



## CALDERAS TIPO COLAPSO-RESURGENTES DEL TERCIARIO INFERIOR EN LA PRE-CORDILLERA DE LA REGION DE ATACAMA: EMPLAZAMIENTO DE COMPLEJOS VOLCANO-PLUTONICOS EN LAS CUENCAS VOLCANO-TECTONICAS EXTENSIONALES HORNITOS E INDI MUERTO

Rivera, O.M.<sup>1</sup>, Falcón, M.F.<sup>1</sup>

### INTRODUCCION

El conocimiento geológico regional de las secuencias Terciarias del Norte de Chile se ha basado principalmente en una concepción formacional clásica de los eventos volcánicos, ampliamente superada por las nuevas tendencias de la vulcanología moderna. En efecto, la identificación de centros y aparatos volcánicos, en base a asociaciones de facies y a su relación con estructuras regionales y locales, permite entender dichas secuencias como el resultado de la evolución de estructuras volcánicas (estratovolcanes, calderas, campos de domos) dentro de **Cuencas Volcano-Tectónicas**.

Durante los últimos años se han realizado importantes avances en el conocimiento de las unidades Cretácico Superior-Terciario Inferior del Norte de Chile, los cuales han permitido demostrar que este período estuvo caracterizado por la formación de grandes **complejos volcano-plutónicos emplazados a través de eventos de colapso-resurgencia de calderas en ambiente tectónico extensional** (1,2,3,4,5,6,7). Diversos estudios proponen este tipo de eventos como uno de los principales mecanismos de emplazamiento de complejos ígneos (8,9,10,11).

Los levantamientos geológico-regionales, desarrollados por el equipo de profesionales del SERNAGEOMIN y por el autor de este trabajo, han permitido identificar campos de calderas y calderas anidadas *Paleoceno-Eocenas* asociadas a las últimas etapas del ciclo evolutivo de cuencas volcano-tectónicas extensionales *Cretácico Superior-Paleocenas*, desarrolladas en los sectores pre-cordilleranos de El Salvador, Copiapó y Vallenar. Dichos estudios han permitido redefinir la nomenclatura formacional utilizada amplia e indiscriminadamente en la zona: las formaciones Cerrillos, Hornitos, Augusta Victoria y Chile-Alemania, reinterpretadas como las unidades de relleno de las *Cuencas Hornitos e Indio Muerto*.

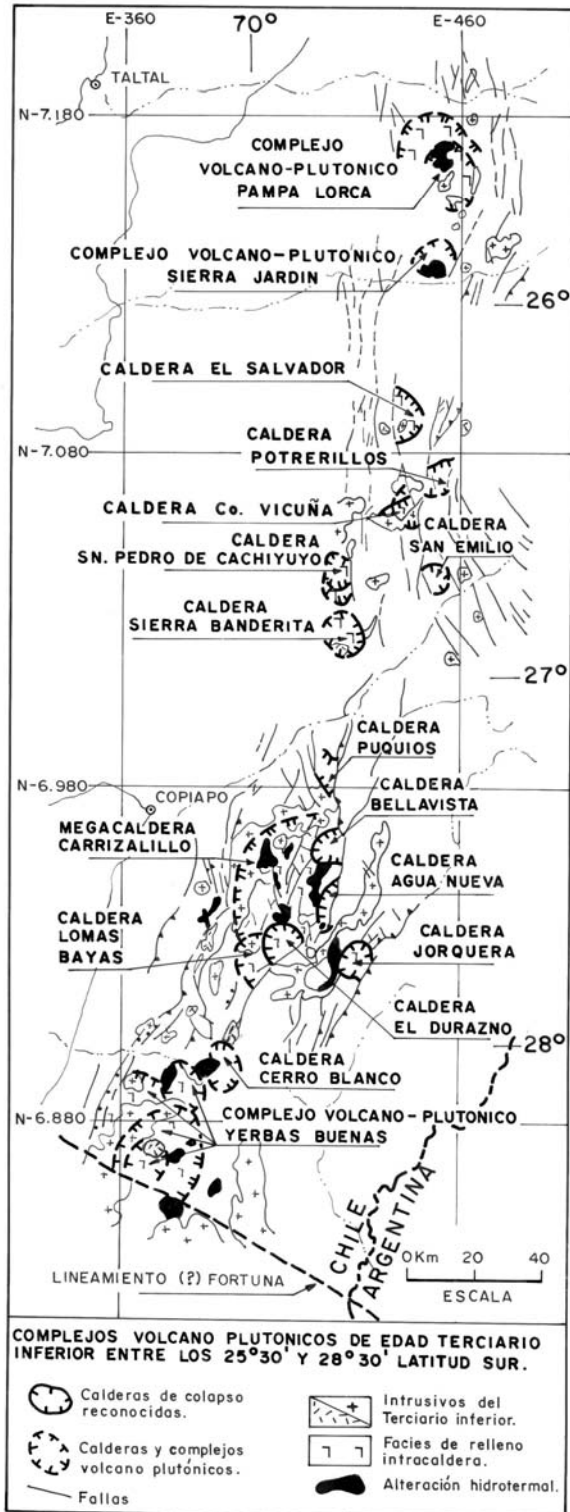
El propósito de esta contribución es exponer las principales asociaciones de facies y relaciones geométricas de los complejos volcano-plutónicos emplazados como eventos de colapso-resurgencia de calderas y mostrar la similitud entre el ciclo evolutivo de la *Cuenca Hornitos* con aquel reconocido para la *Cuenca Indio Muerto*.

### DESCRIPCION DE CALDERAS TIPO COLAPSO-RESURGENTES DEL TERCIARIO INFERIOR

En el sector pre-cordillerano de la Región de Atacama, entre los 25°30' y 28°30' LS, se reconoce un conjunto de unidades volcánicas e intrusivas de edad Terciario Inferior con relaciones de contacto y asociaciones de facies tales que permiten interpretarlas como complejos volcano-plutónicos emplazados durante el ciclo evolutivo de grandes calderas de colapso. Los estudios realizados durante la última década, han permitido la identificación de 14 calderas, además de otras 6 probables con asociaciones típicas de este tipo de estructuras volcánicas, que constituyen una franja elongada en dirección NS a NNE de más de 350 kilómetros de largo y ancho variable entre 30 y 60 kilómetros, controladas por estructuras subanulares de carácter local y por extensas fallas longitudinales de carácter regional que definen los márgenes estructurales de las cuencas volcano-tectónicas señaladas (**Fig. 1**).

Los **Complejos Volcano-Plutónicos Sierra del Jardín y Pampa Lorca** fueron definidos como tales por el primer autor de este trabajo, en el marco de los estudios regionales desarrollados para el Proyecto Sierra Exploradora (12,13) en la pre-cordillera al este de Taltal entre las quebradas El Carrizo y Chaco. La estrecha relación espacial entre facies típicas del relleno intracaldera y franjas de intrusivos siguiendo patrones subanulares permiten interpretar las unidades reconocidas en la zona como *complejos volcano-plutónicos* posiblemente ligados a la actividad de sendas *calderas de colapso*. En efecto, en el sector de **Sierra del Jardín** se reconocen potentes depósitos de tobas pumíceas soldadas, mesobrechas de colapso, niveles sedimentarios, domos ácidos y lavas intermedia-básicas restringidas al margen interno de una estructura

<sup>1</sup> Consultorías y Estudios Geológicos CEG Ltda. Volcán San Francisco 3851. Peñalolén. Santiago. Chile. cegltada@entelchile.net



subanular de colapso de aproximadamente 10 kilómetros de diámetro, evidenciada por la presencia de un anillo de diques de dacita. A lo largo de todo el margen de la estructura se reconocen abundantes cuerpos subvolcánicos de pórfidos andesítico-dioríticos definiendo un complejo intrusivo subanular. En el sector de **Pampa Lorca** se reconoce una potente secuencia de lavas andesíticas relleno una topografía deprimida de forma subanular y aproximadamente 21 kilómetros de diámetro, a lo largo de cuyo margen intruye un complejo de pórfidos de variada composición. Las edades radiométricas obtenidas indican que dichos complejos se emplazaron durante el *Eoceno Medio* sobre un basamento volcano-sedimentario plegado del *Paleoceno*.

La **Caldera El Salvador** (6,14,15,16,17) corresponde a una estructura hemielíptica de colapso, de más de 16 kilómetros de largo en sentido NS, formada dentro de la *Cuenca Volcano-Tectónica Extensional Indio Muerto* (16) sobre las unidades que constituyen el relleno volcánico y volcano-sedimentario de la misma. El ciclo de caldera comenzó alrededor de los 65 Ma y se extendió, junto con las calderas Cerro Vicuña y Potrerillos, hasta los 56 Ma. Sus principales afloramientos se reconocen al sur del Cerro Indio Muerto, donde constituyen un depósito de más de 1.500 metros de potencia de relleno intracaldera formado durante cada uno de los tres eventos de colapso identificados en la zona. El principal rasgo estructural de la *Caldera El Salvador* es una fractura anular que pone en contacto facies de relleno intracaldera con lavas del basamento asignado a la Formación Sierra Fraga. Dicha estructura culmina contra la Falla Kilómetro 14 lo cual parece indicar que el colapso se habría verificado a través de un sistema estructural combinado de fallas extensionales-fractura anular (16).

La **Caldera Potrerillos** (18,19,20) corresponde a una potente secuencia de tobas riolíticas de flujo de cenizas y lavas riolíticas y andesítico-basálticas, con intercalaciones menores de areniscas y conglomerados, las cuales se habrían acumulado dentro de una depresión limitada por trenes anulares de fallas y estructuras regionales, describiendo una estructura de aproximadamente 10 kilómetros de longitud. La unidad de mayor extensión areal de la zona corresponde a un campo de riolitas cuyas características texturales y estructurales indican que representan facies endógenas y exógenas de un complejo de domos riolíticos denominado *Domo Potrerillos*, el cual intruye y cubre la secuencia de relleno de intracaldera. El colapso de la estructura se habría verificado a lo largo de segmentos de fractura anular denominados *falla "p"*, en el extremo norte, y *falla*

*"o"* ó Falla Quebrada Las Vegas, en el extremo sur. A lo largo de los márgenes oriental y occidental el colapso se vio favorecido por fallas extensionales NS de características regionales. El emplazamiento de la caldera sería un evento del *Paleoceno Superior* y la resurgencia de la misma un evento del *Eoceno Inferior*.

La **Caldera Cerro Vicuña** (21) corresponde a una asociación compleja de facies volcánicas y piroclásticas, que se distribuye como afloramientos discretos separados por fallas y cuerpos intrusivos, constituyendo una secuencia de más de 2 kilómetros de espesor, la cual muestra un marcado control

estructural a través de segmentos de fractura anular y fallas normales de orientación general NNE. Tales estructuras delimitan un área de aproximadamente 9 kilómetros de ancho, en sentido NWW-SEE, y al menos 12 kilómetros de largo, en sentido NNE-SSW, dentro de la cual se habrían acumulado los potentes depósitos de flujos piroclásticos que caracterizan la secuencia, a través de, al menos, dos ciclos de colapso. Dicho evento habría tenido lugar durante el *Paleoceno Inferior*. La actividad volcánica habría cesado después de este evento de volcanismo post-colapso, y se habría reiniciado durante el *Eoceno Inferior-Medio* con un episodio de magmatismo resurgente, que dio origen al complejo intrusivo emplazado en los márgenes interno y externo de la caldera, aprovechando las estructuras de colapso y extensionales de la *Cuenca Indio Muerto*.

Las **Calderas San Pedro de Cachiyuyo, La Banderita y San Emilio** (6) corresponden a un conjunto de estructuras de colapso subanular, de diámetros variables entre 10 y 20 kilómetros, que se reconocen como afloramientos discretos en las sierras ubicadas al este de Inca de Oro. Las estructuras que controlan el colapso de estas calderas corresponden a segmentos de fractura anular y fallas longitudinales de características regionales, indicando un control estructural similar al descrito para las calderas El Salvador, Potrerillos y Cerro Vicuña. Las facies de relleno intracaldera reconocidas corresponden a tobas piroclásticas con distintos grados de soldamiento, lavas y domos de pórfido riolíticos a lo largo de los márgenes de colapso. Se estima una edad *Paleoceno Superior-Eoceno Inferior* para este evento volcánico.

La **Megacaldera Carrizalillo** (3) corresponde a una gran estructura de colapso de casi 60 kilómetros de longitud y más de 30 kilómetros de ancho. El rasgo subanular de la megacaldera está definido por un anillo intrusivo, denominado *Plutón Cabeza de Vaca*, de 52 kilómetros de longitud y 1-7 kilómetros de ancho, que aflora a lo largo del margen oriental y septentrional de la estructura volcánica. Al interior del anillo se preservan más de 3.000 metros de lavas, flujos piroclásticos y sedimentitas asociadas a las etapas de volcanismo premonitorio o pre-colapso (Lavas de Sierra La Dichosa, 5), colapso, volcanismo post-colapso, sedimentación intracaldera y colapso tardío de un complejo volcano-plutónico de caldera resurgente. La secuencia de relleno intracaldera de la megacaldera constituye el basamento pre-colapso de un sistema de calderas anidadas de pequeño diámetro entre las cuales se reconocen, de sur a norte, la **Caldera Lomas Bayas** (1,2,3), la **Caldera El Durazno** (1,2,3), la **Caldera Agua Nueva** (3), la **Caldera Bellavista** (3) y la **Caldera Cerro Puquios** (4,22), las cuales registran gran parte de un ciclo de formación de calderas documentadas tanto por la excelente preservación de las fracturas anulares, como por la presencia de brechas de colapso, tobas de intracaldera, conductos eruptivos, lavas post-colapso, depósitos lacustres e intrusiones resurgentes. De éstas, sólo la **Caldera Cerro Puquios** se ubica sobre el margen estructural externo de la megacaldera. La **Megacaldera Carrizalillo** representaría la fase inicial del ciclo de calderas del *Paleoceno-Eoceno Inferior* y la culminación de un evento de emplazamiento de cuerpos de magma de dimensiones batolíticas en régimen tectónico extensional (transtensión dextral).

Las **Calderas Jorquera** (23) y **Cerro Blanco** (24) corresponden a sendas estructuras subanulares de colapso, ubicadas respectivamente al SE y SSW de la **Megacaldera Carrizalillo**, con diámetros variables entre 8 y 9 kilómetros. Dichas estructuras encierran una asociación compleja de facies de relleno intracaldera que incluye lavas traquiandesíticas del volcanismo pre-colapso, tobas de flujo de pómez y cenizas asociadas al colapso y domos riolíticos a traquidacíticos a lo largo de la fractura anular, característicos de la etapa post-colapso. Posiblemente la **Caldera Cerro Blanco** representa una expresión marginal de un gran complejo de calderas que se ubicaría al SW de ésta, como el que se postula más abajo.

En la pre-cordillera de Vallenar, entre las quebradas Yerbas Buenas y Algarrobal, se reconoce una asociación compleja de facies volcánico-piroclásticas e intrusivas, que incluye la presencia de varios cientos de metros de flujos ignimbríticos, lavas e intercalaciones volcánoclasticas y volcano-sedimentarias, intruidas por stocks granodiorítico-dioríticos que determinan el desarrollo de extensas zonas de alteración hidrotermal (25). Las asociaciones de facies, sus relaciones estructurales y temporales, y la distribución de los depósitos definiendo una marcada morfología de características subanulares, permiten sugerir que este sector podría representar un nuevo campo de calderas anidadas, ubicadas al SW de la **Megacaldera Carrizalillo**. Dicho campo estaría compuesto por al menos 4 estructuras de colapso denominadas en conjunto **Complejo Volcano-Plutónico Yerbas Buenas**. Las unidades que formarían el supuesto complejo aparecen disectadas a lo largo de su extremo meridional por una extensa zona de fallas de características regionales de rumbo **N65°W**. Levantamientos geológicos realizados por el autor en la Alta Cordillera de Vallenar permiten confirmar la existencia de estructuras de esta orientación (Lineamiento Fortuna), cuya prolongación hacia el occidente coincide con la culminación del complejo volcano-plutónico propuesto.

## COLAPSO-RESURGENCIA DE CALDERAS DENTRO DE LAS CUENCAS HORNITOS E INDIO MUERTO

Los avances geológicos en la Precordillera de Copiapó han permitido establecer que las formaciones Hornitos y Cerro La Peineta representan los productos asociados a la evolución de una extensa depresión estructural denominada **Cuenca Volcano-Tectónica Extensional Hornitos**, dentro de la cual se constituyó un campo volcánico formado por calderas de colapso, estratovolcanes y domos riolíticos, cuyos depósitos se interdigitaron y cubrieron las extensas secuencias sedimentarias de relleno de la cuenca pre-caldera. Conclusiones similares se han logrado establecer en el sector de El Salvador donde la formación de sistemas de calderas representan una etapa más en la evolución de la **Cuenca Volcano Tectónica Extensional Indio Muerto** (14,16,20,21).

La **CUENCA INDIO MUERTO** corresponde a una depresión volcano-tectónica formada durante el último de los tres ciclos extensionales reconocidos en el área de El Salvador-Potrerrillos, después del evento de deformación compresiva que cierra e invierte las cuencas marginales del Cretácico Medio-Superior alrededor de los 80 Ma (6,7). El ciclo de actividad de la **Cuenca Volcano-Tectónica Extensional Indio Muerto** se habría iniciado durante el Cretácico Superior-Paleoceno con la formación de un campo de estratovolcanes, cuyo emplazamiento habría estado controlado por estructuras extensionales de orientación general nort-sur. Los productos de este volcanismo premonitorio se habrían acumulado dentro de la cuenca subsidente, constituyendo potentes secuencias volcánicas denominadas Kilómetro 14 (14) y Topón Azul (21). Dicha actividad habría tenido lugar entre los 65 y 58 Ma sobre la base de edades radiométricas obtenidas en lavas y domos riolíticos formados durante la etapa tardía de la evolución de estratovolcanes compuestos. La evolución de la **Cuenca Indio Muerto** continuó entre los 64-60 Ma con la formación de un sistema de calderas de pequeño diámetro cuyo colapso se verificó a lo largo de segmentos de fractura anular limitados por estructuras longitudinales, lo cual sugiere que el sistema de fallas extensionales de la **Cuenca Indio Muerto** también habría actuado como margen de colapso de caldera. La actividad magmático-resurgente habría comenzado después del último evento de colapso de la Caldera El Salvador con la intrusión del Domo Indio Muerto y pequeños stocks de monzonitas-monzodioritas que se ubican en las proximidades del margen meridional de la misma y a lo largo de los márgenes de las calderas Cerro Vicuña y Potrerillos. La expresión más notable de la relación intrusión-estructuras extensionales se reconoce en el margen occidental de la **Cuenca Indio Muerto** donde afloran cientos de diques de pórfido riolítico cuarífero que intruyen a unidades del basamento Cretácico Superior y constituyen un enjambre de diques ácidos orientados paralelamente al margen de la misma.

## DISCUSION

Existe una estrecha relación temporal entre los distintos eventos geológicos que se verificaron en la evolución de las **CUENCAS HORNITOS-INDIO MUERTO**. En efecto, ambas estructuras volcano-tectónicas se desarrollaron sobre un basamento volcánico Cretácico Superior (formaciones Cerrillos y Llanta) de manera prácticamente sincrónica, aunque la apertura de la Cuenca Hornitos (72 Ma) comenzó aproximadamente 7 Ma antes que la Cuenca Indio Muerto (65 Ma). La secuencia de relleno de la Cuenca Hornitos muestra un registro más completo que su equivalente septentrional, principalmente por el distinto grado de exposición de su relleno. Los patrones litológicos y geoquímicos de las Lavas de Sierra La Dichosa y del Estratovolcán Cachiyuyo (Cuenca Hornitos) son similares a los observados en las secuencias volcánicas de Kilómetro 14, Topón Azul y Los Amarillos (Cuenca Indio Muerto). Los equivalentes sedimentarios de la Cuenca Hornitos (Estratos de Quebrada La Higuera, 24) no se reconocen en el distrito Indio Muerto, aunque al norte de éste, en el sector de Pampa del Carrizo, afloran depósitos volcano-sedimentarios plegados con edades cercanas al límite Cretácico Superior-Paleoceno. El inicio del ciclo de calderas en ambos sectores fue casi simultáneo (64-65 Ma), aunque en la Cuenca Indio Muerto éste coincidió con la apertura de la misma, mientras que en el sector de Copiapó la Cuenca Hornitos estuvo activa aproximadamente 8 Ma antes del colapso principal de la Megacaldera Carrizalillo, lo cual indicaría que las tasas de extensión habrían sido considerablemente más altas en la región de Copiapó dificultando la formación de cámaras magmáticas que subsecuentemente colapsaron como calderas. El magmatismo syn-cuenca/caldera también muestra una extraordinaria coincidencia temporal. En ambas regiones comienza una vez que se ha verificado el colapso principal de las calderas y culmina con el cese de actividad de las mismas. Las diferencias radican en que mientras en la Cuenca Indio Muerto dicha actividad está representada por pequeños stocks emplazados a lo largo de estructuras extensionales o de colapso, en la Cuenca Hornitos está representada por la intrusión de un cuerpo de dimensiones batolíticas que define un anillo intrusivo a lo largo del margen estructural de colapso de la Megacaldera Carrizalillo.

## AGRADECIMIENTOS

A la Gerencia de Exploraciones de CODELCO-Chile, y en particular a los Sres. Francisco Camus y Jorge Skármeta por el apoyo y financiamiento brindado para la realización de este estudio y por autorizar su publicación.

## REFERENCIAS

1. Rivera, O. y Mpodozis, C. 1991. Volcanismo explosivo del Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó, Región de Atacama, Chile: Las calderas Lomas Bayas y El Durazno. 6° Congreso Geológico Chileno, Actas, p. 213-216, Viña del Mar.
2. Rivera, O. 1992. El complejo volcano-plutónico Paleoceno-Eoceno del Cerro Durazno Alto: las calderas El Durazno y Lomas Bayas, región de Atacama, Chile. Tesis. Depto. de Geología Universidad de Chile, 242 p.
3. Rivera, O. y Mpodozis, C. 1994. La Megacaldera Carrizalillo y sus Calderas Anidadas: Volcanismo Sinextensional Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas Vol. I, p. 149-153.
4. Arévalo, C.; Rivera, O.; Iriarte, S. y Mpodozis, C. 1994. Cuencas extensionales y campos de calderas del Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó (27°-28°S), Chile. 7° Congreso Geológico Chileno, Vol. II, p.1288-1292.
5. Arévalo, C. 1994. La Cuenca Hornitos: un hemigraben extensional del Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó, Chile. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas Vol. I, p. 397-401.
6. Cornejo, P., Mpodozis, C., Ramírez, C. y Tomlinson, A. 1993. Estudio Geológico de la Región El Salvador y Potrerillos. Servicio Nacional de Geología y Minería- CODELCO. Informe Registrado IR-93-01, 258 p.
7. Cornejo, P., Mpodozis, C., Kay, S. y Tomlinson, A. 1994. Volcanismo bimodal en régimen extensional del Cretácico Superior-Eoceno, El Salvador, Chile. 7° Congr. Geol. Chileno, Actas Vol. II, p. 1306-1310.
8. Lipman, P. 1984. The roots of ash flows calderas in Western North America: windows into the toops of granitic batholiths. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, N° B10, p. 8801-8841.
9. Lipman, P. 1988. Evolution of silicic magma chambers in the upper crust: the mid-Tertiary Latir volcanic field and its cogenetic granitic batholiths, northern New Mexico, USA. *Earth Sciences*, Vol. 79, p. 265-88.
10. Lipman, P., Bogatikov, O. 1993. 2,8 Ma ash-flow caldera at Chegem River in the northern Caucasus Mountains, contemporaneous granites and associated ore deposits. *J. of Vol.Geoth.Res.* 57, p. 85-124.
11. Gans, P.B., Mahood, G.A., Schermer, E. 1989. Synextensional magmatism in the Basin and Range Province: A case study from the eastern Great Basin. *G.S.A., Special Paper 233*, 53 p.
12. Cornejo, P. y Mpodozis, C. 1996. Geología de la región de Sierra Exploradora (25°-26° S). Servicio Nacional de Geología y Minería- CODELCO. Informe Registrado IR-96-09, 330 p.
13. Cornejo, P. y Mpodozis, C. 1997. Eventos volcánicos discretos en el Paleógeno del Norte de Chile: El caso de la Formación Chile-Alemania, Sierra Exploradora. VIII Congr. Geol. Chileno, Actas, Vol 1, p. 31-35.
14. Rivera, O. 1995. Proyecto Estudio Geológico Sector Kilómetro 14, Escala 1:25.000. Superintendencia de Geología, División Salvador. CODELCO Chile / CEG Ltda. Informe inédito, 50 p.
15. Cornejo, P., Tomlinson, A., Mpodozis, C. y Tosdal, R. 1997. Evolución magmático-estructural y geocronología K-Ar y U-Pb del distrito Indio Muerto y Yacimiento El Salvador (III Región, Chile). VIII Congreso Geológico Chileno, Actas, Vol. II, p. 911-915.
16. Rivera, O. 1997. Proyecto Estudio Geológico Distrital del Cerro Indio Muerto, Sector Oriental de El Salvador, Escala 1:10.000. CODELCO Chile / CEG Ltda. Informe inédito, 117 p.
17. Cornejo, P., Tosdal, R., Mpodozis, C., Tomlinson, A., Rivera, O. y Fanning, M. 1997. El Salvador, Chile Porphyry Copper Deposit Revisited: Geologic and Geochronologic Framework. *International Geology Review*, Vol. 39, p. 22-54
18. Olson, S. F. 1983. Geology of the Potrerillos District, Atacama, Chile. Unpublished Ph. D. Thesis. Stanford University, 190 p. Stanford, California.
19. Olson, S.F. 1989. The stratigraphic and structural setting of the Potrerillos porphyry copper district, Northern Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 16, N 1, p. 3-30.
20. Rivera, O. 1996. Proyecto Estudio Geológico Distrital del Proyecto Las Vegas, Escala 1:10.000. Gerencia de Exploraciones. Codelco Chile / CEG Ltda. Informe inédito, 32 p.
21. Rivera, O. 1996. Proyecto Estudio Geológico Distrital del Cerro Vicuña, Sector Sur-Este de El Salvador, Escala 1:25.000. Gerencia de Exploraciones. CODELCO Chile / CEG Ltda. Informe inédito, 79 p.
22. Mpodozis, C. y Allmendinger, R. 1992. Extensión Cretácica en el Norte de Chile (Puquios-Sierra Fraga, 27 S): significado para la evolución tectónica de los Andes. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 19, N 2, p. 1-31.
23. Iriarte, S. 1994. La Caldera Jorquera: Una estructura de colapso del volcanismo explosivo del Paleoceno-Eoceno Inferior en la Precordillera de Copiapó. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas Volúmen I, p. 67-70.
24. Arévalo, C. 1994. Mapa Geológico de la Hoja Los Loros. Documentos de Trabajo N°6. SERNAGEOMIN. Chile.
25. Abad, E. 1980. Cuadrángulos Estación Algarrobal, Yerbas Buenas, Cerro Blanco, Merceditas y Tres Morros, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile N°38, Escala 1:100.000. Instituto de Investigaciones Geológicas.