación (ec.1) a (ec.6).

Una vez que se haya determinado cuales reacciones simples o múltiples son las que controlan el proceso, es posible calcular las concentraciones de todos los iones del sistema.

La reducción del ión yodato a yodo libre se realiza mediante una serie de reacciones, que pueden escribirse como:



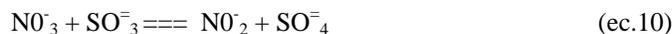
A ciertos valores de pH, es más estable el yoduro y se produce la reacción entre el SO₂ y el yodo libre.



Una ulterior adición de yodato, toma la forma de:



A bajo valores de pH hay reducción del nitrato, según la siguiente expresión:



La reacción de la ec.9, se produce fuera de la torre absorción, en el reactor tubular, vea Figura N°3. Todas estas reacciones son relativamente rápidas, excepto la reacción (ec.10), que es más lenta y se manifiesta acompañada de desprendimiento de gases nitrosos. Esta reacción no es beneficiosa porque consume SO_2 , descompone al nitrato y conduce a la reacción a zonas donde es estable ICl_2 , perjudicando la operación subsiguiente de la planta de yodo. Hasta el momento, el control es por la vía del control del pH, ya que bajos valores de éste se favorece y a valores altos, se retarda. Por su parte, también las reacciones de (ec.7), (ec.8) y (ec.9) se ven favorecidas a bajos pH, mientras que, a pH altos se retardan, por lo tanto, es necesario hallar un punto de equilibrio entre las reacciones, a excepción de la reacción de la (ec.10), la cual no es deseada.

El instrumento de control o “redox”, es una celda que mide el potencial de óxido-reducción del yodo, muestra un punto de inflexión, en donde termina la reacción (ec.7) y comienza la siguiente (ec.8), o sea, en el punto que corresponde al grado de oxidación cero del yodo.

Separación del yodo libre precipitado

De la reacción (ec.9) se obtiene el yodo que es poco soluble en el agua madre y precipita en su mayor parte en forma de microcristales, que pueden ser separados por flotación sin necesidad de agregar reactivos de flotación, Figura N°3.

El yodo es llevado por la espuma y rebalsa a la canal de pulpa, pasando a una segunda flotación de lavado, cuya cola vuelve a la primera flotación. La cola de la primera flotación, que incluye las porciones de yodo que no alcanzaron a flotar en la celda y el yodo que queda en solución pasa a un proceso posterior.

Separación del yodo libre en solución

Este yodo se separa de la solución por medio de extracción líquido-líquido con kerosene, Figura N°4. En la reacción de hidrólisis del ICl_2 , (ec.2), el equilibrio se desplaza hacia la derecha, reduciendo la concentración de I_2 . Por lo tanto, puede decirse que la descomposición del ICl_2 , puede efectuarse mediante la remoción el yodo libre que ocurre durante la extracción de kerosene.

Si el equilibrio está muy desplazado hacia la izquierda y sólo existe una pequeña concentración de yodo libre, entonces la acción del kerosene es muy lenta. Sin embargo, si estamos en el caso de tener una concentración de yodo libre apreciable, la acción del kerosene en la descomposición del ICl_2 , puede ser muy efectiva.

- En el segundo ciclo de lixiviación del salitre existen dos etapas: lavado (W) y drenaje (Dr), y de él se obtienen las soluciones concentradas en sulfato (SSS) de aproximadamente 115 gpl; éstas son enviadas a la planta de sulfato, para su extracción. La solución empobrecida en sulfato o WSS que sale de la planta de sulfato, se envía en parte a la planta de yodo C, Figura N°2.

Una vez que se ha completado el segundo ciclo de lixiviación, el cachucho está en condiciones de ser desripiado, el material agotado (ripió) tiene las siguientes leyes en base seca: 0.1 % en nitrato; 0.009% en yodo y 3.6 % en sulfato.

La planta de yodo C, de María Elena (Figura N°2), trata las soluciones (WSS) provenientes de la cristalización del sulfato de sodio, esta solución tiene una concentración media de 0.45 gpl. de yodo total.



Esta solución se almacena en un estanque de stock (TK-A1), que permite mantener un flujo continuo hacia la planta. Desde este estanque (TK-A1), la

solución se envía a un mezclador estático junto con una solución de yoduro pre filtrado y ácido sulfúrico concentrado, Figura N°3.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE YODO

3.2.1 PLANTAS MARÍA ELENA Y COYA SUR

El yodo se encuentra en el caliche en forma de yodato de sodio, potasio o calcio. Estas se lixivian junto con el nitrato en la etapa de cabeza, Figura N°2. El porcentaje que se lixivia en esta etapa es aproximadamente el 60% de yodo que está como yodato en el caliche.

Una vez obtenido el salitre sódico cristalizado de la solución saturada de nitrato (SSNa); la solución débil de retorno o MLR, es enviada a la planta de Yodo de Coya Sur para la extracción del yodo, dicha solución tiene una concentración promedio de 1,1gpl en yodo.

En el proceso de lixiviación del sulfato también se lixivia yodo, pero con una menor concentración, la cual corresponde a 0,4 gpl, solución WSS, ésta es enviada a la planta de Yodo C, la cual entrega el yodo en forma de yoduro. El yoduro es transportado a la planta de yodo de Coya Sur, donde se termina su proceso de elaboración, según las especificaciones técnicas comerciales.

La solución de botadero recuperada de los finos de molienda es enviada al pozo N°1 de Coya Sur, desde donde se alimenta la planta de Yodo B, ver Figura N°2.

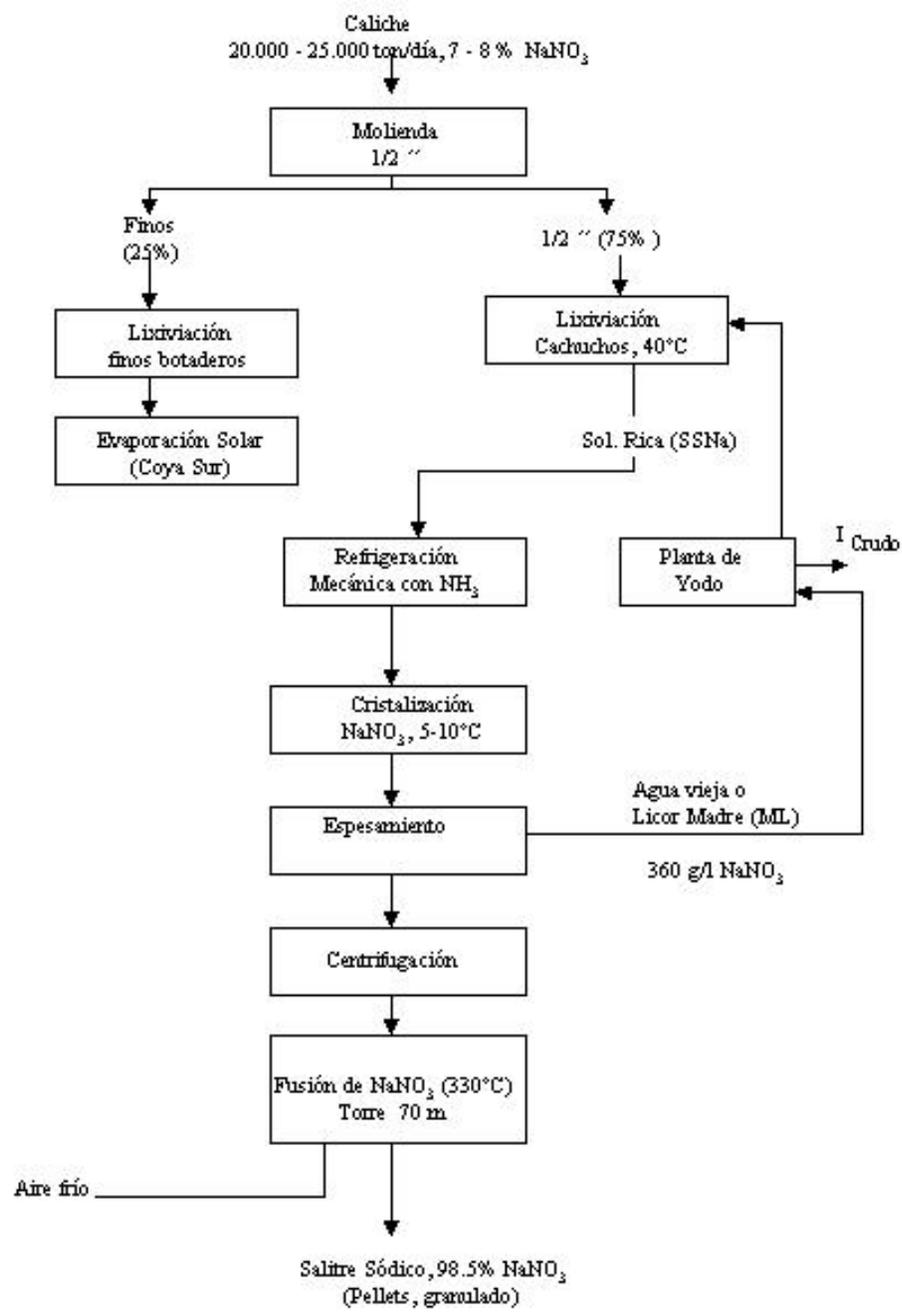


FIGURA Nº1: LIXIVIACION - CRISTALIZACION NITRATOS



3.2.2 PLANTA DE YODO

El objetivo de la planta de yodo es obtener el yodo que viene de las soluciones de la lixiviación del caliche. Este se presenta en soluciones como yodato y es necesario llevarlo a yodo libre, separarlo de la solución y purificarlo. En la reducción de yodato de sodio, la solución proveniente de los cachuchos se trata con gas sulfuroso, que se produce quemando azufre. Reacción que se realiza en dos etapas. La primera es la reacción del yodato de la solución con el anhídrido sulfuroso, para dar yoduro de sodio. La segunda etapa, la solución resultante que ahora es ácida, reacciona con otra porción de la misma solución original que contiene yodato, precipitándose al yodo libre. El yodo elemental liberado se presenta sólido dividido finamente y puede ser separado por flotación por lo que es necesario concentrarlo en forma de pulpa. Este se calienta a 1130°C para dar yodo fundido. El yodo líquido, debido a la alta densidad, se separa del líquido pasando posteriormente a laminadores, refrigerados con agua donde solidifica formando delgadas películas que son retiradas en forma de escama.

En la planta de yodo operan tres tipos de soluciones, una con concentración de 1,1 gpl de yodo (Planta A), la segunda contiene 0,4 gpl de yodo (Planta B) y la tercera que corresponde a una solución de yoduro de Planta de Yodo C. La Figura N°2, representa esquemáticamente las diferentes corrientes que se obtienen de la lixiviación en la planta de la oficina de María Elena.

Planta de Yodo A: La Planta de Yodo A opera con una solución MLR (SSNa) la cual alimenta ($2.400\text{ m}^3/\text{día}$) al sistema de cortadura en proporción de 5 partes (en la Torre de Absorción) y una parte al sistema de llapa (en reactor tubular), ver Figura N°3.

La solución que contiene yodo en forma de yodato, es enviada a la Torre de Absorción, en contracorriente con el anhídrido sulfuroso, para reducir el yodo a yoduro y luego mezclarlo con una parte de la misma solución, y así liberar el yodo en forma elemental (estado metálico).

Una vez que la solución abandona la torre (en forma de yoduro), se une con la otra parte de la solución MLR en el reactor tubular, reaccionando en medio ácido para producir la cortadura de yodo libre. Debido al medio ácido, el yodato de la solución WSS y el yoduro, reaccionan según la reacción (ec.9), para dar yodo libre en solución; a este proceso se le conoce como "cortadura". Es en este punto donde se agrega el yoduro producido en la Planta de Yodo B y C.

La solución ácida con el yodo libre pasa a una celda de flotación, donde se origina la separación del yodo desde solución. El yodo se recupera, se purifica y lamina. Esta pulpa de yodo pasa, primeramente, a través de un intercambiador de placas (intercambiador de calor) por donde circula interiormente vapor saturado. El yodo se funde y por diferencia de densidades se separa, depositándose en un reactor de acero de vidriado (acá se separan las fases, algo de agua feble y yodo fundido). Se almacena y se va purgando de acuerdo a los requerimientos. Otro reactor de refinación, recibe el yodo fundido en el cual previamente se agrega una mezcla de ácido nítrico y sulfúrico (sulfonítrico), con el fin de eliminar la materia orgánica presente, se le da un reposo mínimo de 4 horas a 125°C , terminado este proceso se traspasa a otro reactor. En el reactor siguiente ayudado con aire, se realiza el proceso de primado. El prilado se realiza por caída libre en una torre nebulizando agua, haciendo enfriar el yodo para formar el prill (la superficie refrigerada gira lentamente). El paso siguiente es una molienda, muestreo y empaque. El yodo que no cumple con las especificaciones, es sublimado. La solución de cola de flotación contiene yodo libre disuelto, por lo que es enviada al sistema de extracción líquido-líquido o extracción por solvente (se utiliza kerosene). En dicho proceso, el kerosene capta el yodo libre contenido en la solución, dejando



libre el agua feble, la que, posteriormente, se neutraliza con carbonato de sodio. La solución feble neutralizada, $640 \text{ m}^3/\text{día}$, alimenta las pozas de evaporación para la producción de salitre potásico y la diferencia es enviada a lixiviación en María Elena.

El yodo captado por el kerosene se mezcla con una solución de yoduro rica en SO_2 , la cual capta el yodo del kerosene y lo pasa a la solución de yoduro. Dicha solución se va incrementando en la alimentación del reactor.

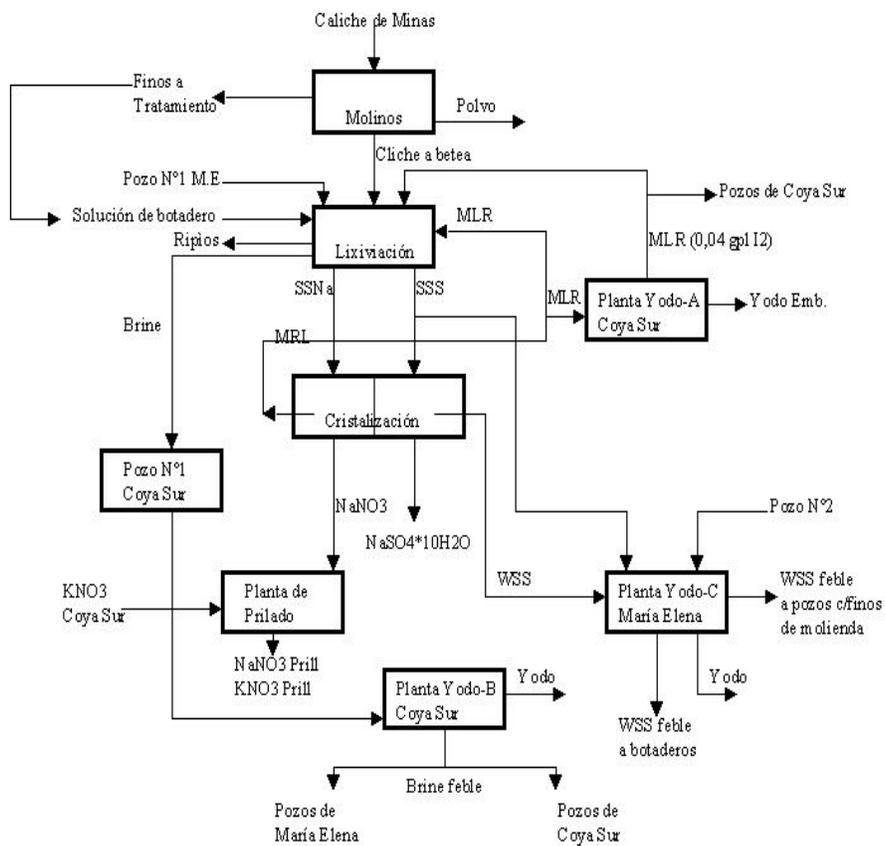


FIGURA N°2 : DIAGRAMA DE OPERACIONES DE MARIA ELENA



Producción de SO_2 : La producción de SO_2 se realiza en un horno rotatorio, en el cual se combustiona el azufre con oxígeno del aire. El SO_2 formado pasa a una cámara de sedimentación y luego se introduce a un enfriador, recibiendo un rociado adiabático de solución de yoduro. Los gases enfriados van hacia torres de reacción y la solución yodurada que ahora es portadora de SO_2 disuelto va hacia la torre de Blow-Out (torre de absorción), a cumplir su función de reductor.

Dos torres operando en serie reciben simultáneamente flujos de contracorriente, la solución que contiene yodato y el anhídrido sulfuroso, y entregan el yodato reducido a yoduro y un gas empobrecido en SO_2 . Los gases son lavados en una tercera enfriadera, con el chorro de solución de yoduro que es llevada hacia la planta de solventes. Los gases, salen a la atmósfera arrastrando vapor de agua exento de SO_2 .

- **Planta de Yodo B**

La solución proveniente del Pozo N°1 ($1.800 \text{ m}^3/\text{día}$) es enviada a un estanque stock de alimentación donde se le agrega una proporción de ácido para bajar su alcalinidad; dicha solución, una vez ácida, es bombeada a un reactor de la Planta A.

La solución resultante se envía a un proceso de extracción líquido-líquido, similar al de la Planta A y la solución rica en yoduro se alimenta al punto indicado anteriormente.

Las eficiencias reportadas están alrededor del 90%, ya que se obtienen soluciones febles del orden de 0,04 gpl en yodo en la salida.



Planta de Yodo en Cala-Cala.

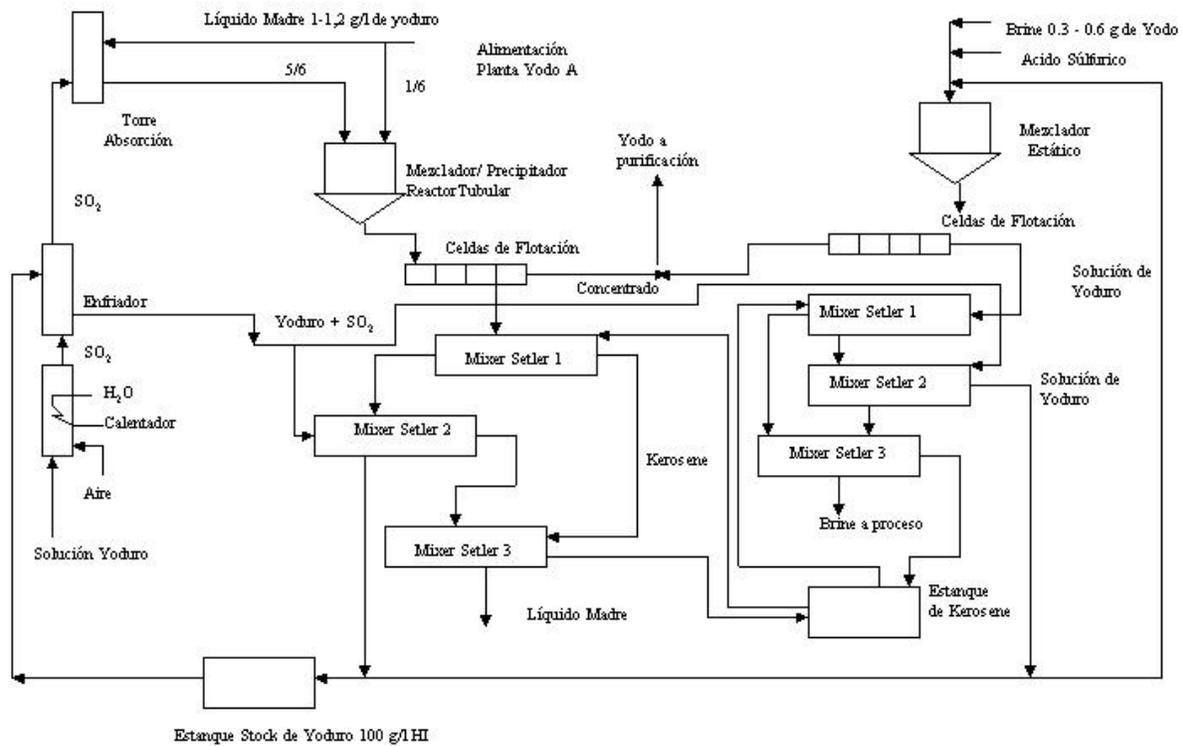


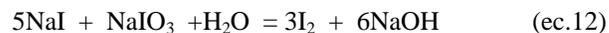
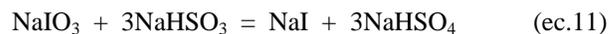
FIGURA N°3: PROCESO DE OBTENCIÓN DE YODO SQM

- **Planta de Yodo C**

Planta ubicada en María Elena, pero de igual proceso que la Planta de Yodo B, de Coya Sur. Las soluciones WSS que trata, contienen alrededor de 0,4 gpl y su solución feble se utiliza para mezclar con los finos de molienda.

Proceso de Cortadura y Blow-Out: Esta tecnología aprovecha el yodo a partir de soluciones que contienen yodatos, las cuales son un subproducto de la recuperación de salitre. Aquí también se usan métodos como blow-out, extracción por solventes, reducción, flotación, etc. Un flow-sheet general del proceso es mostrado en las Figuras N°3 y 4.

El proceso consiste en la reducción de los yodatos contenidos en el licor madre o solución fuerte, de concentraciones de 6 a 10 g I₂. Esta reducción a yoduro se realiza indistintamente como bisulfito de sodio o con SO₂ y luego se hace reaccionar el yoduro formado con yodato de la solución de entrada en medio ácido para obtener el yodo precipitado, según las reacciones:



El yodo precipitado es recuperado por flotación sin reactivos en celdas de flotación. El yodo es concentrado hasta un 33%, es fundido a 120°C y purificado con ácido sulfúrico (120°C), posteriormente va a una etapa de recristalización, para pasar a través de rodillos enfriados por agua y obtener el yodo en forma de escamas, que son vendidas directamente como yodo “crudo”.

Las soluciones de cola de flotación que contienen yodo libre son recuperadas por extracción por solventes, usando kerosene en un mixer settler de fibra de vidrio.

La fase kerosene es decantada en un segundo estanque regenerador, donde se realiza el stripping o reextracción con la solución de yoduro. La solución efluente que deja la planta en neutralizada con ceniza de soda y después retorna al proceso de lixiviación.

La solución de yoduro usada para stripping se mantiene a la concentración de 100 g/l de HI, a un pH determinado y se usa para enfriar el SO₂ producido en el sistema de quemado de azufre.

3.2.3 TRATAMIENTO DE TORTAS Y REPASOS

Las tortas de antiguas calicheras, con una ley del 0.05% I₂, también son procesadas para extraer su yodo.

Una vez extraídas pasan por una etapa de molienda y lixiviación acuosa. Las soluciones enriquecidas son filtradas y se produce la reducción del yodo (posterior cortadura), filtradas para obtener una pasta de yodo del 80 a 83%. Posteriormente van a etapas de fusión y laminado, para obtener el producto de yodo crudo con un 98.5%, Figura N°3.

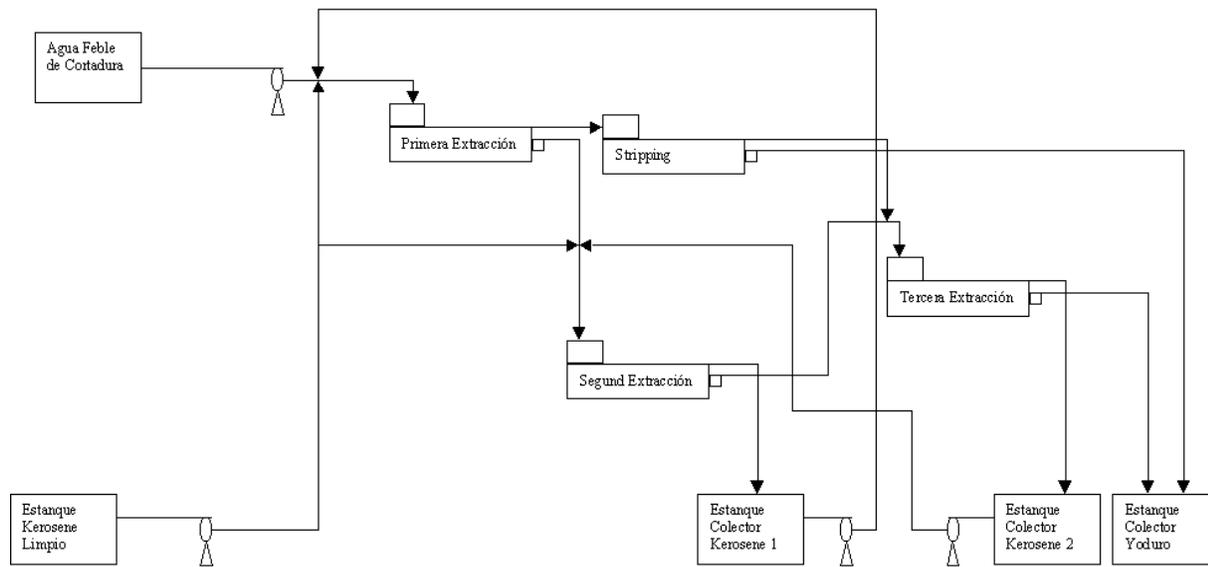


FIGURA N° 4: DIAGRAMA DE FLUJO ETAPA DE EXTRACCION DE YODO CON KEROSENE

4. RESERVAS Y RECURSOS

Desde el año 1995, la demanda de yodo ha ido en aumento, después del receso económico de 1994.

Actualmente, se estima que la demanda mundial es del orden de 16.000 ton anuales, de las cuales Chile produce casi un tercio, otro tanto similar, Japón; el resto lo producen Estados Unidos y Rusia.

Japón, el segundo productor mundial, produce yodo de 17 plantas que operan 6 compañías. La capacidad total de sus plantas es de 9.000 ton por año, pero su capacidad de producción depende de la disponibilidad de sus salmueras con altas concentraciones de yodo.

La principal compañía productora de Estados Unidos ubicada en Woodward, Oklahoma, produce yodo a partir de salmueras subterráneas, la segunda en importancia opera una mini planta en Kingfisher County, produciendo yodo a partir de salmueras asociadas con la producción de aceites; mientras que la tercera compañía satisface los requerimientos de uso domésticos y una pequeña exportación a Alemania. Los precios del yodo crudo publicados por U.S. Department of the Interior (2000), oscilaron entre US\$19 y US\$21 por kilogramos, mientras que el importado tuvo un valor promedio de US\$16.67 por kilogramos.



TABLA N° 5: Producción de mina en el mundo, reservas y reserva base

PAÍSES	PRODUCCIÓN MINA		RESERVA	RESERVA BASE
	1998	1999		
Estado Unido	1.490	1.630	550.000	550.000
Azerbaijan	300	300	170.000	Na
Chile	12.618	8.000	900.000	1.200.000
China	500	500	400.000	400.000
Indonesia	70	70	100.000	100.000
Japón	6.000	6.000	4.000.000	7.000.000
Rusia	120	120	Na	Na
Turkmenitan	25	250	170.000	Na
Producción Total Mundial	21.300	16.900	6.300.000	Na

Na: No disponible

Fuente: Minerals Commodity Summaries, Febrero, 2000.

5. MERCADO

En la I región, en los últimos diez años se han instalado cuatro empresas, las cuales han utilizado procesos de lixiviación en pilas, para extraer yodo de los desmontes (tortas) de las pampas. Una de ellas es ACF, en la zona de Lagunas y COSAYACH, en la oficina Cala-Cala, se han visto enfrentadas a una serie de problemas técnicos. Pero pese a estos problemas, la producción de yodo en nuestro país ha ido en aumento, después de la baja en 1994, situación que duró hasta 1999.

Con los proyectos de la ampliación de su planta ubicada a 120 kilómetros al norte de Antofagasta, filial CIMIN y la nueva planta ubicada a 145 kilómetros al sur de Iquique, la Sociedad Química de Chile dispuso a partir de 1997 de una capacidad de producción de 8.000 toneladas anuales, considerando además, las plantas de Pedro de Valdivia y María Elena, lo que le permite abastecer cerca del 50% de la demanda mundial de yodo y consolida su ubicación de primer productor del mundo

En cuanto al precio promedio del yodo, fue de US\$ 10.418,7 ton FOB, durante el periodo 1991-1997. Esta cifra generó ingresos por divisas al país que ascendieron a los US\$140,2 millones. Mientras que en 1998, los ingresos fueron superiores a los US\$183,793 millones por concepto de exportación de yodo; en yoduro alcanzaron los US\$ 6,147 millones y por yodatos US\$ 5.7 millones. La Tabla N°6 resume los ingresos en miles de dólares por toneladas de yodo y el valor promedio anual entre el periodo 1991-1998.



A partir de 1999, se produce un cambio, puesto que los mercados se han visto afectados por un desequilibrio temporal entre la oferta y la demanda mundial de yodo, afectando los resultados operacionales los que se manifiestan en un menor precio promedio del yodo durante el año 2000, disminuyendo aproximadamente US\$2 el kilo respecto al año 1999. Los volúmenes de venta de yodo y derivados de yodo, también se vieron disminuídos, respecto al año anterior. A pesar del desequilibrio temporal en el mercado del yodo que significó la caída en sus precios de venta, se estima un crecimiento en la demanda para los próximos años, en conjunto con la relativa escasez de fuentes económicas de yodo, distintas de SQM, con lo cual le permite estabilizar los precios internacionales

Las exportaciones abarcaron diversos países, entre los principales se encuentran Estados Unidos, Bélgica, Holanda, Francia, Brasil, Hong - Kong; éstas llegaron a 9,852 toneladas métricas en 1998, aumentando así en 1000 tM, respecto al año anterior.

TABLA N°6: Exportaciones chilenas de I₂ valoradas miles de dólares FOB y Valor promedio anual en dólares/ton métricas

AÑOS	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
I ₂ milesUS\$	49.329	49.307	34.102	37.473	62.243	91.480	140.079	183.793
I ₂ Prom.US\$/ton	9.116,8	8.444,6	7.648,4	7.673,5	9.724,4	14.447,9	15.875	18.655
Yoduros US\$ / Ton	nd	nd	nd	8562.1	9554.6	14627.4	15687.3	19391.2
Yodatos US\$ / Ton	nd	nd	nd	7771.7	8547.7	13799.8	14265.9	16602.3

Fuente: Comisión Chilena del Cobre, N°119, 1999

TABLA N°7: Producción de yodo en ton métricas

AÑOS	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998*
I ₂ ton métricas	5.614	5.906	5.958	5.644	5.444	6.895	7.154	9.722

Fuente: Comisión Chilena del Cobre, N°119, 1999

*SERNAGEOMIN, 1999

El yodo es comercializado en diferentes productos, Tabla N°8, principalmente su venta es en la forma de yodo crudo (95% I₂) y yodo sublimado (99.8% I₂), mientras que en sus formas de yoduro y yodatos, su valor es mucho menor.

Los productos del yodo y sus derivados, cumplen estándares internacionales de calidad, lo que significa que sus procesos productivos están bajo la norma ISO 9002. SQM, produce yodo en forma de prilled o granulado, lo que facilita su manipulación en ciertos procesos tecnificados, además, produce y comercializa los derivados del yodo.



6. USOS Y APLICACIONES

Los principales productos que se demandan son yodo comercial y resublimado, compuestos inorgánicos (yoduros de potasio, plata y sodio) y compuestos orgánicos (yoduro de metilo, etilo, yodoformo, yodobenceno, etc.)

Los principales consumidores de yodo son:

- **Medicina y veterinaria:** En esta área se utiliza en la preparación de antibióticos y antisépticos. Cabe señalar que la carencia en el organismo humano provoca desórdenes como bocio y cretinismo. También es requerido en materiales de contrastes para radiografías. Los medios de contrastes, han tenido un gran crecimiento por la generalización y sofisticación del empleo de radiografías en medicina; sólo el mercado en los Estados Unidos consume el 10 % de la producción, tal vez sea este rubro actualmente con mayor demanda.
- **Procesos industriales y metalúrgicos:** En la manufactura de colorantes, fabricación de nylon y diversos reactivos químicos, como en preparación de reactivos agrícolas.
- **Industria alimenticia:** La utilización de yodo sirve para enriquecer el follaje del ganado, aditivo utilizado en la sal de uso doméstico para evitar la enfermedad del bocio y cretinismo.
- **Otros:** En curtiembre

TABLA N° 8: Comercialización de los compuestos de yodo

Compuestos orgánicos	37%
Yoduro de K y Na	29%
I ₂ sublimado	8%
Aditivos en alimentación animal	21%
Pinturas y colorantes	16%
Estabilizadores	12%
Prod. Farmacéuticos	12%
Desinfectantes y sanitarios	7%
Películas fotográficas	4%
Otros	5%

6.1 NUEVAS APLICACIONES Y ENSAYOS

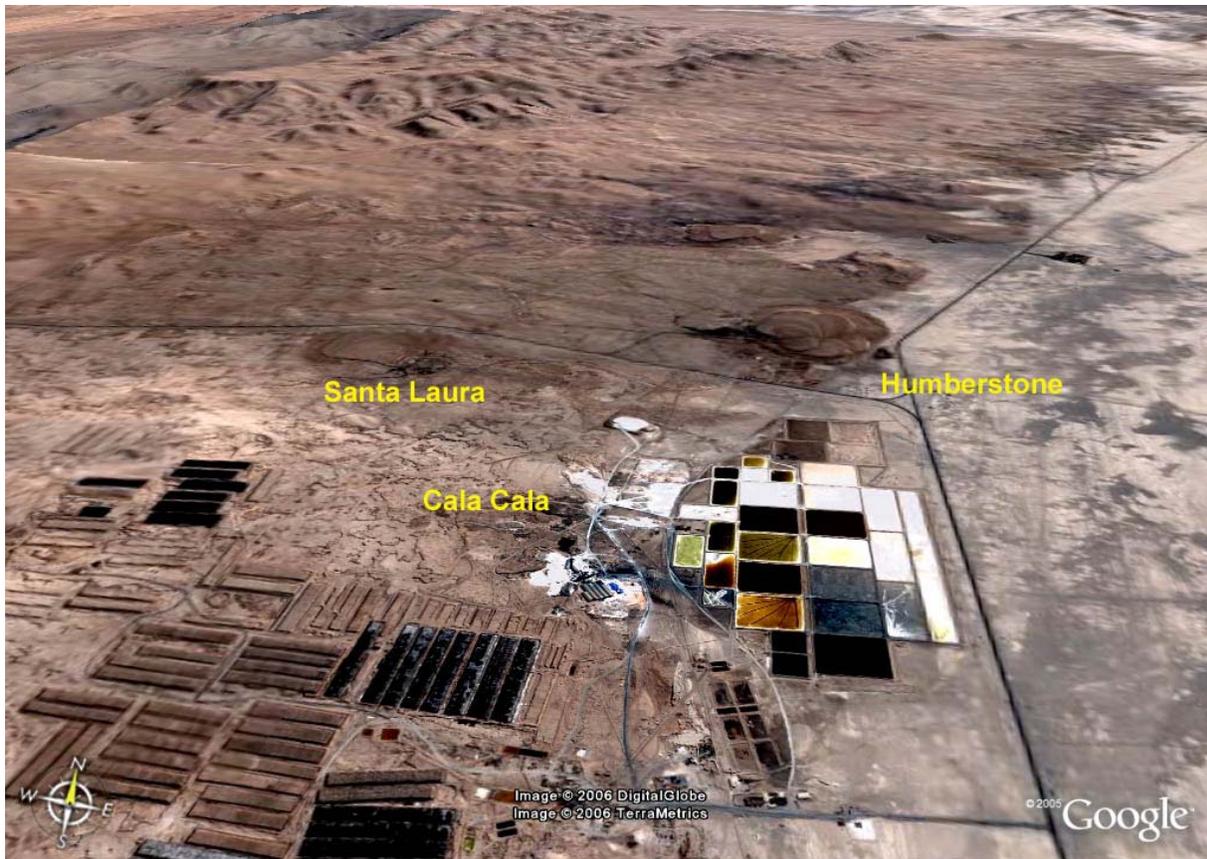
La utilización del metil yoduro en ensayos de campo, resultó exitoso como un efectivo fumigante para el control de 4 especies de hongos, 1 especie de nemátodos y 7 especies de malezas. Basados en 15 resultados de laboratorio, más los ensayos de campo, se concluyó que, el metil yoduro es más efectivo que el método del bromuro como sustancia fumigadora. El método del bromuro presenta un potencial de disminución del ozono



(ODP) de 0.65, mientras que el método del yodo tiene un ODP menor que 0.016. Esto lo presenta como un buen reemplazante del bromuro en varios usos, a pesar que es 5 veces más caro. Para el 2001, Estado Unidos lo utilizará como químico en la agricultura, sustituyendo así al metil bromuro. Bajo el protocolo de Montreal, en el año 2010 aparecerá este último, en la lista de los compuestos no utilizable en el resto del mundo.

6.2 SUSTITUTOS

Bromuros y Cloruros podrían ser sustituidos por sustitutos del yodo en tintas y colorantes, aunque usualmente ellos son menos deseables que el yodo.





7. PROYECTOS FUTUROS

En 1999, a través del Proyecto de Aguas Blancas, ubicado en la II región, se contempla producir 1000 toneladas al año de yodo, a partir del caliche. Esta compañía con la aprobación del estudio de impacto ambiental, está en su última etapa para comenzar la puesta en marcha. Se estiman reservas del orden de 29.5 millones de toneladas con un promedio de 683 partes por millón de yodo. El proceso está basado en la evaporación de soluciones obtenidas de la lixiviación del caliche, a partir de pozas de evaporación solar.

Otro proyecto que ingresó recientemente al mercado es Minera Yolanda S.A, subsidiaria de la KAR Resources Ltda., de Canadá. Esta industria se ubica en Taltal, II Región, y explotará caliche, para obtener nitrato de sodio y yodo, espera entrar al mercado con una producción de 180 toneladas de yodo. Minera Yolanda SCM, suspendió su producción de nitratos tanto en la mina como en planta, por problemas financieros.

Sumado a los proyectos anteriores, la explotación de las calicheras por parte de la empresa Saldenit Ltda., incrementará la producción de yodo nacional. Se tratarán dos tipos de materiales, de desmontes y material fresco, con una ley del 7% en nitrato y con contenidos entre 405 a 515 ppm de yodo, el proceso utilizará lixiviación en pilas, obteniendo solución de las pilas con alrededor de 1.6 gpl de yodo.

Por su parte, SQM, anunció la construcción de una planta de 1500 toneladas anuales en la I región. Cabe mencionar que SQM en 1997 sobrepasó las 7000 toneladas de yodo, dándole la supremacía en los mercados internacionales, es el mayor productor de yodo con un 31% del mercado global. Sigue teniendo mundialmente las mayores reservas conocidas de depósitos en nitratos y yodo. Las operaciones de Pedro de Valdivia (379 ppm), Maria Elena (392 ppm), y Sierra Gorda (529 ppm), (Chemical Market Reporter, 1999c).

Actualmente SQM enfrenta el futuro con una nueva estructura: SQM Holdings S.A., compañía que manejará y controlará 4 negocios. SQM Chemicals S.A., que controlará las operaciones de litio y iodo. La oficina de Estados Unidos, la cual se renombró "SQM North America" y tendrá a su cargo la comercialización de Norte América, América Central y Chile. Mientras que, la oficina de SQM en Santiago, Chile, será la responsable de las ventas del resto del mundo (Fertilizer International, 1999).

El proyecto de nitratos y iodo en Pampa Dominador, comenzó a desarrollarse por Minera Cero Imán SCM (MCI), subsidiaria de Minera Soledad S.A., compañía privada Chilena establecida en 1988. Sus depósitos ubicados en el Desierto de Atacama a 1.750 m s.n.m. y a 160 km sudeste de Antofagasta, se localizan en la ex-"oficina Salitrera Dominador," la cual operó entre 1925 y 1930. Se minaron un total de 8.750 ha en la Pampa Dominador. El programa cubrió alrededor de 5.000 ha, durante 1998. Las reservas calculadas a Enero de 1999 incluyeron reservas por 540 Mkg de yodo, con probables reservas de 620 Mkg iodo (Minera Cerro Imán, 2000).

ACF Minera Ltda., una unidad de DSM N.V., Netherlands, que entró al negocio del yodo en 1991, incrementó su producción alrededor de 2.200 t en 1998 de las 1.000 t en 1995, este incremento se debe a los derivados de yodo en Maarssen, Netherlands.



Por último debemos mencionar el proyecto de la Compañía Salitre y Yodo, de Cosayach, del grupo Errázuriz, que finalizará la construcción de su planta de nitratos a comienzos del año 2000. La industria se encuentra ubicada a 45 kilómetros de Iquique y tendrá una capacidad inicial de 200 mil toneladas anuales de nitrato de potasio y sodio. Cosayach, extrae yodo y nitratos a partir de sus reservas de caliche ubicadas en la I y II Región, las que cubrieron más de 90.000 hectáreas (ha), con 300.000 toneladas métricas de yodo y 50 millones de toneladas de nitrato de sodio. Sus plantas se encuentran ubicadas en distintos sectores, como Cala-Cala con una capacidad de 648 t/año, que opera desde 1991; la planta Negreiros que opera desde 1995, con una capacidad de 1.080 t/año y la planta Soledad también de capacidad 1.080 t/año. Durante 1996, Cosayach, sumó una capacidad total de 2.808 t/año.

Como resultado del esfuerzo de expansión de SQM, las exportaciones de yodo Chileno alcanzaron el 50%, es decir, de las 9.500 t entre 1995 y 1998; 5.500 t fueron de SQM. Por su parte DSM Minera y Cosayach, alcanzaron el segundo y tercer lugar en la producción (McCoy, 1999).

8. REFERENCIAS

Crozier, R. La Industria del Yodo 1815-1915 *en* Espectacular Desarrollo del Yodo. Revista Boletín Minero N°119, 1999.

Diagnóstico de la Minería no metálica de Chile. CORFO- INTEC Chile, Vol. 2, 1135-1164, 1989

Diagnóstico preliminar sobre la Minería No-Metálica de la Primera Región de Tarapacá, Informe Inédito, PROCHILE-CORFO, 55pp, 1993

El futuro de la minería no metálica, Revista Minería Chilena, año 8, N°86, 1988

Fuentes Gerardo.: Tecnología del Yodo. Apuntes de cursos. Inédito, Universidad Católica del Norte, 1988

Kirk-Othmer: Enciclopedia Tecnología Química. 1ª ed. español, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, México, 1961.

Lyday, P.A.: Iodine Industrial Minerals *en* Mining Engineering. U.S.G.S., vol. 40, N°6, 425pp, 1987

Memoria Anual SQM. Editada por SQM, Santiago de Chile, 12-15, 1997



Minerals Commodity Summaries On line. U.S.Geological Survey. Minerals Information Estados Unidos, 1999.

[www./minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/](http://www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/)

Minería Chilena, Año 19 (N°221), 53,1999.

Minería del Salitre y el Carbón. Revista Minería Chilena, año 6, N°65, 1986

Perez, V.: Informe Anuario Estadístico 1995. Departamento de Estudios y Desarrollo. Comisión Chilena del Cobre, 1995

U.S. Department of the Interior: US Geological Surver: Mineral Commodity Summaries 2000, 85-86, Feb. 2000.

Vila, Tomás: Recursos Minerales No Metálicos de Chile. Informe Inédito, Antofagasta, I.I.G., 1953