

Mineralogía y evolución de las salmueras madres en el yacimiento de nitratos Pedro de Valdivia, Antofagasta, Chile

Juan J. Pueyo

Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona,
Zona Universitaria de Pedralbes, 08028 Barcelona

Guillermo Chong

Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte,

Marta Vega

Avda. Angamos 0610, Casilla 1280, Antofagasta

RESUMEN

Los yacimientos de nitrato de Chile están constituidos por complejas paragénesis de minerales salinos que rellenan la porosidad y los espacios abiertos de rocas de naturaleza diversa. El estudio de las secuencias mineralógicas de relleno de los diversos tipos de porosidad en la roca encajante del yacimiento Pedro de Valdivia, ha permitido obtener información sobre la evolución de las salmueras madres de las paragénesis salinas. Dicha evolución se pone de manifiesto por la precipitación de secuencias minerales progresivamente más solubles: silicatos (ceolitas); calcita; sulfatos cálcicos, sódicos (potásicos) y magnésicos; nitrato-sulfatos sódicos y potásico-magnésicos; nitratina, y pequeñas cantidades de yodatos, yodato-sulfatos sódicos y potásico-magnésicos; cromatos, boratos y percloratos. En la secuencia general de precipitación, se han podido diferenciar dos líneas evolutivas: una de naturaleza sódica, caracterizada por la asociación glauberita-darapskita- (hectorfloresita), y otra, de naturaleza sódico-potásico-magnésica, caracterizada por la presencia de bloedita-polihalita-humberstonita-nitro- (fuenzalidaite). Las salmueras madres del yacimiento están relacionadas con el sistema freático a partir del cual precipitaron las asociaciones salinas. Se atribuye a las mineralizaciones una edad oligoceno-miocena (con edad mínima de 6 Ma). Las principales características fisiográficas durante dicho período habrían sido similares a las actuales y el clima, probablemente, más húmedo. En la génesis de las salmueras madres de los yacimientos de nitrato han debido intervenir procesos termales y reciclaje por lixiviación de sales previamente formadas en el ambiente árido del Desierto de Atacama. La evaporación es el único mecanismo, lo suficientemente efectivo, como para saturar las salmueras en minerales muy solubles. Sin embargo, los nitratos no deben ser considerados como verdaderas evaporitas, dada su disposición rellenando fisuras (y porosidades), la casi ausencia de crecimientos desplazativos (configurando nódulos o enterolitos) y de otras estructuras características de las evaporitas.

Palabras claves: Nitratos, Yodatos, Minerales salinos, Evolución de salmueras, Petrografía, Norte de Chile.

ABSTRACT

Mineralogy and parental brine evolution in the Pedro de Valdivia nitrate deposit, Antofagasta, Chile.

The Chilean nitrate deposits have been formed by a complex paragenesis of saline minerals that infill the porosity and open spaces of different country rocks. The study of the mineral infilling sequences in the rock porosities at the Pedro de Valdivia deposit has enabled to gain information about the evolution of the parental brines of the saline (nitrate bearing) paragenesis. This evolution is revealed by the precipitation of a sequence of progressively more soluble minerals: silicates (zeolites); calcite; Ca-, Na-, (K-) and Mg-sulphates; Na- and KMg-nitrate-sulphates; nitratine; and small amounts of iodates, Na- and KMg-iodate-sulphates, chromates, borates and perchlorates. Two specific trends have been distinguished in the general sequence. A Na- trend characterised by the association glauberite-darapskite-(hectorfloresite), and a K-Mg-Na- trend related to bloedite-polyhalite-humberstonite-niter-(fuenzalidaite). Parental brines of the deposit were

related to the phreatic system from which saline associations precipitate. Regional data drive the authors to consider as Oligocene-Miocene (but older than 6 Ma) the age of the mineralisation. The main physiographic features were similar to the recent ones in this period, the climate being more humid. The genesis of the parental brines of the Chilean nitrate deposits is assumed to include thermal processes and recycling by leaching of previous salts formed in the arid environment of the Atacama Desert. Evaporation has also been involved in their genesis. It is the only mechanism effective enough to saturate the brines in very soluble minerals. Nevertheless, the nitrate ores cannot be considered as true evaporites owing to their arrangement infilling veins (and porosities) and the almost complete absence of displacive growths (as nodules or enterolithes) and other typical structures of evaporites.

Key words: Nitrates, Iodates, Saline minerals, Brine evolution, Petrography, Northern Chile.

INTRODUCCION



FIG. texto 1. Mapa general de distribución de las mineralizaciones de nitrato en el norte de Chile (áreas en gris claro). El recuadro indica el área comprendida en la figura texto 3. Los principales salares de la zona están indicados en gris oscuro.

Los yacimientos de nitrato de Chile están formados por asociaciones complejas de minerales salinos. La mena, llamada localmente **caliche**, se presenta relleno de la porosidad y el sistema fisural (diacclasas, microfallas y fallas), así como en diseminaciones irregulares en rocas de edad y naturaleza diversa. Así se presenta en rocas metamórficas, volcánicas, volcanoclásticas, sedimentitas terrígenas y carbonáticas, e intrusivos de edades que abarcan del Paleozoico al Cenozoico. El caso más frecuente es, no obstante, encontrarla relleno de la porosidad de materiales volcanoclásticos terrígenos que forman parte de sistemas aluviales, como piedemontes y abanicos aluviales coalescentes. Minerales que son extraordinariamente raros de encontrar en la naturaleza tales como nitratos, nitrato-sulfatos, yodatos, yodato-sulfatos y cromatos, constituyen la mena de los yacimientos de nitrato de Chile, acompañando a sulfatos, cloruros y, en bastante menor proporción, boratos y carbonatos.

Los yacimientos están situados en el Desierto de Atacama, en el norte de Chile, entre los 19°30' y los 25°30'S, y los 69°30' y los 70°30'W (Fig. texto 1). Se distribuyen según una franja irregular de hasta varias decenas de km de ancho y ca. 700 km de longitud en dirección norte-sur, dispuesta paralelamente al contacto entre la Cordillera de la Costa y la Depresión Central (Fig. texto 2), aproximadamente entre la Pampa Tana y Taltal. Los yacimientos ocupan, principalmente, la parte oriental de la Cordillera de la Costa y la más occidental de la Depresión Central.

Ericksen (1981) clasificó los yacimientos según su emplazamiento en roca o en depósitos aluviales:

- **Los yacimientos en roca** se caracterizan porque los minerales de mena rellenan sistemas de

fracturas abiertas, y su mena puede tener localmente altas concentraciones de cloruro y nitrato sódicos (**caliche blanco**).

Los yacimientos en depósitos aluviales (o sedimentarios, Chong, 1994) se caracterizan por rellenar porosidades de menor tamaño que en los yacimientos de roca, tanto de fractura como sedimentarias, en sedimentos terrígenos. Las porosidades sedimentarias (o de alteración) son de escala milimétrica o menor. Su mena es de color pardo oscuro y recibe comúnmente el nombre de **caliche negro** (Chong, 1991, 1994).

Ambos tipos de yacimiento se presentan asociados. Así en una misma área, se puede encontrar mena de nitrato en la porosidad de los materiales terrígenos que constituyen los depósitos aluviales y, también, en el sistema fisural de la roca que

conforma su basamento.

El origen de los yacimientos de nitrato (y yodo) de Chile ha sido controvertido desde tiempos antiguos. Así, se han postulado hipótesis genéticas muy dispares: su aporte en forma de aerosoles marinos arrastrados por el viento, la fijación del nitrógeno atmosférico por actividad de bacterias nitrificantes, o su relación con termalismo y vulcanismo, entre muchas otras (Ericksen, 1983). No obstante, si bien se han realizados numerosos análisis mineralógicos y químicos de la mena de nitrato, muy pocos estudios petrográficos y geoquímicos han sido efectuados, tanto de la mena como de las rocas encajantes, siendo estos últimos imprescindibles para conocer los procesos de precipitación que han dado lugar a los yacimientos así como la procedencia de las salmueras.

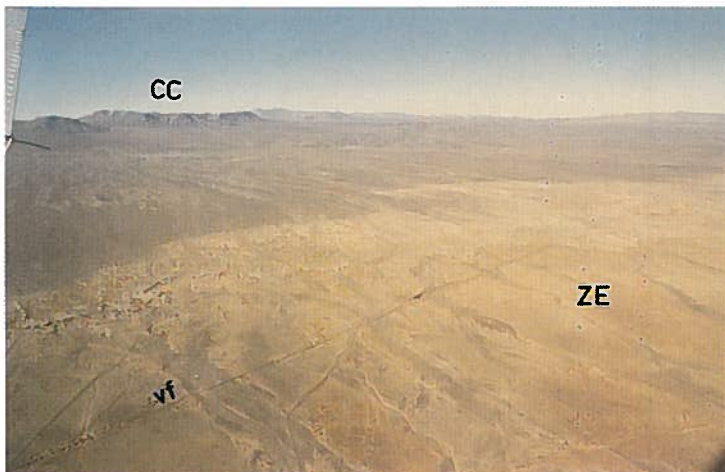


FIG. texto 2. Aspecto general de los yacimientos de nitrato. Es frecuente su emplazamiento en la parte más oriental de la Cordillera de la Costa (CC), junto al contacto con la Depresión Central. La vista panorámica abarca parte de un gran abanico aluvial que drena hacia el este. ZE- zona explotada; vf- vía férrea.

SITUACION GEOGRAFICA Y GEOLOGICA

El depósito de Pedro de Valdivia, actualmente sin explotar, está situado 160 km al NNE de Antofagasta (22°45'S, 69°40'W), en la Depresión Central, y prácticamente en la parte central de la franja en la que se presentan los yacimientos de nitrato. Se extiende por un área de ca. 15 km de ancho y 40 de largo, elongada en dirección nortesur, teniendo continuidad hacia el norte con los depósitos de María Elena (Fig. texto 3). La altitud media de la zona es de ca. 1.500 m, siendo la topografía de la misma muy suave con diferencias de elevación no mayor que 200 m.

El marco regional geológico (Araya y Toro, 1983) está formado por rocas volcánicas e intrusivas. Las primeras constituyen una secuencia de 350 m de coladas andesíticas (**Formación La Negra**), de edad jurásica, 150 m de tobas y brechas ácidas de edad cretácica, 150 m de tobas e ignimbritas a las que se asigna una edad paleoceno-eocena, y rocas clásticas y volcanoclásticas aluviales (que contienen la mena de nitrato), consideradas de edad miocena. Discordantes sobre dicha secuencia, se disponen materiales aluviales y coluviales inconsolidados cuaternarios. Las rocas intrusivas están

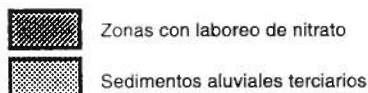
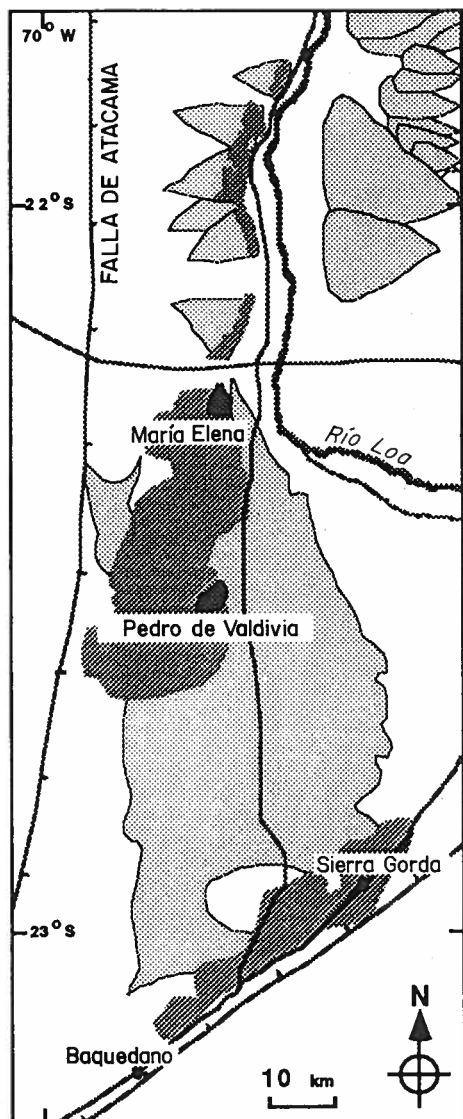


FIG. texto 3. Distribución de las zonas en las que ha sido extraído nitrato en el área de Pedro de Valdivia. Se observa la situación del nitrato en posición distal en los abanicos aluviales del margen oeste del río Loa.

representadas por granitos y monzodioritas mesozoicas y por pórfidos ácidos cenozoicos. El sistema de fracturas consta de una familia dominante de rumbo norte-sur, con otras subordinadas de rumbos aproximados N40E y E-W.

En los yacimientos de Pedro de Valdivia, la mena de nitrato se presenta (Fig. texto 4) en sedimentos, a los que se ha asignado una edad miocena, y se encuentra diseminada rellenando porosidades en las tobas e ignimbritas del Paleoceno-Eoceno. La mena, con leyes de hasta el 11% NO_3 , se extiende normalmente hasta ca. 3 m de profundidad, aunque puede alcanzar los 10 metros.

MINERALOGIA

Los minerales presentes en el yacimiento de Pedro de Valdivia (Tabla 1) han sido reconocidos sistemáticamente mediante microscopía óptica y difracción de rayos X utilizando, en este último caso, la técnica de polvo cristalino. En aquellos casos en que los granos minerales eran de tamaño micrométrico y poco abundantes, se ha utilizado microscopía electrónica de barrido sobre fractura fresca de la roca salina, tras haber sido ésta recubierta con grafito por evaporación en vacío. El microscopio utilizado dispone de un detector de

electrones retrodispersados y un espectrómetro de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS).

Cloruros, nitratos y sulfatos son los minerales más importantes cuantitativamente, encontrándose también cantidades subordinadas de carbonatos, boratos, yodatos, cromatos, óxidos, silicatos y (per)cloratos. Si se considera un perfil vertical de los **yacimientos sedimentarios**, los minerales se distribuyen de modo que, en superficie, dominan los sulfatos, mientras que en profundidad lo hacen los cloruros y los nitratos. En el caliche de este tipo



FIG. texto 4. Frente de explotación en la zona de Pedro de Valdivia. Se muestra la vista panorámica de un yacimiento sedimentario aluvial con cantos rodados cementados por material salino.

TABLA 1. MINERALES RECONOCIDOS EN EL YACIMIENTO DE NITRATOS PEDRO DE VALDIVIA.

Cloruros	Halita	NaCl
Sulfatos	Anhidrita	CaSO ₄
	Bloedita	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O
	Glauberita	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂
	Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O
	Loweita	Na ₁₂ Mg ₃ (SO ₄) ₁₃ ·15H ₂ O
	Polihalita	Ca ₂ MgK ₂ (SO ₄) ₄ ·2H ₂ O
	Starkeyita	MgSO ₄ ·4H ₂ O
	Thenardita	Na ₂ SO ₄
Carbonatos	Calcita	CaCO ₃
Nitratos	Nitratina	NaNO ₃
	Nitro	KNO ₃
	Darapskita	Na ₃ [NO ₃ SO ₄].H ₂ O
	Humberstonita	K ₃ Na ₂ Mg ₂ [(NO ₃ (SO ₄)).6H ₂ O
Boratos	Kaliborita	KMg ₂ H[B ₆ O ₈ (OH) ₅] ₂ ·4H ₂ O
	Probertita	NaCa[(B ₅ O ₇)(OH) ₄].3H ₂ O
Yodatos	Lautarita	Ca(IO ₃) ₂
	Hectorfloresita	Na ₂ [(IO ₃)(SO ₄) ₂]
	Fuenzalidaita	K ₈ (Na,K) ₂ Na ₃ Mg ₁₀ [(SO ₄) ₄ (IO ₃) ₁₂].12H ₂ O
Cromatos	Dietzeita	Ca ₂ [(IO ₃) ₂ CrO ₄]
Oxidos	Hematites	Fe ₂ O ₃
Silicatos	Cuarzo, heulandita, laumontita	

de yacimiento, los minerales dominantes son la halita y la nitratina, con cantidades menores de sulfatos (anhidrita, glauberita y bloedita, principalmente) y nitrato-sulfatos (darapskita, Lám. 1; Fig. 1 y humberstonita, Lám. 1, Fig. 2), y cantidades muy subordinadas de calcita, ceolitas, yodatos, yodato-sulfatos (Lám. 1, Figs. 3 y 4), cromatos y boratos (Lám. 1, Figs. 5 y 6). **Los yacimientos en roca** presentan una mineralogía similar, aunque aparentemente con tendencia a una mayor diferenciación, siendo frecuentes en los mismos las fracturas rellenas por mezclas de halita-nitratina sin otros acom-

pañantes significativos. La calcita, las ceolitas y los boratos, aunque en pequeñas cantidades y muy esporádicos, se presentan rellenando fisuras. La calcita y las ceolitas están normalmente asociadas en clastos de brechas previas a la mineralización de nitrato. Los **yodatos** y cromatos se presentan de modo disperso, coloreando de amarillo las masas de halita-nitratina. Calcita, ceolitas, boratos y yodatos, también pueden encontrarse, en el caso de los yacimientos en roca, diseminados en la roca encajante fuertemente alterada.

PETROGRAFIA Y RELACIONES PARAGENETICAS

El estudio petrográfico revela que los procesos intersticiales (Chong y Pueyo, 1992; Searl y Rankin, 1993) son los principales controles de la mineralización tanto en los depósitos sedimentarios como en los de roca. En dichos procesos, intervienen una roca encajante de naturaleza diversa (normalmente silicatada clástica o, menos frecuentemente, carbonática) y soluciones fuertemente salinas, a partir de las que precipitan los distintos componentes según se va alcanzando la saturación. En el área de Pedro de Valdivia las rocas encajantes (Lám. 2, Fig. 7) son de naturaleza volcánica.

Los tipos de relleno de cavidades y secuencias de precipitación que los autores han observado son los siguientes: **a-** fisuras submilimétricas (Lám. 2, Figs. 8 y 9) en encajante silicatado (volcánico o volcanoclástico) con una primera generación de halita en las paredes, y un relleno final central por nitratina o por mezcla de minerales salinos diversos. En algunas ocasiones la primera generación de sal tiene tendencia al idiomorfismo; **b-** porosidad residual en el propio precipitado salino, formándose geodas en las que pueden coprecipitar halita y nitratina. Los autores han encontrado geodas desarrolladas en una masa formada por matriz silicatada y minerales salinos (halita, nitratina, humberstonita, darapskita). En ambos casos, la halita y la nitratina de las geodas representan los últimos precipitados intersticiales (Lám. 2, Figs. 10 y 11). En la porosidad final representada por las geodas precipitan, también, los yodatos que, frecuentemente, se presentan idiomórficos. Es el caso de la lautarita (formando pequeñas drusas submilimétricas), la hectorfloresita (formando agregados aciculáres), o de la fuenzalidaita (formando agregados de cristales tabulares pseudo hexagonales); **c-** fisuras subcentimétricas en la roca encajante, rellenas por una primera generación de ceolita (frecuentemente heulandita o laumontita), seguida de otra generación masiva de calcita espática. Ambos minerales presentan cristales de tamaño milimétrico. La secuencia puede ser recurrente estando, cada par, separado por superficies de disolución. Una última generación de ceolita va seguida de precipitación de minerales sulfatados (anhidrita, glauberita). Sin embargo, la roca muestra fisuras entre, en torno a, y dentro de los granos, siguiendo planos de exfoliación. Dichas fisuras, de tamaño milimétrico, están

rellenas total o parcialmente, por anhidrita, glauberita, halita o nitratina (Lám. 2, Fig. 12); **d-** porosidad casi totalmente obliterada por los materiales salinos. La última generación parece ser nitratina (adaptándose a la porosidad dejada por halita, glauberita y matriz silicatada), en cuyo caso, presenta gran cantidad de inclusiones y puntos triples de borde de grano sin rellenar. Una secuencia de minerales (nitratina entre granos de halita y nitro, lautarita, dietzeita, hectorfloresita y fuenzalidaita entre nitratina) que precipitan en la porosidad, representan los últimos estadios de evolución de la salmuera residual; **e-** fisuras de escala submilimétrica en la roca encajante, rellenas por la secuencia polihalita (fibrosoradiada), anhidrita y nitratina. Otras porosidades irregulares están rellenas por bloedita idiomórfica de tamaño milimétrico y, finalmente, por nitratina.

También se presentan relacionadas, frecuentemente, la darapskita con la nitratina (o con la humberstonita) y la loweita con la bloedita. Los minerales de paragénesis potásico-magnésicas (fuenzalidaita-nitro-polihalita-(silvita?)) se presentan relacionados entre sí, y a su vez, con la nitratina o con los contactos nitratina-halita. Se han observado cristales tabulares de kaliborita, de tamaño milimétrico, en cavidades entre los granos de humberstonita.

Las secuencias de precipitación reales observadas de pared a centro de las cavidades, tanto mediante microscopía óptica como electrónica, son las siguientes:

1. Ceolita-calcita (-ceolita?)
2. Calcita-ceolita-anhidrita-halita-(nitratina)
3. Calcita-ceolita-anhidrita-probertita
4. Heulandita-glauberita-(halita-nitratina-bloedita (darapskita?))
5. (Glauberita-bloedita)-humberstonita-halita
6. Bloedita-darapskita-nitratina-(hectorfloresita-fuenzalidaita)-halita
7. (?) Bloedita-polihalita-humberstonita-halita
8. Bloedita-humberstonita-kaliborita-halita
9. (Polihalita-anhidrita)-(nitratina-halita)
10. Darapskita-(nitratina-halita)
11. Humberstonita-nitratina-(halita-nitratina)
12. Humberstonita-bloedita
13. Halita-humberstonita-nitratina-(halita)
14. Halita-nitratina-hectorfloresita
15. Halita-nitratina-lautarita-(dietzeita?)

- 16. Halita-nitratina-fuenzalidaita-(nitratina)
- 17. Nitratina-hectorfloresita-probertita-(nitratina-halita?)

- 18. Nitratina-nitro
- 19. Nitratina-(per)clorato K?-dietzeita-(nitratina)

IMPLICACIONES DE LA EVOLUCION DE LAS SALMUERAS SOBRE LOS TIPOS DE MINERALIZACION

A partir del estudio petrográfico del relleno salino de las porosidades de la roca encajante de la mena de nitrato, se ha podido deducir la evolución (Fig. texto 5) de la salmuera a partir de la cual precipitaron las paragénesis salinas. Dicha evolución se pone de manifiesto por una secuencia de precipitación de minerales progresivamente más solubles: **a-** una primera generación de minerales cálcicos (ceolitas cálcicas, calcita, anhidrita); **b-** un grupo de sulfatos de Na-Ca y Na-Mg-(K) (glauberita-bloedita-polihalita), que definen dos tendencias evolutivas: **1-** una tendencia sódica, representada por la secuencia glauberita-darapskita-(halita-nitratina)-hectorfloresita; y **2-** una tendencia Na-Mg-K, representada por la secuencia bloedita-(polihalita)-humberstonita-(halita-nitratina)-fuenzalidaita. Los autores no han podido observar ninguna pauta de distribución espacial entre las asociaciones correspondientes a ambas tendencias; **c-** los últimos minerales en precipitar en la porosidad residual son nitrato-sulfatos, yodato-sulfatos, yodatos, cromatos y boratos. En general, dichos minerales precipitan en los últimos estadios de la evolución de la salmuera, cuando la halita y la nitratina coprecipitan. Estos minerales contienen elementos que, o no son compatibles con los minerales ya precipitados, o no han sido previamente consumidos.

Las secuencias de precipitación mineral observadas en el presente trabajo difieren en el detalle de las expuestas en estudios previos (Searl y Rankin, 1993) realizados en afloramientos situados al norte de la latitud de Iquique. Las secuencias de precipitación de los autores son más simples (tanto en la zona estudiada como también sobre muestras correspondientes al área norte de Iquique, actualmente en estudio) y no revelan una historia tan compleja como la mencionada por los citados autores. Sí se observa recurrencias, incluso frecuentes, como sucede en las secuencias de precipitación 11, 13, 16, 17 ó 19, descritas en el capítulo anterior. Se sugiere

que las secuencias de precipitación, y por ende la evolución de las salmueras intersticiales, reflejarían eventos de precipitación acaecidos en un lapso relativamente definido, y que existirían procesos de redisolución y ulterior precipitación. La presencia de halita-nitratina como asociación terminal, es interpretada por los autores, en algunos casos, como prueba de la existencia de procesos de redisolución de minerales preexistentes (como darapskita o humberstonita, que se disolverían incongruentemente) y de la precipitación de los nuevos solutos en la porosidad residual.

Las menas constituidas por mezclas halita-nitratina de extrema pureza son comunes en los yacimientos 'en roca', pero también rellenando fisuras abiertas (de origen tectónico) en los yacimientos aluviales. Esto se explicaría si se supone que las asociaciones minerales más antiguas son las que constituyen los yacimientos aluviales, siendo los materiales salinos que rellenan los sistemas de fisuras abiertas (tanto en los yacimientos 'en roca' como en los aluviales) ya soluciones terminales producidas por un fraccionamiento máximo de

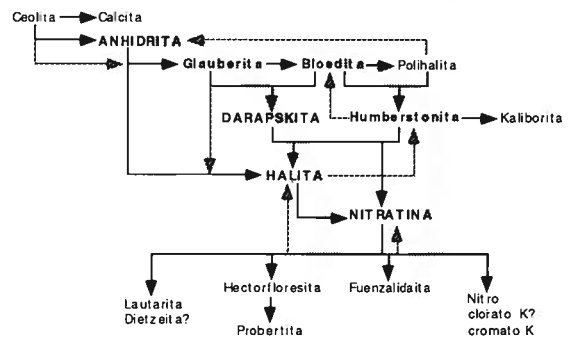


FIG. texto 5. Diagrama sintético de la evolución de las salmueras madres en el depósito de Pedro de Valdivia. Las principales relaciones paragenéticas se indican en forma de líneas continuas. Las principales tendencias se indican en forma de flechas gruesas.

las salmueras, o bien soluciones producidas, en parte, por disolución incongruente de mineralizaciones previas más complejas. Teniendo en cuenta lo anterior, los yacimientos 'en roca' aflorantes en la actualidad habrían estado infrayaciendo, en el pasado geológico, a material aluvial que habría sido eliminado ulteriormente por erosión.

Las salmueras intersticiales que dieron lugar a los yacimientos de nitrato estuvieron relacionadas con el sistema freático a partir del que precipitaron las paragénesis salinas. En dicha época, los principales rasgos fisiográficos ya estaban definidos tal como se conocen en la actualidad, los aportes hídricos provenían, predominantemente, del este. El clima debió haber sido más húmedo que el actual, especialmente en la zona altiplánica, como respuesta a una cordillera de menor altitud. La edad de la fase principal de precipitación de las menas de nitrato es imprecisa, estimándose, sobre la base de antecedentes de geología regional, como Oligoceno?-Mioceno. Los yacimientos de nitrato, en el área de Pedro de Valdivia-María Elena, al igual que en otros sectores situados más al norte, aparecen cubiertos por sedimentos lacustres y aluviales. Estos sedimentos son la continuidad lateral de las formaciones Quillagua, Batea y El Loa (Jensen, 1992; Cabrera *et al.*, 1995; May, 1997). Los autores no pueden precisar, con sus propios antecedentes, cuál de estas unidades es la que aparece en el sector de Pedro de Valdivia, pero según fuera el caso, podrían tener edades comprendidas entre 14 y ca. 6 millones de años, si se tiene en cuenta dataciones previas (Jensen, 1992; May, 1997). Ni simultáneamente, ni con posterioridad a los sedimentos lacustres de la Formación Quillagua, los autores han detectado la presencia de yacimientos de nitratos. Posteriormente, sólo han existido procesos destructivos de los yacimientos (lixiviación, erosión), por lo que en la actualidad, y al menos desde la edad mencionada, los autores consideran los yacimientos como relictos.

En la génesis de las salmueras madres de los yacimientos han intervenido procesos de aporte y enriquecimiento en sales, por lixiviación de rocas alteradas y de materiales salinos preexistentes, causada por el agua del paleosistema hidrológico. La mayor parte de los materiales salinos de la zona árida del norte de Chile, salvo contados casos de formaciones evaporíticas marinas, son básicamente de origen volcánico más o menos directo (Cabrera *et al.*, 1995; Spiro y Chong, 1996). La lixiviación

de los materiales volcánicos habría sido favorecida por procesos termales relacionados con el arco volcánico del Terciario medio (Chong y Pueyo, 1991; Vega *et al.*, 1996). Otro mecanismo de acumulación de materiales salinos, aparentemente efectivo en zonas desérticas endorreicas, es la precipitación atmosférica directa. Ericksen (1994) y Bohlke *et al.* (1997) propugnaron la existencia de un prolongado período de precipitación atmosférica y acumulación (del orden de millones de años) para explicar el anómalo contenido en nitrato, sobre la base de datos isotópicos.

En la evolución de las salmueras ha intervenido, asimismo, la evaporación, único mecanismo suficientemente efectivo como para que las salmueras lleguen a un estado evolutivo tal, que a partir de las mismas precipiten minerales de muy alta solubilidad. Por otra parte, el fraccionamiento extremo de las salmueras se vería favorecido por repetidos procesos de evaporación-precipitación, acaecidos durante la prolongada circulación hidrológica desde la Cordillera hacia el oeste. No obstante, y a pesar de la incidencia de la evaporación en su génesis, los materiales salinos con nitratos no pueden ser considerados como evaporitas en sentido estricto, ya que no muestran los tipos de emplazamiento característicos de las mismas: no hay ni texturas de precipitación bajo capa de agua ni texturas claras de crecimiento desplazativo intersticial que den lugar a crecimientos nodulares, enterolíticos o al desarrollo de cristales desplazativos. Los materiales salinos ricos en nitrato aparecen típicamente como precipitados en medios porosos y/o fisurados. Por su disposición, emplazamiento y textura, se asemejan a yacimientos vetiformes formados por relleno de cavidades abiertas.

En resumen, se sugiere que las asociaciones de nitrato-halita (y otros minerales acompañantes) precipitan a partir de salmueras muy evolucionadas por evaporación, que han recibido aportes por lixiviación freática (y termal) de rocas regionales y minerales salinos previos. Dichas salmueras, fuertemente evolucionadas, precipitarían lentamente en profundidad, aprovechando la porosidad o la fisuración del macizo rocoso. Respecto de la fase (o período) de precipitación que dio lugar a los yacimientos, quizá esté relacionada con un brusco incremento en la aridez de la zona causado por la elevación de los Andes. La Depresión Central fue endorreica durante todo el período de acumulación de los nitratos (y sales acompañantes), y el sistema

freático, con recarga principalmente andina, actuó como un mecanismo de transporte y concentración de las sales dispersas en la extensa zona árida del

norte de Chile, hacia la zona de los yacimientos, durante la mayor parte del Terciario.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido beneficiado por el proyecto EC contrato No. CII*-CT94-0069 (DG 12 HSMU). También han contribuido a la realización del mismo, la beca de la Fundación Andes (Chile) de ref.: C-12777/4 (etapa 2, 1995) (MV), el proyecto Fondecyt No. 1940948/94 (GCh) y las ayudas GRQ94-1049, 1996SGR-0070 y 1996BEAI400393

de la Generalitat de Catalunya (JJP). El trabajo analítico (determinaciones de XRD y observaciones SEM) ha sido realizado en los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Barcelona. Los autores agradecen las sugerencias de dos evaluadores anónimos, que sirvieron para mejorar considerablemente el escrito.

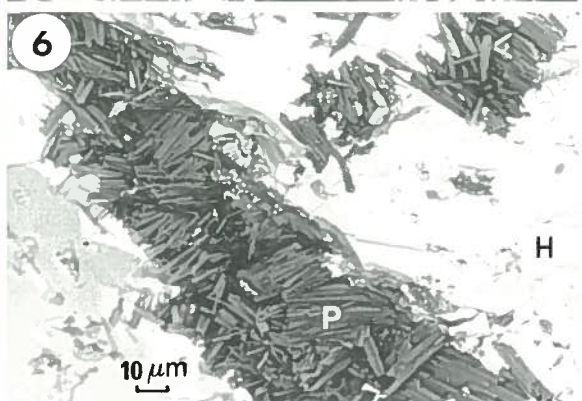
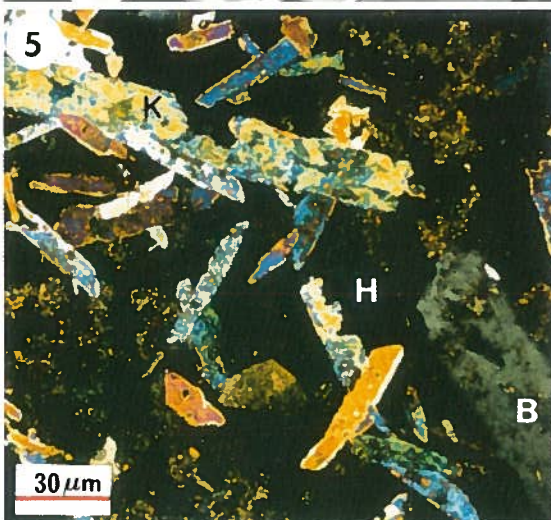
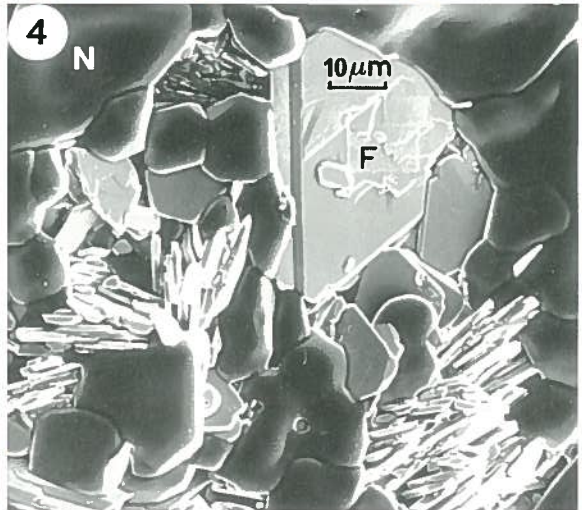
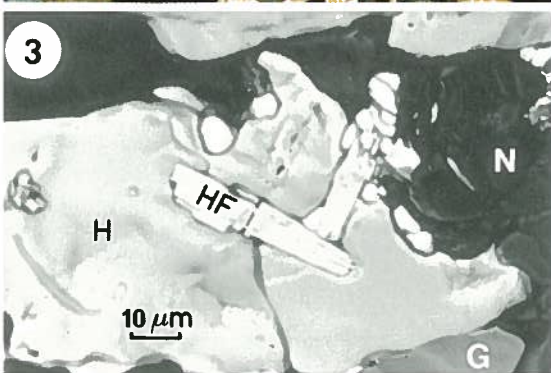
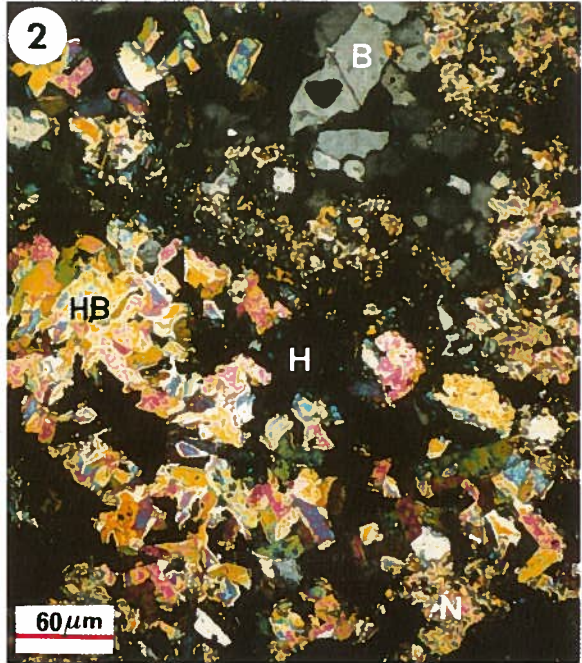
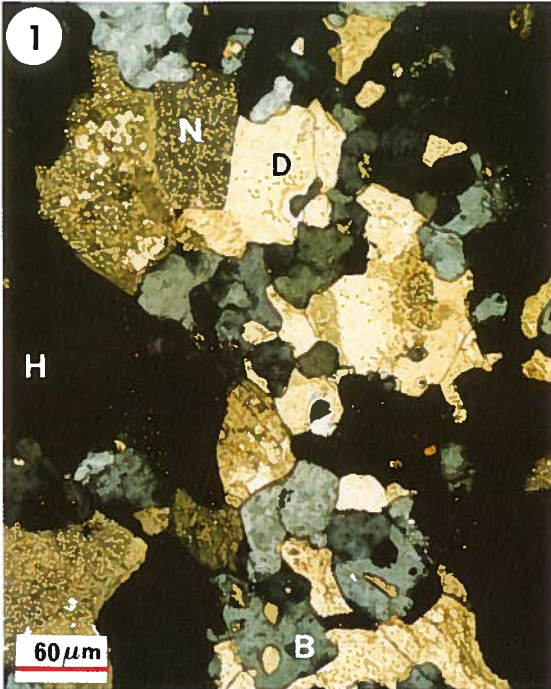
REFERENCIAS

- Araya, H.; Toro, J.C. 1983. Geología de los yacimientos de Pedro de Valdivia y María Elena. II Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), *Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas*, 287 p.
- Böhlke, J.K.; Ericksen, G.E.; Revesz, K. 1997. Stable isotope evidence for an atmosphere origin of desert nitrate deposits in northern Chile and southern California, USA. *Chemical Geology*, No. 136, p. 135-152.
- Cabrera, L.; Chong, G.; Jensen, A.; Pueyo, J.J.; Sáez, A.; Wilke, H. 1995. Cenozoic and Quaternary lacustrine systems in northern Chile (Central Andes, Arc and Fore-arc zone). Recent and ancient Lacustrine Systems in Convergent Margins. GLOPALS-IAS Meeting. *Excursion Book*, 77 p.
- Chong, G. 1991. Geología de los yacimientos de nitratos de Chile. Antecedentes para establecer una teoría sobre su génesis. In *Génesis de formaciones evaporíticas: modelos andinos e ibéricos* (Pueyo, J.J.; editor). *Publicaciones de la Universidad de Barcelona*, p. 377-415.
- Chong, G. 1994. The nitrate deposits of Chile. In *Tectonics of the Southern central Andes. Structure and evolution of an active continental margin* (Reutter, K.J.; Scheuber, E.; Wigger, P.J.; editors). *Springer*, p. 303-316.
- Chong, G.; Pueyo, J.J. 1991. Datos isotópicos de los carbonatos asociados a los yacimientos de nitrato de Chile. In *Congreso de Geoquímica de España*, No. 4. *Libro de comunicaciones*, Vol. 1, p. 403-412.
- Chong, G.; Pueyo, J.J. 1992. Mineralización y tipos de yacimientos de nitratos y yodo. Norte de Chile. In *Congreso Latinoamericano de Geología*, No. 8, Actas, Vol. 4. *Petrología y Geoquímica*, p. 173-178.
- Ericksen, G.E. 1981. Geology and origin of the Chilean nitrate deposits. *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, No. 1188, 37 p.
- Ericksen, G.E. 1983. The Chilean nitrate deposits. *American Scientist*, Vol. 71, p. 366-374.
- Ericksen, G.E. 1994. Reply:discussion of a petrographic study of the Chilean nitrates. *Geological Magazine*, Vol. 131, No. 6, p. 849-852.
- Jensen, A. 1992. Las cuencas aluvio-lacustres oligoceno-neógenas de la región de ante-arco de Chile-Septentrional, entre los paralelos 19 y 23 Sur. Tesis de Doctorado (Inédito), *Universitat de Barcelona, Facultat de Geologia*, 217 p.
- May, G. 1997. Oligocene to recent evolution of the Calama basin, northern Chile. Ph.D. Thesis (Unpublished), *University of Aberdeen*, 268 p. U.K.
- Searl, A.; Rankin, S. 1993. A preliminary petrographic study of the Chilean nitrates. *Geological Magazine*, Vol. 130, No. 3, p. 319-333.
- Spiro, B.; Chong, G. 1996. Origin of sulfate in the Salar de Atacama and the Cordillera de la Sal. Initial results of an isotopic study. In *International Symposium, No. 3, on Andean Geodynamics (ISAG)*, p. 703-707. Saint Malo.
- Vega, M.; Taberner, C.; Pueyo, J.J.; Chong, G. 1996. Travertine and fracture-filling calcites related to nitrate deposits from northern Chile. Complementary information from CL and UV petrography. In *International Conference of Cathodoluminescence and related techniques in Geosciences and Geomaterials. Abstracts Book*, p. 16. Nancy.

LAMINA 1**Figuras 1-6**

- 1 Detalle de la asociación bloedita (B); darapskita (D); nitratina (N); halita (H). Los cristales de nitratina contienen inclusiones sólidas de nitrógeno. Nícoles cruzados.
- 2 Detalle de la asociación bloedita (B), humberstonita (HB), nitratina (N), halita (H). Nícoles cruzados.
- 3 Asociación glauberita (G), halita (H), nitratina (N), hectorfloresita (HF). Imagen de SEM utilizando electrones retrodispersados.
- 4 Fuenzalidaita (F) sobre nitratina (N). Imagen de SEM utilizando electrones secundarios.
- 5 Asociación bloedita (B), halita (H), kaliborita (K). Nícoles cruzados.
- 6 Probertita (P) rellenando una fisura en halita (H). Forman parte de una asociación glauberita, halita, nitratina, probertita. Imagen de SEM utilizando electrones retrodispersados.

LAMINA 1



LAMINA 2**Figuras 7-12**

- 7 Brecha de material volcánico alterado. La roca (R) ha sufrido fracturación, ha precipitado una primera generación de sales que envuelve los fragmentos y, a continuación, se han abierto las fracturas permitiendo la entrada en ellas *per descensum* de matriz terrígena (M). Las sales han terminado de cementar el conjunto.
- 8 Fisura rellena de halita (H) entre una ceolita (C) y calcita (CA). Imagen de SEM utilizando electrones retrodispersados.
- 9 Fisura rellena de anhidrita (A) de grano fino entre dos cristales de ceolita. Imagen de SEM utilizando electrones retrodispersados.
- 10-11 Detalle del relleno final de la porosidad. Geoda de halita (H) - nitratina (N) en un encajante de sulfatos (S). Imágenes de SEM utilizando electrones secundarios y retrodispersados, respectivamente.
- 12 A la derecha fragmento de roca volcánica alterada (R). A la izquierda de la roca, el relleno de una fisura. La primera generación mineral que precipita corresponde en este caso a glauberita (G). A continuación precipita halita (H) y, hacia el centro de la fisura, darapskita (D). Nícoles cruzados.

LAMINA 2

