



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



**"GRADO DE MINERALIZACION HIDROTERMAL DE
SEDIMENTOS MARINOS DEL PLIOCENO EN ARROYO
EL MONO , RANCHO SANTA ROSALIÍTA, B.C.S."**



TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
OCEANOLOGO
PRESENTA
XOCHITL ITZEL HERNÁNDEZ MORLÁN

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, DICIEMBRE DE 1999

RESUMEN

En Arroyo El Mono se presentan secuencias de lechos rojos, y lechos grises asociados a un antiguo ambiente evaporítico, y a la provincia extensional del Golfo de California. Estos sedimentos de origen aluvial-costero presentan una mineralización hasta pedernal, el cual se encuentra reemplazando a las calizas y evaporitas originales. De acuerdo a los modelos teóricos el depósito es del tipo estratiforme, al igual que en El Boleo, Santa Rosalía, B.C.S; sin embargo en El Mono no ha ocurrido la depositación de metales como en El Boleo. Por medio de estudios petrográficos y de difracción de rayos X, se cualificó el grado de mineralización por efectos hidrotermales en los sedimentos del Mono y se compararon con datos y estudios de sedimentos equivalentes en El Boleo. Los resultados muestran que en El Mono los lechos rojos contienen arcillas minerales del grupo de la esmectita, illita, illita/esmectita y gran abundancia de minerales lábiles poco alterados (plagioclasas, feldespatos, hornblenda, biotita, y augita). En tanto que los lechos grises se componen de abundantes calizas recristalizadas (con y sin fósiles) y tobas devitrificadas. Por otro lado, aunque El Boleo presenta el mismo tipo de material sedimentario, en su caso, los lechos rojos presentan una gran alteración de los minerales lábiles y la dolomitización y precipitación de metales (Cu, Co, Zn, Mn y Fe) en los lechos grises. Se concluye que la mineralización en Arroyo El Mono se encuentra en un grado incipiente que corresponde a sedimentos jóvenes y superficiales, y que no se han depositado metales probablemente por una disminución en la intensidad del gradiente geotérmico de la zona, y a que los volúmenes de evaporitas no fueron suficientes.

**“GRADO DE MINERALIZACIÓN HIDROTERMAL DE SEDIMENTOS
MARINOS DEL PLIOCENO EN ARROYO EL MONO, RANCHO SANTA
ROSALÍTA, B.C.S.”**

**TESIS
QUE PRESENTA:
XOCHITL ITZEL HERNÁNDEZ MORLÁN**

Aprobada por:


M.C. Jorge Ledesma Vázquez
Presidente del Jurado


M.C. Luis Cupul Magaña
Sinodal Propietario


Oc. Gabriel Rendón Márquez
Sinodal Propietario

Dedicado a mi familia:
Leonardo, Mari, Connie, Cali y Leví

Y mis abuelitos:
Teofi, Bardo, Inda (†) y Emer.

**Por darme su amor, ejemplo y apoyo siempre.
Gracias!**

AGRADECIMIENTOS

A la UABC y su Facultad de Ciencias Marinas, por brindar la oportunidad y el espacio para mi desarrollo académico.

Al M.C. Jorge Ledesma Vázquez, por despertar mi interés en la geología y en la Baja, por permitirme trabajar con él y apoyarme.

Al Oc. Gabriel Rendón Márquez, por enseñar con corazón, por su asesoría, su amistad y paciencia.

A M.C. Luis Cupul Magaña por su asesoría como sinodal.

Al Ing. Francisco Escandón Valle y Minera Curator, S.A, por las facilidades prestadas para recorrer el Distrito minero del Boleo, y por la información otorgada.

Al Centro de Investigaciones Científicas y de Estudios Superiores de Ensenada y al Centro de Ciencias de la Materia Condensada de la UNAM, por las facilidades prestadas para desarrollar este trabajo.

Al M.C. Oscar González Yajimovich, por su apoyo económico para la impresión de esta tesis.

A mis amigos y compañeros de la Generación Espontánea, quienes ya son parte de esta etapa de mi vida.

A las siempre divas: Claudia, Vera, Verónica, e Iliana.

A mis maestros, por su esfuerzo y la convivencia.

A Gabriel, Susy Rosas, Víctor y Ma. Helena por su amistad y ayuda el tiempo que los visite en el CICESE.

A la M.C. Eloisa Aparicio, por su ayuda con los análisis de DRX, por su paciencia, las agradables charlas y los consejos.

A Yan, Oscar, Tona y Sergio L., por su ayuda en algunas partes de este trabajo.

A los personajes que me han ayudado, entretenido y enriquecido: Mariana, Lydia, Meiners, Guacho, Citali, Chelo, Chino, Katia y Karenina, Rafael H. W., Cathy Harris, Memo Avila, Graciela Krauss, Santiago, Susy Sánchez y Maya, Ana Luz, Dora, Pancho Ley Lou, Manuel Moreno, Armando R. Pinal, Gisela H; mil disculpas a no presentes.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	8
OBJETIVOS	10
ÁREA DE ESTUDIO	
a) Arroyo El Mono, cuenca Rancho Santa Rosalíta, B.C.S.	11
b) Distrito minero El Boleo, Santa Rosalía, B.C.S.	15
METODOLOGÍA	
Trabajo de campo	18
Trabajo de laboratorio	18
RESULTADOS	
Análisis petrográfico	21
Difracción de Rayos X	33
DISCUSIONES	41
CONCLUSIONES	51
SUGERENCIAS	52
LITERATURA CITADA	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.- Contenido de Cu en los minerales lábiles más comunes en areniscas de primer ciclo (tomado de Wedepohl, 1969).	4
Tabla II.- Resultados de la petrografía de muestras de Arroyo El Mono , B.C.S.	28
Tabla III.- Resultados de la petrografía del Boleo, Santa Rosalía, B.C.S.	32
Tabla IV.- Resultados del análisis de DRX, en sedimentos del Mono y El Boleo, B.C.S.	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.- A) Mapa de la península de Baja California. B) Detalle que incluye Bahía Concepción, cuenca Rancho Santa Rosalía y Santa Rosalía, B.C.S. (según Jonhson, <i>et al.</i> , eds., 1997).	7
Fig. 2.- Ubicación de las estaciones de muestreo (E) en Arroyo El Mono, Cuenca Rancho Santa Rosalía, B.C.S. También se indica El Notch, lugar donde aflora la unidad de pedernal El Mono de la Fig.3 (modificado de Jonhson y Ledesma-Vázquez, <i>et al.</i> , 1997).	13
Fig.3.- Sección estratigráfica del Miembro Pedernal El Mono. Las capas de pedernal sobreyacen a capas de fanglomerados (lechos rojos), y a la vez subyace a una capa de calizas (lechos grises). Modificado de Jonhson y Ledesma-Vázquez, <i>et al.</i> , 1997.	14
Fig.4.- Generalización de la secuencia sedimentaria en la cuenca de Santa Rosalía, B.C.S. En ella se observa la alternancia de lechos rojos (conglomerados), lechos grises (calizas y material tobaceo) y mantos mineralizados dentro de la Fm Boleo. También se observan otras formaciones asociadas (modificado de Holt, <i>et al.</i> , 1996).	16
Fig.5.- Litología de las estaciones donde se colectaron las muestras en Arroyo El Mono (tomado de Mayall, 1993).	19
Fig.6.- Difractograma de la muestra #3, $<4\phi$, El Mono. Se observa esmectita (E), vidrio y trazas de cuarzo (Qz).	34

Fig.7.- Difractograma de la muestra #8, $\lambda 4\phi$, El Mono; que corresponde a una calcita (C). Sólo se corrió en glicol .	34
Fig.8a.- Difractograma de la muestra #9, $\lambda 4\phi$, El Mono. Es visible la presencia de minerales arcillosos como esmectita (E), illita/esmect. (I/E); además de calcita (C).	35
Fig.8b.- Difractograma de la muestra #9, $\lambda 2\phi$, El Mono. Presenta minerales arcillosos y calcita (C).	35
Fig.9a.- Difractograma de la muestra #10, $\lambda 4\phi$, El Mono. Se observa la presencia de esmectita (E) e illita/esmectita (I/E); además de plagioclasas (P), trazas de cuarzo (Qz) y calcita (C).	37
Fig.9b.- Difractograma de la muestra #10, $\lambda 2\phi$, El Mono. Sólo se observan minerales arcillosos (E, I/E).	37
Fig.10.- Difractograma de la muestra #11, $\lambda 4\phi$, El Mono. Se compone de Esmectita (E) y calcita (C).	38
Fig.11a.- Difractograma de la caliza basal del Boleo, $\lambda 4\phi$. Se observa dolomita (D) como componente principal, además de calcita y trazas de caolinita (K) y cuarzo (Qz).	40
Fig.11b.- Difractograma de la caliza basal del Boleo, $\lambda 2\phi$. Compuesta de dolomita (D), y trazas de esmectita (E) y cuarzo (Qz).	40
Fig. 12.- Estratigrafía de la Fm. Boleo, en ella se observa la secuencia consecutiva de lechos rojos, lechos grises y los ocho mantos mineralizados, siendo los más importantes los Mantos 1 y 3 (Reporte técnico para Minera Curator, S.A., cortesía del Ing. Escandón-Valle, 1998).	42
Fig. 13.- Detalle de la estratigrafía de los mantos #3 y #3A de la Fm. Boleo. Se observan los rangos del contenido de Cu, Co, y Zn a diferentes niveles de la columna. Obsérvese que el %Cu es mayor en la base y menor en la cima (Reporte técnico para Minera Curator, S.A, cortesía del Ing. Escandón-Valle, 1998).	45
Fig. 14.- Representación del primer ciclo de los sedimentos es Arroyo El Mono. El cual comprende la sedimentación de lechos rojos y grises, y la presencia de fluidos salinos de origen superficial.	49
Fig. 15.- Representación del segundo evento que permitió la sustitución de calizas por pedernal. Los fluidos mineralizantes pueden haber sido: 1) Fluidos salinos de la superficie, y 2) fluidos hidrotermales del interior de la corteza.	50

INTRODUCCIÓN

La humanidad ha dependido siempre de la naturaleza y sus recursos, esta dependencia ha marcado el desarrollo de las naciones en función de su disponibilidad. Por ser preponderantes para el desarrollo de un país, los recursos minerales se estudian en cuanto a su origen y extracción, especialmente al considerar el agotamiento progresivo de los depósitos accesibles (Skinner, 1974). Al estudiar su origen se busca identificar los procesos que intervienen en su formación.

Los minerales metalíferos son recursos no renovables debido a que su tiempo de regeneración es de millones de años. Según su abundancia en la corteza terrestre se dividen en: metales abundantes (abundancia > 0.01%), y metales escasos (< 0.01%). Ejemplos de metales abundantes son el hierro, aluminio, manganeso, magnesio, cromo y titanio; y de metales escasos lo son el cobre, plomo, zinc, estaño, tungsteno, oro, plata, platino, uranio, mercurio, molibdeno, etc. Los yacimientos de metales escasos se dividen en tres: sulfuros, metales nativos, y óxidos y silicatos. Los ambientes marinos, actuales o antiguos, son sistemas con cualidades fisicoquímicas que promueven la formación de algunos yacimientos de metales escasos, el ejemplo típico es el de los nódulos polimetálicos (The Open University, 1989).

Los yacimientos de algunos metales escasos están confinados a fajas geográficas, a las que se les conoce como provincias metalogénicas (Salas, 1988). Aunque existen muchas interrogantes, parece que los yacimientos ocurren con mayor frecuencia dentro de dichas provincias que fuera de ellas, si bien la composición media de la corteza es esencialmente la misma en todas partes. Para comprender su formación, el por qué de su distribución y poder buscar otros yacimientos, se debe conocer la historia geológica de toda la provincia y determinar el o los factores formadores de menas (Skinner, 1974).

Los yacimientos de cobre y sus minerales asociados son de gran interés a nivel mundial, particularmente el estudio de los Depósitos Estratiformes de Cobre en Sedimentos (DECS), ha

cochado importancia en las últimas décadas, ya que son la mayor fuente de cobre industrial, y constituyen del 20 al 25% de la producción y reservas de cobre a nivel mundial (Kirkham, 1989). Los depósitos estratiformes se denominan así por estar confinados a niveles sedimentarios individuales, y son los segundos productores de cobre después de los depósitos porfiríticos (más del 60% de la producción mundial de Cu). A pesar de su importancia y distribución, gran parte de la producción proviene de unos pocos distritos, tales como: el cinturón africano central de cobre de Zambia y Zaire, la región del Dzhezkazgan en la Unión Soviética y el depósito de Lubin en Polonia. Los DECS son también, a nivel mundial, la fuente más importante de cobalto, y se siguen transformando en una fuente importante de plata. En algunas áreas estos depósitos han producido elementos del grupo del platino, oro, renium, plomo y uranio (Barton y Jonhson, 1996).

Cada depósito estratiforme tiene rasgos que lo diferencian del resto de su clase, es por ello que la nomenclatura utilizada para estudiarlos resulta problemática, y no hay términos generales enteramente satisfactorios para referirse a ellos. Kirkham (1989) divide los depósitos estratiformes principalmente en dos tipos:

- a) Tipo Kupferschiefer: aquellos que ocurren en rocas que se depositaron en ambientes salino-lacustres.
- b) Tipo lechos rojos: aquellos que ocurren en rocas que se depositaron en ambientes continentales.

El mismo autor establece, que ambos depósitos generalmente se caracterizan por contener sulfuros diseminados y distribuidos por zonación, los sulfuros se presentan en rocas reducidas cercanas a fronteras de oxidación - reducción. En dicha frontera la secuencia de minerales, que van de los oxidados a los reducidos, contienen: hematita, cobre nativo, calcocita, bornita, calcopitira, galena, esfalerita y pirita. Las zonas mineralizadas pueden encontrarse hacia arriba y hacia el exterior, de dicha frontera.

Según Brown (1992), los yacimientos estratiformes están ampliamente distribuidos, se asocian a mares someros antiguos y a unidades evaporíticas; la roca huésped son lechos grises marinos marginales, que han sido preparados como agentes reductores y con abundancia de sulfuros; grandes capas de lechos rojos continentales subyacen a los lechos grises. La depositación del cobre se da a partir de una solución acuosa rica en cloruros que atraviesa la redoxiclina entre los lechos rojos y los grises, sin la necesidad de actividad ígnea o metamórfica; comúnmente se asocian al basamento de un rift.

La mayoría de los DECS ocurren en sedimentos que fueron depositados entre los 20° y 30° del paleoecuador, con una gran asociación con evaporitas marinas. En algunos casos como en los Andes y Asia Central, estos depósitos se formaron en asociación con salares de gran elevación (lagos salados), más que con evaporitas marinas o cercanos al ambiente marino (Kirkham, 1989); dicho autor reconoce al Proterozóico Tardío, como una edad favorable para la ocurrencia de los DECS. No obstante, otros depósitos importantes también ocurren en diferentes edades que van desde el Proterozóico al Reciente.

Glennie (1989), afirma que los patrones de distribución y las asociaciones de roca entre lechos rojos y evaporitas, indican claramente la importancia del ambiente sedimentario del desierto, en la formación de los DECS.

En cuanto a la naturaleza de los lechos rojos, autores como Rose (1976), y Gustafson y Williams (1981), han establecido que son sedimentos de primer ciclo, ricos en minerales detríticos lábiles como: plagioclasas, hornblenda, biotita, y magnetita. Wedepohl, (1969), ha reconocido que estos minerales detríticos contienen concentraciones traza de cobre y otros minerales no ferrosos (Tabla I). Debido a su susceptibilidad a alteraciones diagenéticas y a su volumen ($\geq 25\%$ de los sedimentos originales), estos minerales son la mayor fuente de metales en los depósitos estratiformes asociados a lechos rojos (Walker, 1989).

Tabla I. Contenido de Cu en los minerales lábiles más comunes en areniscas de primer ciclo (tomado de Wedepohl, 1969).

	# muestras analizadas	Contenido prom. Cu (ppm)
Piroxeno	90	120
Biotita	660	86
Anfiboles	40	78
Magnetita	250	76
Plagioclasa	108	62
Feldespato	70	1 – 20*

*Promedio no determinado; se muestra el rango del contenido de Cu.

En su revisión sobre la naturaleza de los depósitos estratiformes, Skinner (1974), reporta dos fuentes de fluidos mineralizantes cuya naturaleza responde al por qué un sedimento sea rico en sulfuros. El autor ejemplifica con las perforaciones de Salton Sea, California en 1962, las cuales alcanzaron un depósito de salmuera caliente (300° a 350°C) con elevado contenido de metales y que depositaron 10 Ton de sulfuros con 20% de Cu y 8% de Ag. Dicha salmuera había sido formada por aguas superficiales, calentada a profundidad y al pasar por la roca encajonante la disolvía y se enriquecía con sus metales. En ese caso las salmueras, se calificaron como soluciones hidrotermales metamórficas.

El segundo ejemplo proviene del Mar Rojo en 1963, donde se descubrieron tres lugares en el fondo del mar, donde emanan salmueras ricas en metales, que se depositaron como sulfuros en los sedimentos. En este caso se trataba de soluciones hidrotermales de origen magmático. En ambos casos, se propuso que las soluciones hidrotermales pueden ser la fuente de metales para un depósito sedimentario de sulfuros y originar menas estratiformes (Skinner, 1974).

Existen ejemplos clásicos de DECS alrededor del mundo. El depósito estratiforme más famoso, por más tiempo explotado, y menos alterado por metamorfismo, se depositó durante el Pérmico, en lo que hoy ocupa Europa central. Originalmente era un lecho sedimentario de lodos ricos en materia orgánica, pero con altas concentraciones de sulfuros de Cu, Pb, Zn, en un área

de 50, 000 km² en un mar poco profundo del período Zechstein. Los lodos, actualmente lutitas denominadas Kupferschiefer, no se mineralizaron uniformemente, ya que las menas de cobre se concentran en la parte occidental de la cuenca, entre Polonia y el este de Alemania (Hutchinson, 1983).

El segundo ejemplo es una de las provincias metalogénicas más grandes del mundo, la del cinturón de cobre de Africa central, en las fronteras de Zaire y Zambia a 1300m.s.n.m. El depósito yace en sedimentos de la Fm. Roan del Proterozóico, en un complejo sistema de sinclinales. Su litología comprende restos de rocas, conglomerados, depósitos eólicos de arenas, gravas de playa, biohermas, arenas y lodos. Los sulfuros de cobre y cobalto se restringen a los sedimentos cercanos al ambiente costero. Los eventos de transgresión y regresión fueron factores importantes en su formación, así como el metamorfismo regional asociado, que ayudo al beneficio de la mena. Se plantea que los metales pudieron derivarse de la erosión del basamento; o que provinieron de centros volcánicos exhalativos distales (Brown, 1992).

El tercer ejemplo es el depósito de McArthur, Australia, que comprende dolomitas, calizas, lodolitas y tobas, todas ellas sin metamorfismo y de edad Proterozóico Medio. Se encuentra limitada por la falla de Emu de norte a sur, y los sedimentos mineralizados cubren 1.5 km² y 55 m de espesor. Los estratos mineralizados consisten de laminas finas de sulfuros de grano fino y lodolitas tobaceas; los sulfuros se depositaron antes de la consolidación de los sedimentos. Este depósito se formó en el piso marino, y las soluciones metalíferas fueron de algún modo producto de actividad ígnea. Actualmente el depósito es distal a la actividad ígnea contemporánea (Hutchinson, 1983).

En México, el Distrito minero de El Boleo en Santa Rosalía, B.C.S. (Fig. 1), es importante por su producción de cobre y cobalto, durante los años veinte fue el segundo productor de cobre más grande de México. De 1868 (fecha en que fue descubierto) a 1985, el distrito produjo 780, 000 Ton de cobre ampollado (99.3 % Cu), a partir de minerales complejos de Cu, Co, Zn, Mn, y Fe, aunque nunca se recuperaron los últimos cuatro metales (Escandón-Valle, 1995). Este Distrito minero consiste de un yacimiento del tipo estratiforme (Kirkham, 1989). En 1955, Wilson

y Rocha reportan a la Fm. Boleo como la roca almacenadora de los sulfuros de cobre en sedimentos marinos y la consideran un depósito deltaico, cuyo origen apoya la teoría de la sustitución de capas favorables por soluciones hidrotermales ascendentes a lo largo de fallas y fracturas preexistentes en el basamento (Grupo Comondú).

Con base en modelos propuestos, es viable prospectar zonas potenciales donde existan o se pudieran desarrollar DECS. Brown (1997), señala la factibilidad de lugares activos, como los de la cuenca norte del Golfo de California, para la mineralización estratiforme de cobre en los sedimentos provenientes de la desembocadura del Río Colorado.

El propósito de este trabajo es estudiar cualitativamente el grado de mineralización de los lechos rojos y grises de la secuencia sedimentaria (abanico aluvial - costero), que aflora en la parte sur de Arroyo el Mono, dentro de la cuenca Rancho Santa Rosalita, B.C.S. (Fig. 1). Por ser esta una cuenca asociada a los estadios tempranos del Golfo de California, se sugiere que este depósito se ha venido mineralizando por influencia hidrotermal, producto del adelgazamiento de la corteza y el tectonismo asociado; en un primer grado de calizas a pedernal. Sin embargo no ha existido la suficiente concentración de iones de metales para formar depósitos como los del Distrito minero El Boleo, de Santa Rosalita, B.C.S.

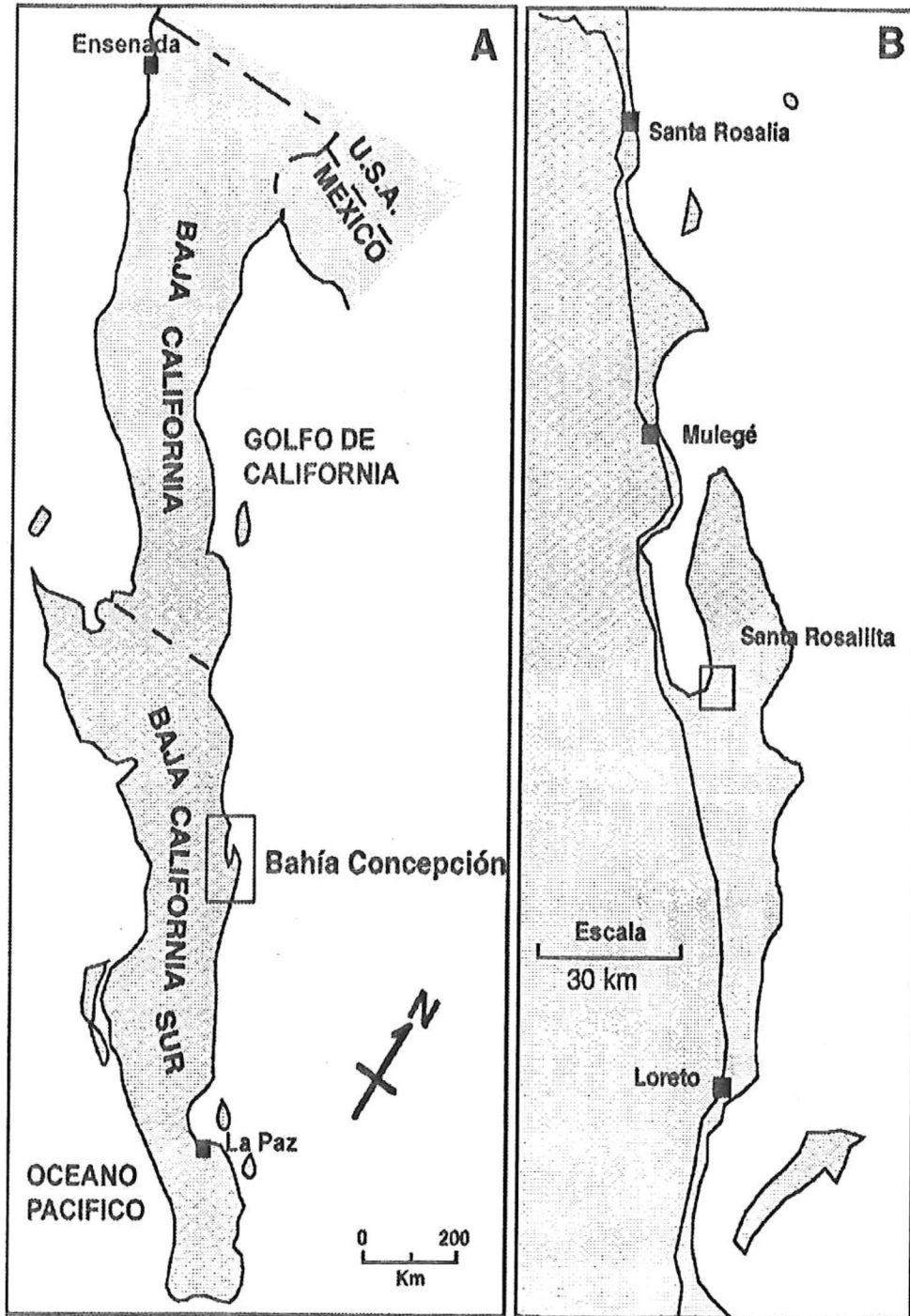


Fig. 1. A) Mapa de la península de Baja California. B) Detalle que incluye Bahía Concepción, cuenca Rancho Snta. Rosalita y Santa Rosalía, B.C.S. (según Jonhson, *et al.*, eds., 1997).

ANTECEDENTES

El primer trabajo que se tiene sobre la zona es un reconocimiento Geológico de Bahía Concepción, realizado por McFall (1968); dicho trabajo reporta una secuencia sedimentaria compuesta por areniscas, margas y coquinas, asignadas a la Formación Infierno de edad Plioceno.

Mayall (1993), describe la cuenca Rancho Santa Rosalita como una línea de costa rocosa, somera, de baja energía, dentro de una bahía. Así mismo, encuentra una inconsistencia con la litología reportada por McFall (1968), reconociendo 5 litologías: un fanglomerado rojo, una caliza masiva, capas de pedernal masivo, una brecha de pedernal, y una lodolita roja. Las secuencias sedimentarias están rodeadas por rocas volcánicas del Mioceno, del Grupo Comondú. En dicho trabajo se concluye que el embahamiento de la cuenca fue producto del tectonismo de la zona, y que el pedernal es de origen biogénico a partir de surgencias (novaculita). Así mismo reporta que los sedimentos que rellenan la cuenca, son de edad Plioceno Superior; determinada por fósiles índice de lequinoideo *Clypeaster marquerensis* y del gasteropodo *Strombus subgracillior*, presentes en las capas de calizas.

Gutiérrez-Sánchez (1994), en un estudio sobre el origen del pedernal de la cuenca de Santa Rosalita, encuentra que la pedernalización de calizas no tuvo un componente biogénico, sino que fue un proceso diagenético donde el sílice fue aportado por el material sedimentario de origen volcánico y por fluidos hidrotermales asociados al tectonismo de la zona. Posteriormente, Amaro-Franco (1996), hace estudios geoquímicos complementarios y corrobora el origen autigénico de las capas de pedernal.

Jonhson y Ledesma-Vázquez (1997), limitan la secuencia sedimentaria a tres litologías principales repetitivas: un fanglomerado rojizo, calizas fosilíferas y pedernal; todas ellas como parte de un sistema de abanico aluvial subaéreo, asociadas a un ambiente somero y evaporítico. Para la pedernalización sugieren dos fuentes de sílice. La primera es a partir de la

alteración *in situ* de los carbonatos y ceniza volcánica dentro de la Formación Infierno. La otra es a partir de soluciones hidrotermales que se enriquecieron en sílice al pasar a través de las lavas (silícicas) del Grupo Comondú. Así mismo, los autores proponen que las fallas que atraviesan la cuenca actuaron como los conductos que transportaron los fluidos hidrotermales ricos en sílice y que transformaron el vidrio volcánico y los carbonatos originales a opalo-A y cristobalita baja (β).

McFall (1968), reconoce que la zona se encuentra fallada y que la estructura principal es la falla de Bahía Concepción; este sistema de fallas se asocia a la evolución tectónica de la apertura del Protogolfo de California, así como a la formación misma de Bahía Concepción. Ledesma y Johnson (1993), sugieren que la deformación neotectónica de la zona, ha ocurrido en tres áreas a lo largo de 130 km, mas o menos desde Santa Rosalía hasta el norte de Loreto, y que el neotectonismo sigue asociado a la tectónica extensional del Golfo de California.

El proyecto de investigación: Origen de capas someras de pedernal, que aportó dos tesis de maestría (Gutiérrez-Sánchez, 1994 y Amaro-Franco, 1996), comprendió el trabajo estratigráfico de la cuenca Santa Rosalita (Arroyo el Mono) y un estudio sobre la génesis del pedernal. Retomando los anteriores, este trabajo contribuye con el estudio de los lechos rojos y grises, al caracterizar su grado de alteración actual.

OBJETIVOS

- 1) Determinar las características litológicas y el grado de mineralización de lechos rojos y grises pertenecientes a la secuencia sedimentaria de Arroyo el Mono, cuenca Rancho Sta. Rosalíta, B.C.S.
- 2) Establecer la comparación del grado de mineralización entre los sedimentos de la cuenca Rancho Santa Rosalíta y la cuenca de Santa Rosalía, B.C.S.

ÁREA DE ESTUDIO

a) Arroyo El Mono, cuenca Rancho Santa Rosalíita, B.C.S.

El área de estudio se localiza en Arroyo El Mono, dentro de la cuenca Rancho Santa Rosalíita, el cual esta situado en la parte SE de Península Concepción, Municipio de Mulegé, B.C.S. La cuenca se extiende en un área aproximada de 56 km², entre las latitudes 26° 35' - 26° 37' N y las longitudes 111° 37' - 111° 40' W (Fig. 1 y 2).

En la región predomina un clima caliente y árido con lluvias intermitentes. La humedad es baja, sólo la Península de Baja California y Sonora, poseén los lugares más áridos de México. Esta región se caracteriza por vegetación desértica. Los recursos naturales en el municipio de Mulegé, consisten principalmente de depósitos minerales y de las pesquerías del Golfo de California (Wilson y Rocha, 1955).

Descripción geológica.

Bahía Concepción es un área dominada por fallas en dirección N-S, la falla principal denominada Falla Bahía Concepción (McFall, 1968), tiene una orientación NW, paralela a la Bahía. Regionalmente se le clasifica como costa de emersión, caracterizada por la elevación de terrazas marinas presentes en el área. Tectónicamente se clasifica como una costa tipo Atlántico, ya que las líneas tectónico-estructurales son paralelas al litoral, con la presencia de islas formando cordones paralelos a la costa y ensenadas que se prolongan en la misma dirección (Zanchi, 1993), Bahía de los Angeles y Bahía Concepción son claros ejemplos de ello.

La cuenca Rancho Santa Rosalíita presenta un basamento compuesto de rocas volcánicas del Grupo Comondú del Mioceno Medio (?) a Tardío. Al basamento sobreyace una secuencia sedimentaria perteneciente a una antigua línea de costa, asignada a la Fm. Infierno del Plioceno Superior (Gutiérrez-Sánchez, 1994). Una visión generalizada de la paleotopografía de esta cuenca durante el Plioceno Superior, revelaría cuatro subcuencas interconectadas,

someras, protegidas y rellenas por los sedimentos de origen marino y aluvial (Fig. 2). El material que rellena la cuenca comprende tres litologías principales: fanglomerado, caliza y pedernal (Jonhson y Ledesma-Vásquez., *op cit.*, p7), ver Fig.3.

En 1997, Jonhson y Ledesma-Vázquez, *et al.*, reportaron cuatro unidades no conocidas y que se distinguen por el tipo de pedernal que presentan. De la más antigua a la más joven, estas unidades son: 1) Miembro Calabaza, un abanico aluvial de espesor variable (hasta más de 30 m) y dominado por conglomerados andesíticos, areniscas y lodolitas; 2) Miembro El Mono, es un pedernal estratificado de 14 m de espesor, que presenta algunos lentes de calizas; 3) Miembro Bahía Concepción, de 25 m de espesor, compuesto de una caliza superior e inferior, separadas por un aluvión con rizolitas fósiles; y 4) Miembro Cayuquitos, una capa de 2 m de pedernal. Mayall (1993), reporta la presencia de minerales pesados en las capas de pedernal (Fig. 3).

El orden estratigráfico y la extensión lateral de dicha litología indican la ocurrencia de por lo menos dos transgresiones marinas en un área de 35 Km²; la cual incluía tres penínsulas, y cuatro islas pequeñas que subdividían el embahiamiento en cuatro cuencas interconectadas con la Bahía Concepción del Plioceno.

Las evidencias de actividad hidrotermal en la zona incluyen la presencia de depósitos de manganeso como los de la mina El Gavilán, La Trinidad y Guadalupe en diferentes localidades a lo largo de la península de Bahía Concepción, y de las cuales se piensa que tienen la misma edad, y el mismo origen hidrotermal (McFall, 1968). Por otro lado, en la actualidad se considera a los manantiales de aguas calientes de la playa Santispak y El Coyote, como manifestaciones de actividad hidrotermal; así como el área SW de la península de Bahía Concepción, donde existen emisiones de vapor muy caliente (Ledesma-Vázquez 1997, comunicación personal). En este último caso, aparentemente la roca reservorio de calor se encuentra a profundidades no muy grandes; y sus dimensiones hacen pensar que podría ser buena fuente de energía geotérmica.

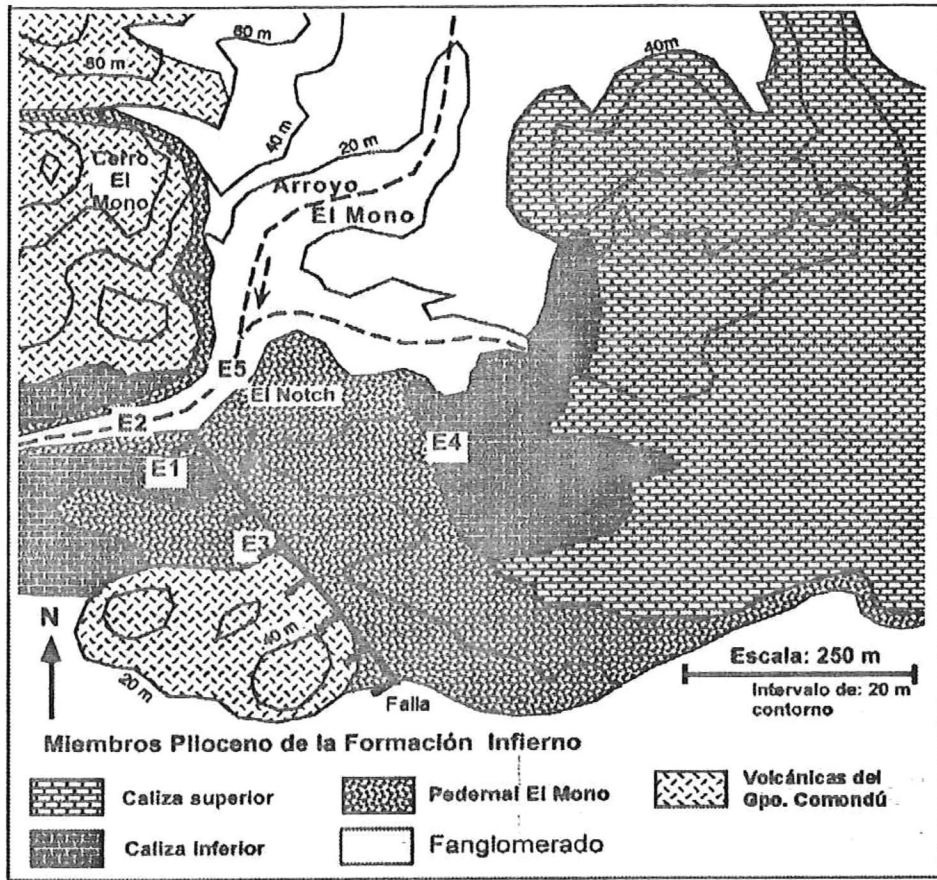


Fig. 2. Ubicación de las estaciones de muestreo (E) en Arroyo el Mono, cuenca Rancho Santa Rosalita, B.C.S. También se indica El Notch, lugar donde aflora la unidad de pedernal El Mono de la Fig. 3 (modificado de Ledesma-Vázquez, *et al.*, 1997).

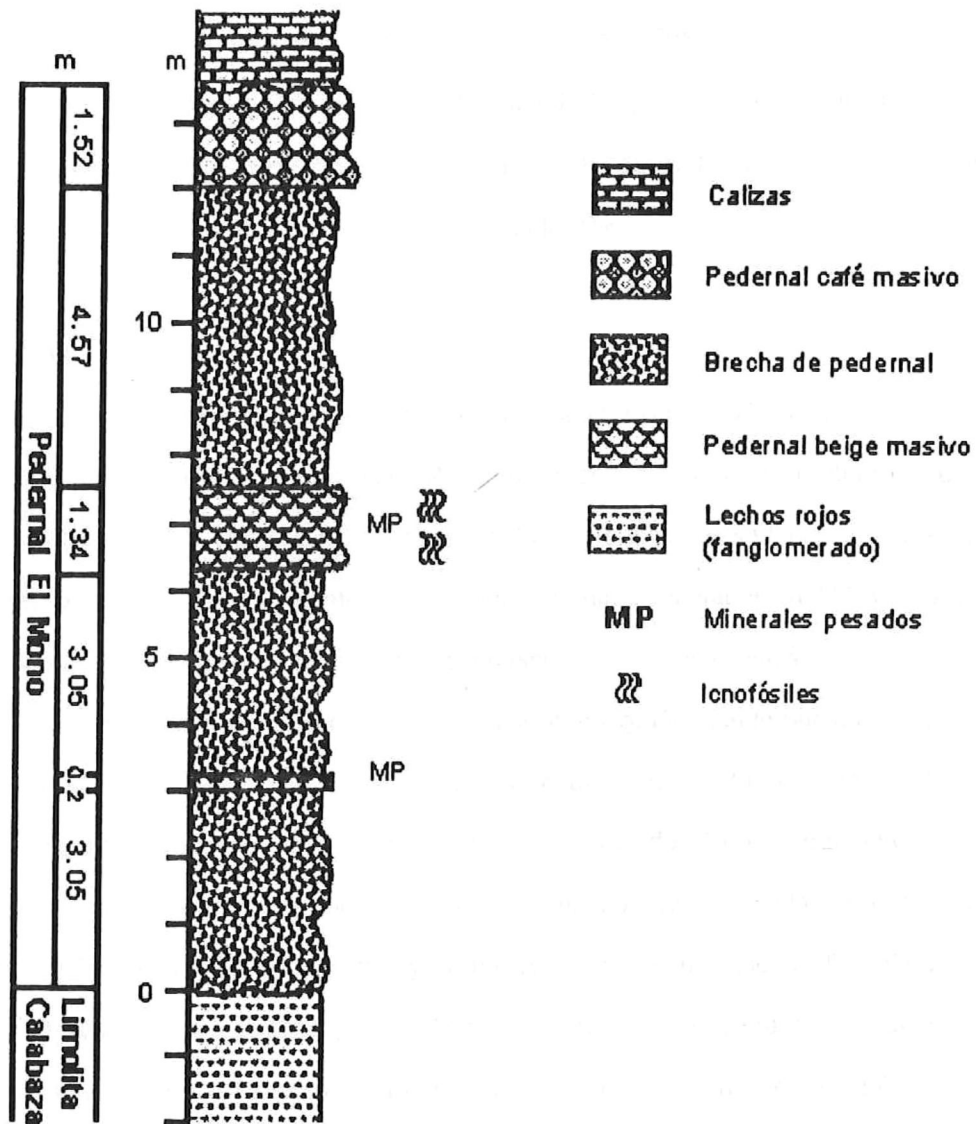


Fig. 3. Sección estratigráfica del Miembro Pedernal El Mono. Las capas de pedernal sobreyacen a capas de fanglomerados (lechos rojos), y a la vez subyace a una capa de calizas (lechos grises). Modificado de Johnson y Ledesma-Vázquez, *et al*, 1997.

b) Distrito minero El Boleo, Santa Rosalía, B.C.S.

El distrito minero del Boleo se localiza en el municipio de Mulegé, B.C.S., en los alrededores del poblado de Santa Rosalía, sobre la costa Oeste del Golfo de California. Su ubicación geográfica es entre los 27° 25' latitud N y 112° 20' longitud W (Fig. 1), aproximadamente a 110 Km al NW de la cuenca Rancho Santa Rosalita. Bahía Concepción y Santa Rosalía comparten el mismo tipo de régimen climático.

Descripción geológica.

Wilson y Rocha (1955), reportan que los depósitos polimetálicos del Boleo ocurren en una cuenca sedimentaria que se desarrolló como consecuencia de la apertura de la provincia extensional del Golfo de California. Todos los mantos mineralizados se localizan en la Formación Boleo del Mioceno Superior, dentro de cuencas marinas, limitadas al NE y SW por altos topográficos constituidos por bloques fallados y basculados de rocas volcánicas.

El distrito minero del Boleo está constituido estratigráficamente por nueve formaciones (Wilson y Rocha, 1955). El basamento es cuarzo-monzonita de edad Preterciaria, sobreyaciéndole se encuentra una capa de rocas volcánicas del Grupo Comondú del Mioceno. La secuencia continúa con tres formaciones de origen marino: Fm. Boleo, Fm. Gloria y Fm. Infierno, del Plioceno temprano, medio y tardío, respectivamente; todas ellas alternando con escasas intercalaciones terrestres (Fig. 4). Posteriormente se encuentra la Fm. Santa Rosalía, de origen marino y del Pleistoceno; a su vez sobreyacida por los derrames volcánicos de la Fm. Tres Vírgenes de edad Pleistoceno a Reciente. En la cima de la secuencia, se encuentran depósitos recientes de terrazas y aluvión.

La mineralización se presenta exclusivamente en la Fm. Boleo del Plioceno Inferior, en ocho mantos que cubren un área de 50 Km², los mantos 1 y 3 son los de mayor importancia económica. La Fm. Boleo tiene entre 100 y 300 m de espesor y está constituida por intercalamientos de tobas, calizas y capas de conglomerado, además de un depósito basal de yeso (Fig. 12). El conglomerado está constituido por clastos semirredondeados de rocas

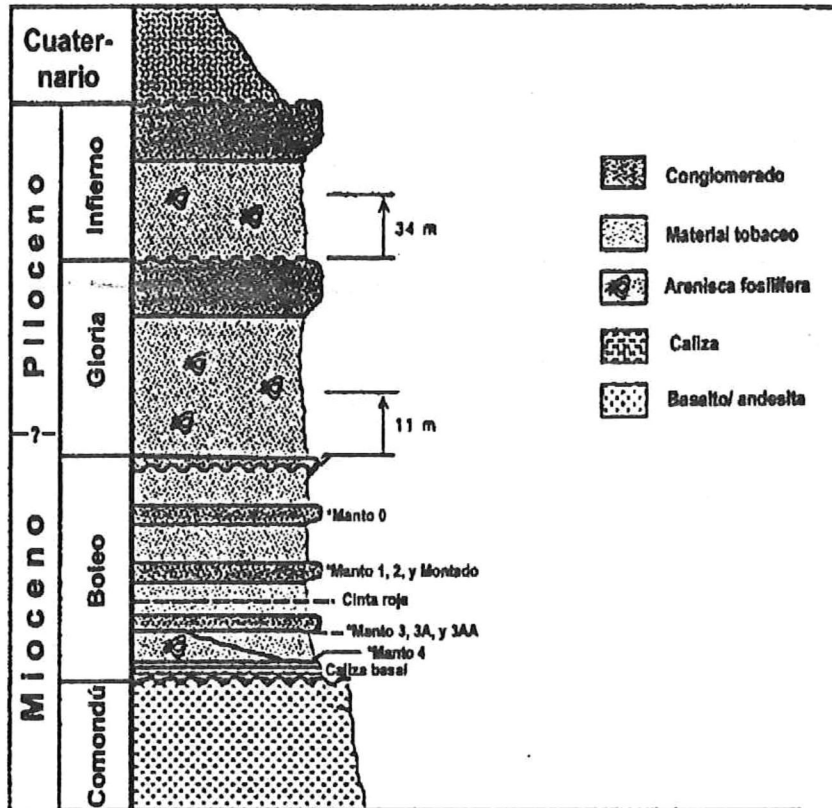


Fig. 4. Generalización de la secuencia sedimentaria en la cuenca Santa Rosalía, B.C.S. En ella se observa la alternancia de lechos rojos (conglomerados), lechos grises (calizas y material tobaceo) y mantos mineralizados dentro de la Fm. Boleo. También se observan otras formaciones asociadas (modificado de Holt, *et al.*, 1996).

cristalinas y volcánicas del basamento, de tamaño variable, fue depositado en cañones estrechos y abruptos durante las primeras etapas del fallamiento tensional y es de extensión limitada.

Sobre su origen, en 1955 Willson y Rocha apoyaban la teoría del reemplazamiento de capas favorables por soluciones hidrotermales ascendentes a lo largo de planos de falla y fracturas previamente formadas en las rocas volcánicas del Grupo Comondú. Con la probabilidad de que los fluidos se hallan desplazado sobre las colinas e islas que la paleotopografía del basamento contenía y que posteriormente se dispersaran sobre los sedimentos de la Fm. Boleo, donde fueron atrapados por las capas de tobas y arcillas que sobreyacían a las capas de conglomerados y areniscas. La mineralización ocurrió durante el Plioceno Temprano y se cree que esta relacionada con el periodo de actividad ígnea que produjo las capas de tobas.

METODOLOGÍA

1. Trabajo de campo.

Se realizaron muestreos sistemáticos en la parte sur del Arroyo el Mono (Fig. 2), sobre los lechos rojos y grises de interés, es decir, sobre el fanglomerado y la caliza respectivamente. Se colectaron 10 muestras de la localidad el Notch, a la cual pertenece la columna que mejor expone los horizontes de pedernal (Fig. 3). Así mismo, se colectaron 2 muestras fuera de la cuenca, en rocas volcánicas del Grupo Comondú, con el fin de observar las características litológicas del basamento. En la Fig. 5 aparecen las columnas estratigráficas sobre las cuales se tomaron las muestras.

En el caso del Distrito minero del Boleo de Santa Rosalía, se consiguió el permiso de la Compañía Minera Curator, S.A, de C.V., actual concesionario, para recorrer la localidad, tomar muestras de la roca encajonante y de los mantos mineralizados; así como recopilar información de los estudios estratigráficos de la localidad tipo (Figs. 12 y 13). El material y muestras que se obtuvieron, solamente se utilizaron como patrón de comparación para la localidad de Arroyo El Mono.

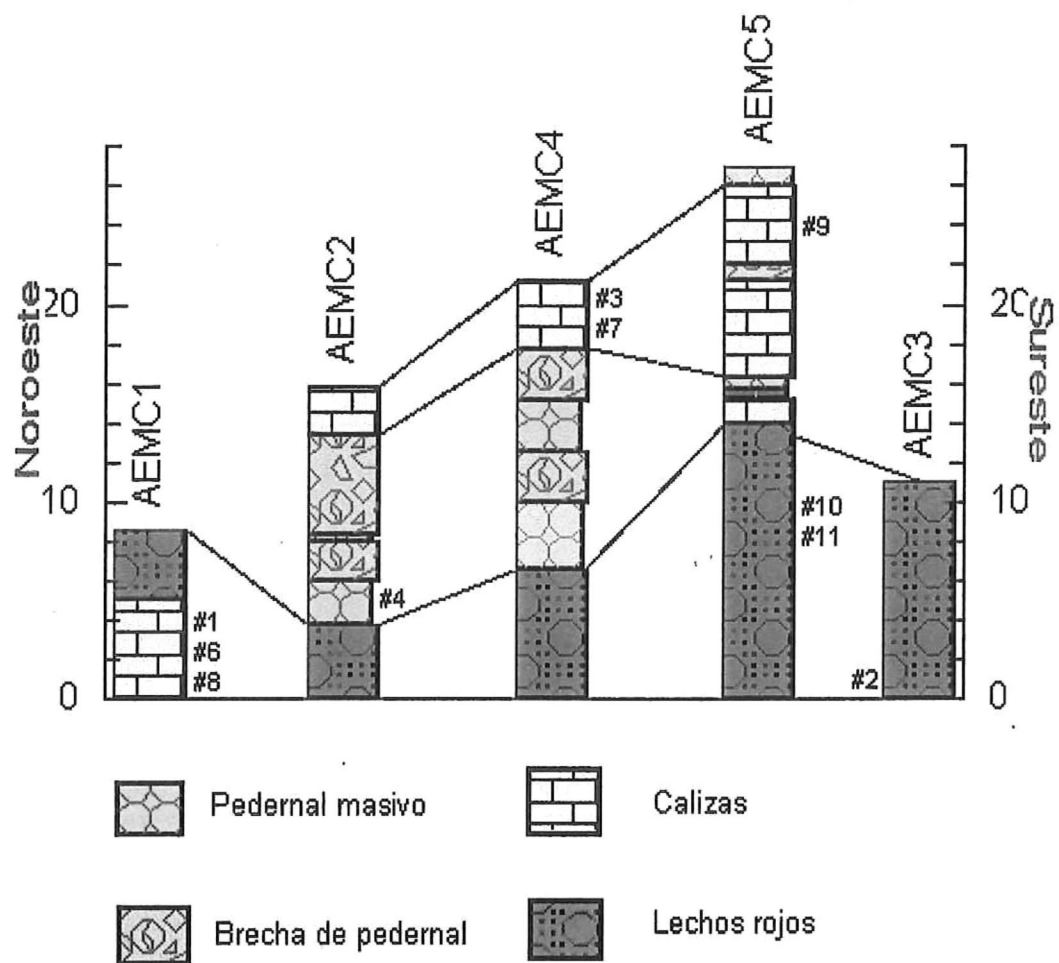
En ninguno de los casos se levantaron columnas estratigráficas, dado que Arroyo El Mono y El Boleo, cuentan ya con una extensa descripción estratigráfica (Fig. 3, 4, 5, 12 y 13).

2. Trabajo de laboratorio.

Las muestras se analizaron en el laboratorio para describir su composición mineral, textura, alteración y origen. Para ello se hicieron dos tipos de estudios:

A) Petrográficos: en muestra de mano y en secciones delgadas al microscopio petrográfico de luz transmitida, realizadas en las instalaciones del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

B) Difracción de rayos X: en la fracciones arcillosas $< 4\phi$ de las muestras 3, 8, 9, 10 y Boleo;



De las siguientes estaciones, se obtuvieron las muestras:

C1 = muestras 1, 6 y 8

C2 = muestra 4

C3 = muestra 2

C4 = muestra 3 y 7

C5 = muestra 9, 10 y 11

* Las muestras 12 y 13 se tomaron del basamento, fuera de la cuenca.

Fig. 5. Litología de las estaciones donde se colectaron las muestras en Arroyo El Mono (tomado de Mayall, 1993).

y en la fracción $<2\phi$ solamente de las muestras 9, 10 y Boleo. La técnica requirió un pretratamiento de las muestras y su posterior análisis de tamaño de grano por columna de asentamiento según el método de Folk (1974), en Rendón-Márquez, 1995. Esta técnica consiste en:

- a) Disgregar la muestra y deflocularla con hexametáfosfato de sodio a 5.5 gr/L.
- b) Pasar la muestra a la columna de asentamiento, tamizando en húmedo con tamiz de 4ϕ .
- c) Agitar la columna y tomar alícuotas a 10 cm de profundidad, según el tiempo indicado para cada fracción:

Fracción $<4\phi = 1$ h. 51 min; y Fracción $<2\phi = 7$ h. 24 min.

- d) Centrifugar la alícuota a 50 rpm, por 5 min. Decantar y retener el residuo.
- e) Frotar el residuo de cada muestra en tres porta objetos petrográficos, uno para análisis normal, otro para tratamiento con glicol y el último para calcinar a 500°C .
- f) Analizar con difracción de rayos X. En este caso las muestras se corrieron de 2 a 60 grados de 2θ , con una energía de 40 kV, una corriente de 30 mA, con ánodo de cobre y una velocidad de 0.02 grados ($^{\circ}2\theta$) por paso.

El difractómetro utilizado fue un modelo X' Pert de Phillips, con un software PC-APD Phillips Analytical, en el Centro de Ciencias de la Materia Condensada de la UNAM, en Ensenada, B.C. Los valores que se usaron para identificar los minerales arcillosos en los difractogramas, corresponden a la Tabla 5.18 de Brandley, *et al.*, 1980 (p. 349 - 356); y las tarjetas de identificación del software PC-APD Phillips Analytical.

Escandón-Valle (1995), reporta que para el Distrito minero del Boleo existe una lista de minerales primarios (calcosita, calcopirita, carrolita y pirita cobaltífera, etc.), minerales secundarios (malaquita, atacamita y crisocola, etc.) y ganga (arcillas de esmectita, micritas de calcita, feldespatos, plagioclasas, limonitas de Fe y jaspe). Durante los análisis petrográficos y por difracción de rayos X, se espera poder identificar la presencia o ausencia de alguno de ellos u otro mineral de alteración, en los sedimentos correspondientes al Arroyo El Mono.

RESULTADOS

Análisis petrográfico

A continuación se presentan la descripción petrográfica de las muestras: 1 a 13 correspondientes a Arroyo el Mono, resumidas en la tabla II; y las cuatro muestras recogidas en Arroyo el Purgatorio del distrito minero del Boleo, resumidas en la tabla III.

Muestra #1

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 21" N ; 111° 40' 04" W

Roca que se clasificó como caliza, muy intemperizada, es de color claro (blanquesino), presenta abundantes conchas preservadas y moldes externos. No se observa ningún fenocristal, es una roca de aspecto terroso, deleznable y muy porosa, efervesció al HCl. El depósito se encuentra cercano a una falla, en contacto con el pedernal y los lechos rojos.

II. Lamina delgada.

a) Mineralogía: de acuerdo a su abundancia relativa la muestra presenta un 10% total de microcristales, de los cuales: 4% son cuarzo monocristalino, anguloso; 4.5% de plagioclasas con macla tipo albita, sin alteración; menos del 1% son piroxenos no alterados, la mayoría presenta cierta redondez y están muy fragmentados; también se presenta un 0.5% de hornblenda muy diseminados, sin alterar, angulosos y fragmentados; además de un 0.1% de muscovitas no alteradas y vidrio.

Los bioclastos constituyen un 30% de la muestra: 18% pertenecen a bivalvos de conchas moderadamente gruesas y con ligeramente recristalizados por micritas de calcita en sus bordes externos; 10% de esqueletos de algas coralinas (rojas), con su característica apariencia reticular, formando biohermas sin recristalización; 2% de gasteropodos, de concha gruesa sin recristalización.

b) Matriz: compuesta por dos formas de carbonatos: en micritas de calcita que aparece como

producto de recristalización, y como carbonato masivo y amorfo como material original.

- c) Cementante: carbonato de calcio.
- d) Clasificación: Caliza (bioesparita).

Muestra #2

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 19" N ; 111° 39' 59" W

En el contacto la falla, con el pedernal y contra los lechos rojos, se tomo muestra de las capas rojas. Es una roca carbonatada de color rojizo, sin fenocristales pero con fragmentos líticos volcánicos. Es un sedimento deleznable, de matriz fina, textura granulosa y arcillosa (parecida a la motmorillonita). Efervesció al HCl.

II. Lamina delgada.

- a) Mineralogía: se observó un 40 % total de microcristales de los cuales: 5% son cuarzo monocristalino no alterado; 9% de feldespatos, algunos de ellos muy alterados o que muestran intercrecimientos perfiticos, en ambos casos son angulosos; 16% de plagioclasas con macla, zonadas y muy angulosas; 3% de augitas sin alteraciones, angulosas y fracturadas; 2% de hornblenda ligeramente alteradas y angulosas; escasas biotitas (<1%); 4% de líticos volcánicos, muy intemperizados, compuestos de microcristales de plagioclasas en una matriz oxidada (los líticos son andesitas de la Comondú). El pedernal encontrado es de tipo secundario por neomorfismo a cuarzo policristalino, < 0.5% de abundancia. No hay bioclastos.
- b) Matriz: de calcita micritica, esparitica, y opacos.
- c) Cementante: carbonato de calcio.
- d) Clasificación: Arenisca tipo arkosa (de feldespatos), mineralogicamente inestable.

Muestra #3

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 19" N ; 111° 40' 04" W

La muestra se recogió en una zona donde el pedernal se encuentra en contacto con las capas rojas. Se trata de una roca sedimentaria de color claro (blancuzco), deleznable, de grano fino y sabor salado. No efervesció al HCl.

II. Lámina delgada.

- a) Mineralogía: no presenta estructura ni cristales, esta compuesta exclusivamente de vidrio, el cual parece haber sido devitrificado; además de trazas de yeso, sal (NaCl), y cuarzo policristalino (pedernal); tiene una textura porosa y sin bioclastos. Se presentan algunos materiales opacos como óxidos de hierro.
- b) Matriz: vidrio.
- c) Cementante: vidrio.
- d) Clasificación: Toba (?).

Muestra #4

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 22" N ; 111° 40' 02" W

La zona es un horizonte de pedernal café, adjunto a lutitas blancas. Es una roca sedimentaria color café oscuro, de aspecto vidrioso, no efervesció al HCl. No presenta fenocristales. Es un material muy sólido con fractura concoidea.

II. Lámina delgada.

- a) Mineralogía: presenta un 2% de microcristales de cuarzo monocristalino; 1% de plagioclasas, ambos muy angulosos. Se observa una recristalización del sílice a pedernal, evidente por las estructuras de corona. Mas bien se trata de una muestra de sílice masivo y amorfo, en proceso de pedernalización.

- b) Matriz: sílice
- c) Cementante: sílice
- d) Clasificación: Pedernal

No hay Muestra #5

Muestra #6

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 24" N ; 111° 40' 01" W

En el campo la roca se describió como caliza, de color gris ante el intemperismo y de color beige en fresco; textura superficial tipo karztica. La zona esta distal al plano de falla. Es una roca sedimentaria bien compactada, poco porosa, sin fenocristales, efervesció al HCl.

II. Lámina delgada.

- a) Mineralogía: se compone de micritas de calcita, además de un 5% de cristales de cuarzo, muy angulosos y sin alterar. Se observan concreciones rellenas por calcita espartica, recristalizada a partir de la matriz.
- b) Matriz: carbonato de calcio
- c) Cementante: carbonato de calcio.
- d) Clasificación: Caliza (dismicrita)

Muestra #7

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 27" N ; 111° 39' 58" W

En el campo se describió como una caliza sobreyaciendo al pedernal, con un color gris de intemperismo y textura superficial tipo karztica; en fresco la muestra es color beige a naranja. En esta roca se recogió un diente de tiburón. Nota: todas las unidades están en la posición horizontal original. Se le describe como una roca sedimentariaalgi porosa y frágil, efervesció al

HCl, con gran abundancia de microfósiles pero sin fenocristales.

II. Lamina delgada.

a) Mineralogía: 4% de microcristales de cuarzo monocristalino, zonados, moderadamente redondeados; 6% de plagioclasas y feldespatos, algunos feldespatos presentan textura peritítica; 0.5% de olivinos, sin alteración y posiblemente no han sufrido un transporte significativo ya que se mantienen angulosos y por lo tanto cercanos a su fuente; 1% de hornblendas, ligeramente alteradas; 2% de augitas ligeramente alteradas de afuera hacia el centro del cristal; 1.5% de muscovitas ligeramente alteradas. En todos los casos la alteración, al parecer, es producto de aguas meteóricas.

En cuanto a bioclastos existe un 20% total: los esqueletos de algas coralinas representan el 8% y muestran cierta recristalización por micritas de calcita; un 5% de foraminíferos; y un 7% de bivalvos que preservaron su concha original.

b) Matriz: carbonato de calcio masivo y en micritas.

c) Cementante: carbonato de calcio.

d) Clasificación: Caliza (biomicrita).

Muestra #8

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 27" N ; 111° 39' 58" W

En el campo se le describió como sinter. Es una concreción de carbonato de calcio, aparentemente un material retrabajado, sólido y bien litificado, sin fenocristales y que efervesció al HCl (por lo cual no puede ser sinter).

II. Lamina delgada.

a) Mineralogía: se observa conformada masivamente por carbonato de calcio, sin ningún cristal o fósiles presentes.

b) Matriz: carbonato de calcio masivo.

c) Cementante: carbonato de calcio masivo.

d) Clasificación: Caliza.

Muestra #9

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 44" N ; 111° 39' 40" W

La muestra se tomo de un montículo de lechos rojos que subyacian a las calizas fósiles. Es una caliza sin fenocristales, con algunos opacos en dendritas, ligeramente porosa y con varias fracturas rellenas de un carbonato más limpio, bien compactada, de color rosado en fresco y que efervesció al HCl.

II. Lamina delgada.

- a) Mineralogía: carbonato de calcio masivo, con escasos cristales de cuarzo monocristalino y opacos. Se observan cavidades rellenas por calcita esparitica recristalizada a partir de la matriz. La esparita presenta una porosidad tipo fenestrae, probablemente formada por el entrapamiento de fluido durante la desecación.
- b) Matriz: carbonato de calcio.
- c) Cementante: carbonato de calcio.
- d) Clasificación: Caliza (calcita esparica).

Muestra #10

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 27" N ; 111° 39' 58" W

La muestra proviene de la misma estación que la anterior pero de una capa diferente, en este caso de los lechos rojos. Esta muestra era deleznable y muy arcillosa por lo que no se estudio en lamina delgada y sólo por difracción de rayos X.

Muestra #11

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 35' 27" N ; 111° 39' 58" W

Esta muestra era deleznable y arcillosa por lo que se omitió la lamina delgada, pero se analizó por difracción de rayos X.

Muestra #12

I. Muestra de mano.

Posición: 26° 34' 20" N ; 111° 34' 12" W

Se le describió como una ceniza del Gpo. Comondú, color negro, de grano fino, sin fenocristales, con escasos fragmentos líticos, no muy sólida y que efervesció al HCl.

II. Lamina delgada.

- a) Mineralogía: la muestra presenta 1% de cristales de cuarzo con extinción ondulatoria, debida posiblemente a una recristalización secundaria; 1% de plagioclasas muy alteradas por los óxidos presentes. El resto de la muestra se compone de micritas de calcita, vidrio y abundantes óxidos de hierro (25%).
- b) Matriz: carbonato de calcio y óxidos de hierro.
- c) Cementante: carbonato de calcio.
- d) Clasificación: ceniza volcánica con remplazamiento por carbonatos.

Muestra #13

I. Muestra de mano.

Descripción del afloramiento y posición: no se registradas.

Se describió como una roca ígnea máfica, extrusiva, de textura fanerítica con fenocristales de olivino y piroxenos.

Color: negro

Estructura y textura: textura fanerítica, sin intemperismo, sin fracturas.

II. Lamina delgada.

- a) Mineralogía: la muestra presenta un 5% de fenocristales de plagioclasas monocristalinas, zonadas y otras con macla polisintéticas; un 20% de fenocristales de augitas y olivinos, que en conjunto forman glomerulos, o bien, están cada uno por separado. Los cristales de olivinos y piroxenos son euhedrales a subhedrales, no muestran alteración y presentan cierto grado de fractura.
- b) Matriz: constituye un 75%, y se compone de cristales euhedrales de plagioclasas, masivas, tabulares y orientadas en una dirección preferencial (textura traquita).
- c) Clasificación: basalto de olivinos y piroxenos.

Tabla II.- Resultados de la petrografía de muestras de Arroyo el Mono, B.C.S.

Clave: (-) ausente; (X) escaso; (XXX) abundante.

MUESTRA	1	2	3	4	6	7	8	9	12	13
MINERAL										
Olivino	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X
Augita	X	X	-	-	-	X	-	-	-	X
Hornblen	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-
Micas	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-
Plagiocl.	X	X	-	X	-	X	-	-	X	XXX
Feldesp.	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-
Qz	X	X	-	X	X	X	-	X	X	-
Vidrio	X	-	XXX	-	-	-	-	-	XXX	-
Pedernal	-	X	X	XXX	-	-	-	-	-	-
Calcita	XXX	XXX	-	-	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	-
Lit. Volc.	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxidos	-	XXX	X	-	-	-	-	X	XXX	-
Bioclast.	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-
Otros	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Clasific.	Caliza	Arenisca	Toba ?	Pedernal	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza	Ceniza	Basalto

Muestra #I (Manto No. 3)

I. Muestra de mano.

Posición: 27° 25' N ; 112° 20' W

Descripción del afloramiento: el manto No. 3 es el más importante económicamente, se encuentra dentro de la Fm. Boleo del Mioceno Superior. De la base a la cima se compone por: una zona de argilitas calcáreas, una capa de tobas devitrificadas, una zona lenticular de areniscas tobáceas, limolitas y arcillas, y una zona de brechas oligomícticas y polimícticas cubiertas por un horizonte ferroso y manganesífero.

Descripción de muestra de mano: se recogieron tres tipos de muestras del mismo manto, directamente de los horizontes manganesíferos, sobre el conglomerado. En general se trata de pesadas capas masivas de metales ya sea en arcillas deleznales y húmedas, en capas pseudo laminares, o a manera de nódulos irregulares, estos dos últimos bien endurecidos y fracturados.

II. Lamina delgada.

- a) Mineralogía: por ser muestras de metales, su análisis requería de un pulido de y su posterior estudio por microsonda electrónica. Este tipo de estudio no se realizó, solamente se reporta lo que menciona la bibliografía mas actualizada (Pérez, 1995). La roca carece de estructura pero la textura y composición general corresponde a una tobalimolítica con 4% de sulfuros diseminados, compuesta de arcillas (motmorillonita) y clorita, calcita micrítica, trazas de calcita esparítica, y casi exclusivamente óxidos de manganeso y fierro.
- b) Matriz: óxidos de manganeso y fierro.
- c) Cementante: óxidos de manganeso y fierro.
- d) Clasificación: toba mineralizada por manganeso y fierro.

Muestra #II (Fumarola)

I. Muestra de mano. Posición: 27° 25' N ; 112° 20' W

Descripción del afloramiento: las fumarolas submarinas se presentan como cuerpos tabulares muy alargados que cortan directamente el basamento de rocas de la Fm. Comondú, provocando en ellas alteración hidrotermal manifestada en una intensa argilización y la mineralización de metales. Se encuentra próxima a la capa de caliza basal.

Descripción de muestra de mano: la roca no muestra estructura ni porosidad alguna, es pesada y presenta cierto bandeamiento de óxidos rojos y verdes, sulfuros y crecimientos dendríticos de metales (Mn, Co). Presenta cierta pedernalización de la que se observa fractura concoidea.

II. Lamina delgada.

- a) Mineralogía: se compone en un 60% de cuarzo policristalino producto de neomorfismo, abundante dentro de estructuras de corona y/o pedernalizado, sólo se encuentran trazas de cuarzo monocristalino. Existe un 30% de minerales opacos (hematita, magnetita, manganeso, cobalto, etc.), principalmente en forma de ooides; además de un 5% de óxidos de hierro, vidrio, arcillas cerisitizadas; y 5% de jaspe, clorita, sulfuros y yeso fibroso, estos últimos se presentan en bandeamiento.
- b) Matriz: sílice
- c) Cementante sílice.
- d) Clasificación: basalto o andesita alterado por fluidos hidrotermales (?).

Muestra #III (Cinta colorada)

I. Muestra de mano.

Posición: 27° 25' N ; 112° 20' W

Descripción del afloramiento: en la literatura se le cita como una unidad estratigráfica clave dentro de la Fm. Boleo (Holt, J.W., *et al*, 1996). Es una capa de toba lítica, de grano grueso con coloración rojiza o purpúrea, mide 50 cm en promedio y alcanza hasta 2 m. A diferencia de los conglomerados o capas de areniscas, la cinta colorada es un fechador verdadero ya que se

depositó a un sólo tiempo sobre toda el área; pero en esencia esta compuesta del mismo tipo de material que el resto de los conglomerados.

Descripción de muestra de mano: en el campo se le describió como una arenisca; presenta coloración roja, con pequeños líticos redondeados, aparentemente bien sorteados, sin fenocristales, muy porosa, no muy bien consolidada. No efervesce al HCl.

Estructura y textura: afanítica, con cierto intemperismo y fracturas.

II. Lamina delgada.

- a) Mineralogía: gran parte de la muestra se compone de líticos volcánicos, poco más del 45%, estos contienen plagioclasas aciculares de composición intermedia, algunas con macla simple, además de sanidinos, hornblendas y augitas, todo ello en una matriz de vidrio y ceniza gruesas. Estos fragmentos pertenecen a las andesita de la Fm. Comondú. Los fragmentos van de subredondeados a subangulares y están pobremente sorteados. Estos líticos pudieran haber viajado de lugares diferentes pero de la misma roca fuente, de ahí que algunos líticos estén mas intemperizados y alterados que otros. Además también se presenta un 20% de minerales pesados, principalmente augitas, hornblendas, biotitas y escasos olivinos, de ellos, las augitas y biotitas se encuentran muy alteradas. El resto de la muestra lo componen aproximadamente: 8% de cuarzo policristalino (por pedernalización), 5% de cuarzo monocristalino, 10% de plagioclasas macladas (tipo ándesina, oligoclasa, bitownita, y labradorita), 10% de feldespatos y un 3% de vidrio y opacos. Existen tres tipos de alteración: sericitización de feldespatos y plagioclasas, cloritización de augitas, micas y vidrio, y devitrificación.
- b) Matriz: óxido de hierro (también como cementante), y vidrio.
- c) Clasificación: litarenita o litarenita feldespática pobremente sorteada en estado de inmadurez sedimentaria.

Muestra #IV (Caliza basal)

I. Muestra de mano.

Posición: 27° 25' N ; 112° 20' W

Descripción del afloramiento: la caliza basal es un horizonte de hasta 5 m, se encuentra subyaciendo al conglomerado basal y es básicamente un caliza ferruginosa.

Descripción de muestra de mano: roca de textura afanítica, medianamente porosa pero con cierta solidez, presenta escasos cristales de calcita y abundantes betas de metales que se distribuyen en manchas y venas, también presenta sulfuros. Efervesció al HCl.

II. Lamina delgada.

- a) Mineralogía: la muestra es muy impura y se compone principalmente de minerales tamaño arcilla que presentan colores altos de birrefringencia, probablemente se trate de minerales sericitizados; no hay fenocristales, excepto por abundantes micritas de calcita y una gran mineralización por opacos.
- b) Matriz: carbonato de calcio y óxidos de fierro.
- c) Cementante: carbonato de calcio.

Clasificación: Caliza ferruginosa.

Tabla III.- Resultados de la petrografía del Boleo, Santa Rosalía, B.C.S.
Clave: (-) ausente; (X) escazo; (XXX) abundante.

MUESTRA	I Manto # 3	II Fumarola	III Cinta colorada	IV Caliza basal
MINERAL				
Minerales pesados	-	-	X	-
Plagioclasas y Feldespatos	-	-	X	-
Qz	-	X	X	-
Minerales alterados	X	X	X	XXX
Líticos Volc.	-	-	XXX	-
Oxidos	XXX	XXX	X	XXX
Sulfuros	X	XXX	-	XXX
Calcita	X	-	-	-
Dolomita	-	-	-	XXX
Arcillas	X	-	-	XXX
Vidrio	-	X	X	-
Otros	-	X	X	-
Clasificación	Toba	Basalto alterado?	Litarenita	Caliza Mn

Difracción de Rayos X (DRX)

Los difractogramas de las muestras analizadas se presentan en las figuras 6 a 11. De los sedimentos de Arroyo El Mono se analizaron las muestras 3, 8, 9, 10, 11; y del Boleo solamente la caliza basal. En la tabla IV se resume el contenido de minerales identificados con este método.

En el caso de la Muestra #3 (Fig. 6), se encontró esmectita (E) con un pico muy fuerte en 5.28 ($^{\circ}2\theta$), sin embargo, el resto de sus reflejos están siendo interferidos por picos de vidrio (que es la composición principal de la muestra), y trazas de cuarzo con picos de baja intensidad en 26.56 , 39.5 y 42.4 grados de 2θ ($^{\circ}2\theta$).

La Muestra #8 (Fig. 7), se compone exclusivamente de calcita (C), la muestra sólo se corrió en la fracción $< 4\phi$ tratada con glicol, pero se aprecian muy bien los picos característicos en: 23.02 , 29.36 , 36.01 , y 39.44 $^{\circ}2\theta$. La intensidad de dichos valores es alta.

En la Muestra #9 (Fig. 8a y 8b), el difractograma de la fracción $< 4\phi$ muestra minerales arcillosos, principalmente esmectitas (E) con picos intensos en: 4.54 , 5.29 , 23.09 , 28.05 , y 33.08 ($^{\circ}2\theta$), en muestra normal; así como su corrimiento en glicol; y el colapso de tales picos en la muestra calcinada. Varios de esos picos se confunden con reflejos de calcita (en 23.09 $^{\circ}2\theta$). También se observan trazas de illita/esmectita (I/E), en 8.50 $^{\circ}2\theta$, muestras normal, glicol y calcinada. Aunque no se pudo determinar con precisión, es posible que en I/E, el contenido de illita sea mayor que el de esmectita. Dentro de los minerales no arcillosos encontramos gran abundancia de calcita (C) y trazas de cuarzo (Qz), opalo y plagioclasas tipo albita (P).

La fracción $< 2\phi$, que es un análisis mas fino para minerales arcillosos, presenta esmectitas (E) e illita/ esmectita (I/E), con picos intensos en 5.25 y 8.03 ($^{\circ}2\theta$), respectivamente. El resto de los picos corresponden principalmente a la calcita, que es el componente principal de la muestra, con valores en 23.04 , 29.42 , 36.02 , y 39.45 ($^{\circ}2\theta$); así como a trazas de cuarzo (Qz) con picos poco intensos en 43.5 y 58.7 $^{\circ}2\theta$.

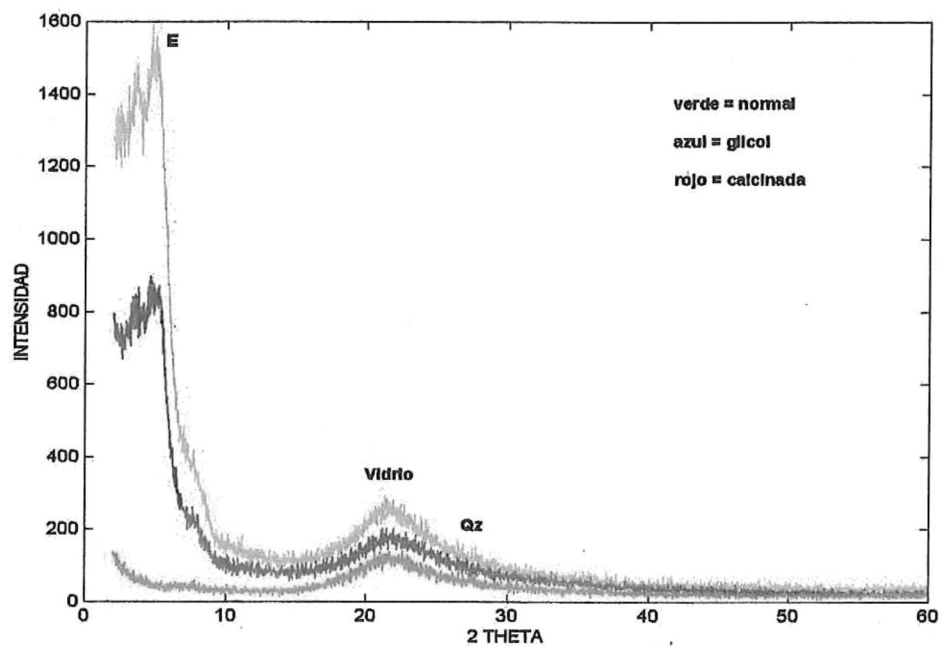


Fig. 6. Difractograma de la muestra #3, 4ϕ, El Mono. Se observa esmectita (E), vidrio y trazas de cuarzo (Qz).

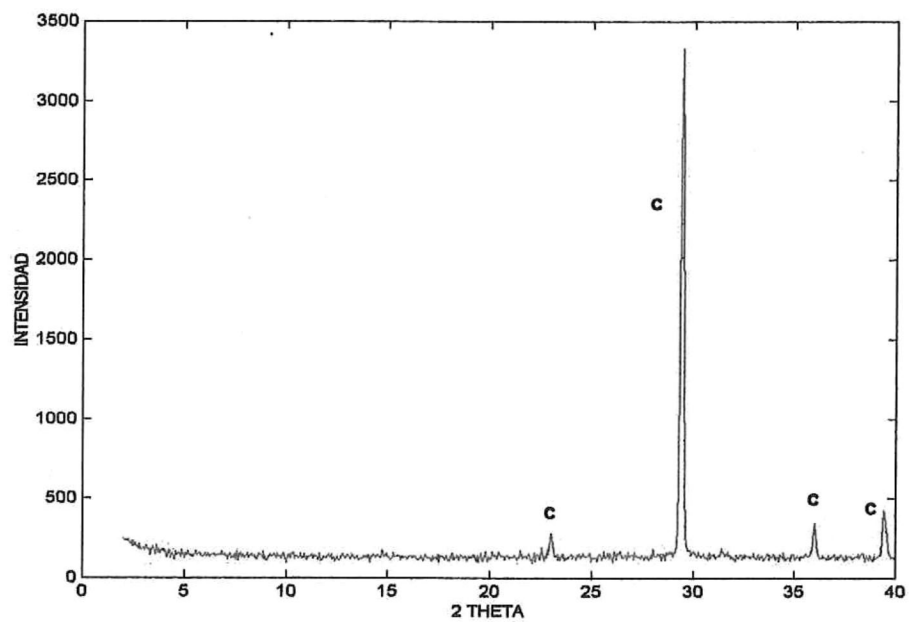


Fig 7. Difractograma de la muestra #8, 4ϕ, El Mono; que corresponde a una calcita. Sólo se corrió en glicol.

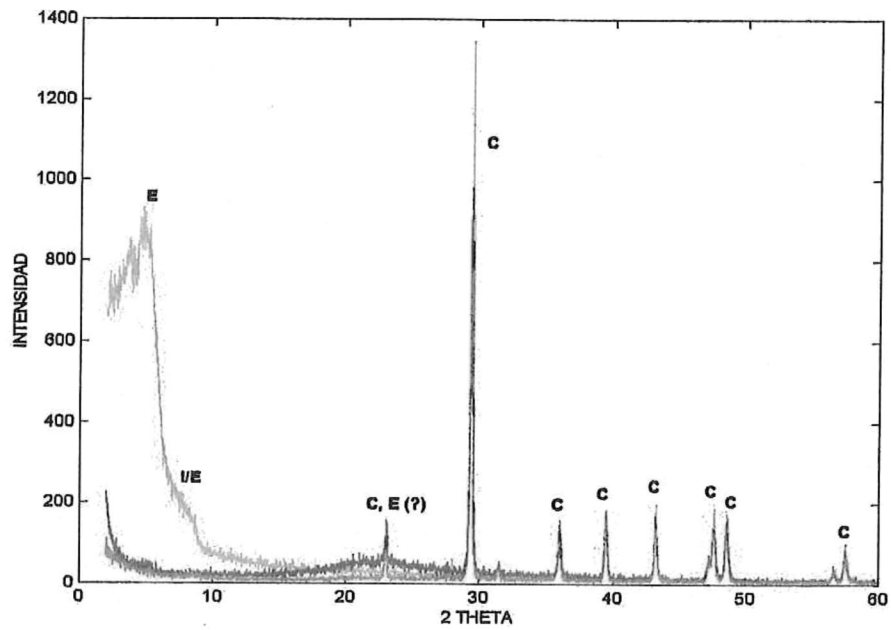


Fig. 8a. Difractograma de la muestra #9, $< 4\phi$, El Mono. Es visible la presencia de minerales arcillosos como esmectita (E), illita/esmectita (I/E); además de calcita (C).

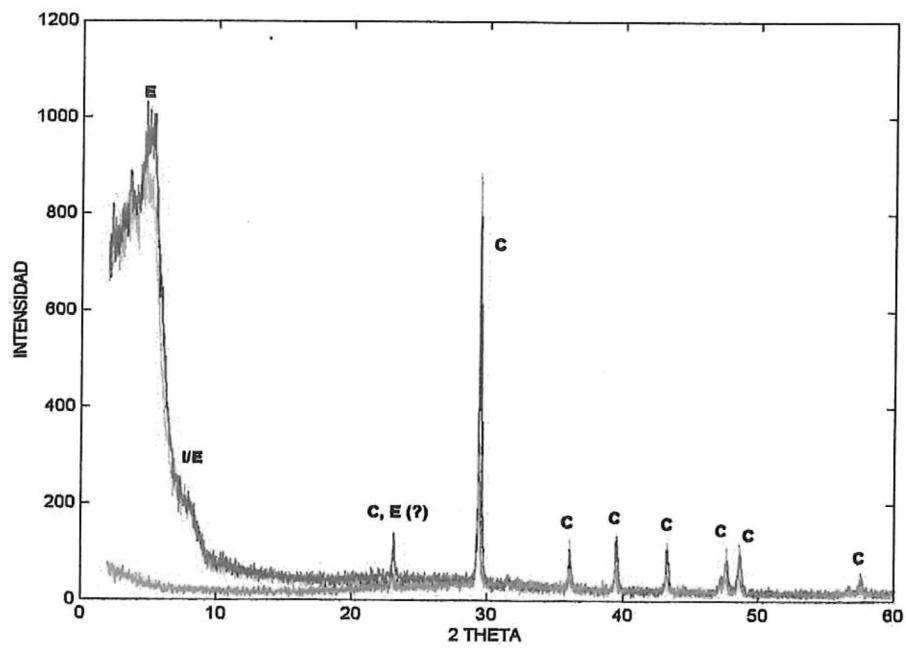


Fig. 8b. Difractograma de la muestra #9, $< 2\phi$, El Mono. Presenta minerales arcillosos y calcita (C).

En la Muestra #10 (Fig. 9a y 9b), la fracción < 4 ϕ muestra minerales arcillosos, principalmente del grupo de las esmectitas (E) con picos intensos en: 5.1, 9.9, 19.89, y 27.76 ($^{\circ}2\theta$), en muestra normal; luego dichos valores se corren y colapsan en las muestras de glicol y calcinadas respectivamente. También aparecen trazas de illita/esmectita (I/E) con picos en 8.47, 24.09, y 37.11 ($^{\circ}2\theta$), valores que se mantienen conforme a la naturaleza del mineral en glicol y al calcinarse. Los minerales no arcillosos aparecen con intensidades muy bajas y se componen de trazas de cuarzo (Qz) en 26.6, 40.2, 42.17; albita (P) en 21.98, 23.68, 24.1, 35.6; y trazas de calcita (C) en 29.4, 31.5, 48.4 $^{\circ}2\theta$. En la fracción <2 ϕ , únicamente se observan los picos que corresponden a minerales arcillosos: esmectitas (E) e illita/esmectita (I/E), pero con intensidades bajas.

La Muestra #11 (Fig. 10), esta compuesta por esmectita (E) con picos en 5.33, y 23.07; es posible que el resto de los picos estén traslapados con los de la calcita (C), en la que se observan los picos muy intensos en: 23.01, 29.42, 35.98, 39.44, 43.16, 47.6, 48.5 y 58.2 ($^{\circ}2\theta$).

Tabla IV.- Resultados del análisis de DRX, en sedimentos del Mono y el Boleo, B.C.S.
Clave: (-) ausente; X (trazas); (XXX) abundante.

MUESTRA	#3 < 4 ϕ	#8 <4 ϕ	#9 <4 y <2 ϕ	#10 <4 y <2 ϕ	#11 <4 y <2 ϕ	Caliza basal <4 y <2 ϕ
MINERAL						
Esmectita	-	-	XXX	XXX	-	X
Illita / Esmect.	-	-	X	X	-	-
Caolinita	-	-	-	-	-	X
Dolomita	-	-	-	-	-	XXX
Calcita	-	XXX	XXX	X	XXX	XXX
Plagioclasas	-	-	X	X	-	-
Qz	X	-	X	X	-	X
Vidrio	XXX	-	-	-	-	-
Otros	-	-	X	-	-	-

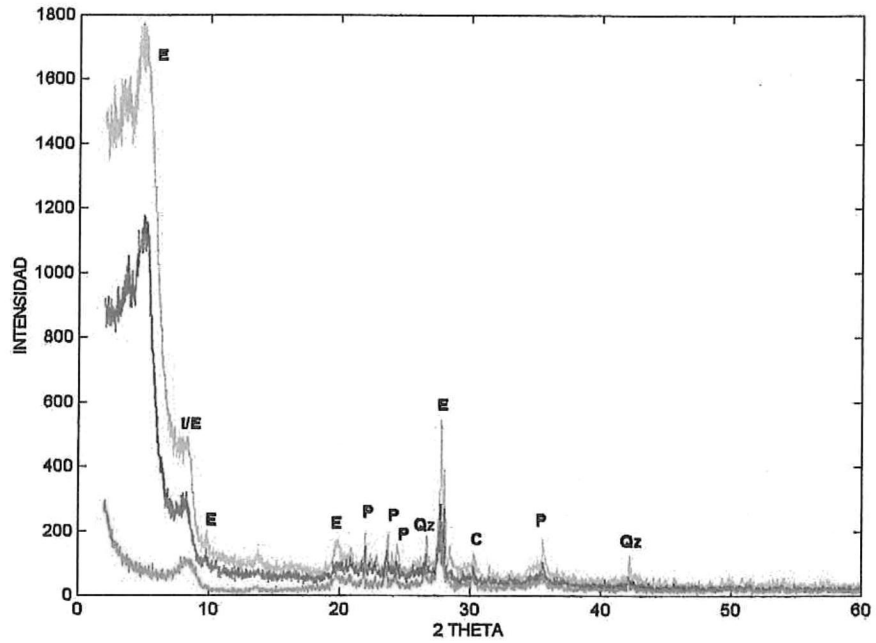


Fig. 9a. Difractograma de la muestra #10, 4ϕ, El Mono. Se observa la presencia de esmectita (E), e illita/esmectita (I/E); además de plagioclasas (P), trazas de cuarzo (Qz) y calcita (C).

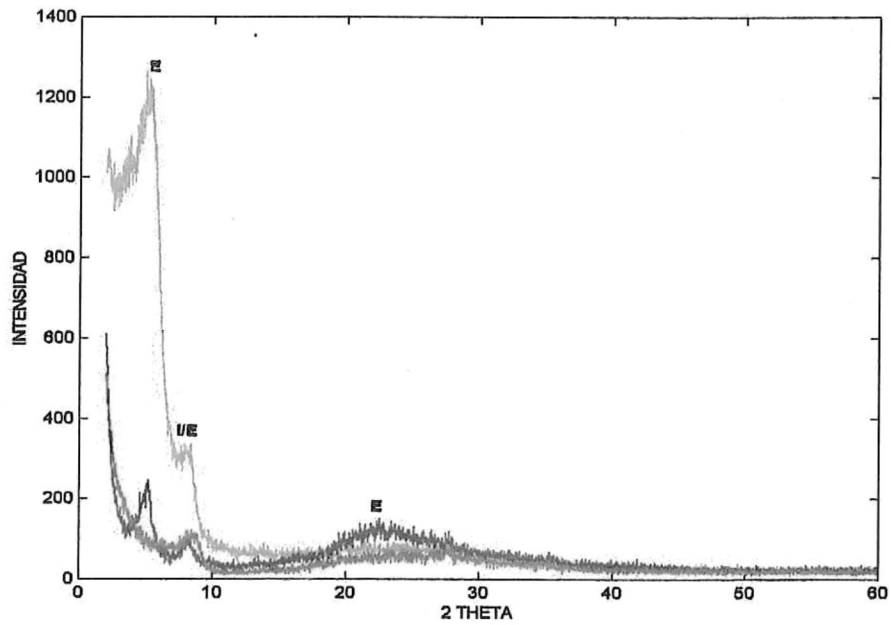


Fig. 9b. Difractograma de la muestra #10, 2ϕ, El Mono. Sólo se observan minerales arcillosos (E, I/E).

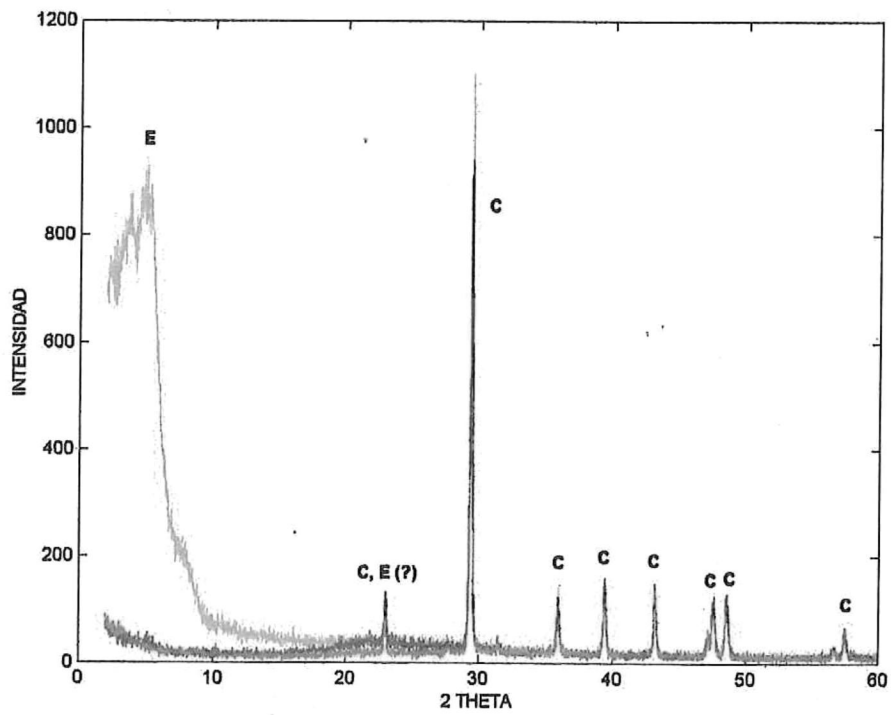


Fig. 10. Difractograma de la muestra #11, $\langle 4\phi$, El Mono. Se compone de esmectita (E) y calcita (C).

La muestra de la caliza basal del Boleo (Fig. 11a y 11b), presenta en la fracción $< 4\phi$ minerales arcillosos como: esmectita (E) en 5.3, 33.41, 37.3, 44.9 (?), y 50.96 $^{\circ}2\theta$; y caolinita (K), en 12.4 y 23.9 (a intensidades muy bajas). Entre los minerales no arcillosos se encontró la presencia de dolomita (D), picos más intensos en 24.03, 30.9, 33.41, 35.25, 41.1, 50.55, y 51.09 $^{\circ}2\theta$; calcita (C) en 29.4, 35.98, 39.44, 47.6 $^{\circ}2\theta$; y trazas de cuarzo (Qz), en 37.33, 45.7, 50.36, 58.7 de $^{\circ}2\theta$. Nuevamente se observa un traslape, ahora entre los picos de esmectita y dolomita. En la fracción $<2\phi$, se observa sólo dolomita, esmectita, trazas de cuarzo y calcita.

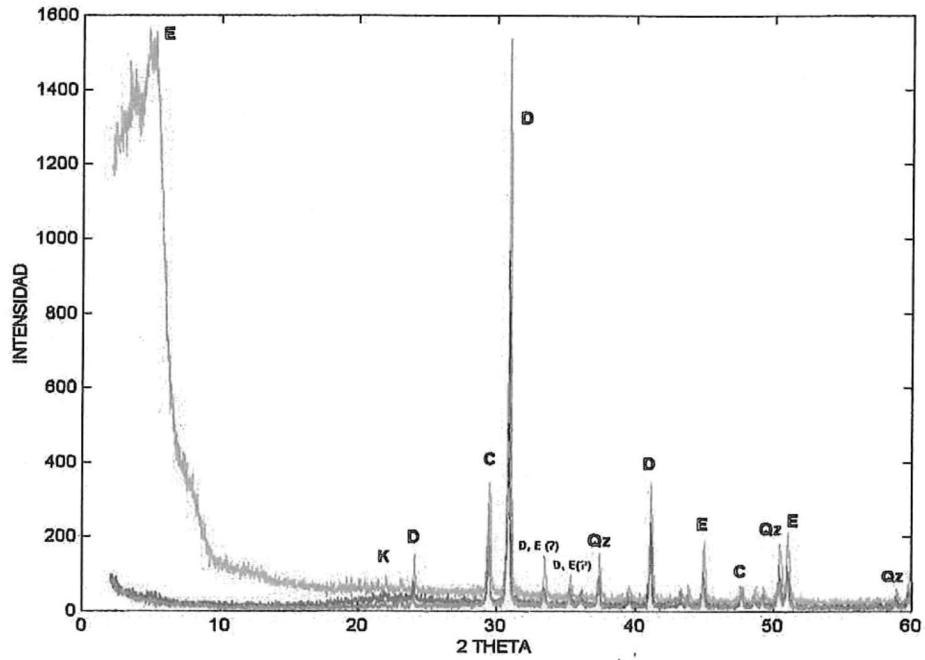


Fig. 11a. Difractograma de la caliza basal del Boleo, $< 4\phi$. Se observa esmectita (E), dolomita (D) como componente principal, además de calcita (C) y trazas de caolinita (K) y cuarzo (Qz).

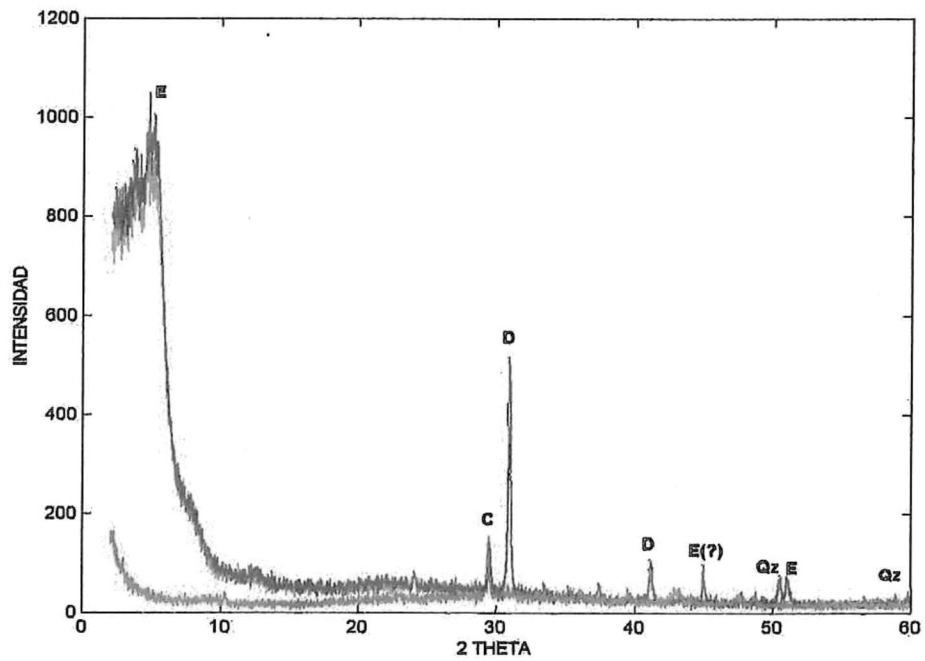


Fig. 11b. Difractograma de la caliza basal del Boleo, $< 2\phi$. Compuesta de esmectita (E), dolomita (D), calcita (C) y trazas de cuarzo (Qz).

DISCUSIONES

Esta confirmado por diversos autores que los ambientes en que ocurren los DECS se deben a la interacción de: lechos rojos, lechos grises, y evaporitas (mediante una salmuera mineralizadora). El producto final de dicha interacción es la precipitación final de metales (Cu y Co, por ejemplo) que son depositados en la frontera entre ambos lechos. Con base a ese orden se discuten los resultados, primero observando el cumplimiento del modelo en la Fm. Boleo, y posteriormente haciendo la comparación de lo que se encontró para Arroyo El Mono.

Lechos rojos

En el caso de la cuenca de Santa Rosalía, los lechos rojos de los modelos corresponden a los conglomerados y areniscas de la Fm. Boleo del Plioceno Inferior, a los cuales se les considera depósitos deltáicos a lo largo de la línea de costa. Estos conglomerados son de composición latítica a andesítica (Wilson y Rocha, 1955) y se presentan intercalados con capas de tobas desvitrificadas (lechos grises). En la base de la Fm. Boleo, se encuentra una brecha poco sorteada, con fragmentos angulares y subangulares, provenientes del basamento (Fig. 12). Los minerales más comunes que se presentan dentro de estos sedimentos son: feldespatos, biotita, hornblenda, clinopiroxenos y magnetita; también son abundantes fragmentos de vidrio, y fragmentos de roca andesítica. Como minerales secundarios se reportan: calcita, yeso, celadonita, halosita, dolomita, epidota, cloritas, y zeolitas. Al cuarzo se le reporta como extremadamente raro.

Varios de los minerales antes mencionados concuerdan con los que se observaron en la petrografía de la cinta colorada (Muestra # III); es notable un alto grado de alteración en plagioclasas y biotitas lo cual involucra la disolución de silicatos, su alteración a esmectita y la lixiviación de dichos minerales lábiles. En el caso de la magnetita ocurre su conversión hasta hematita, como se observó en la muestra de la fumarola (#II).

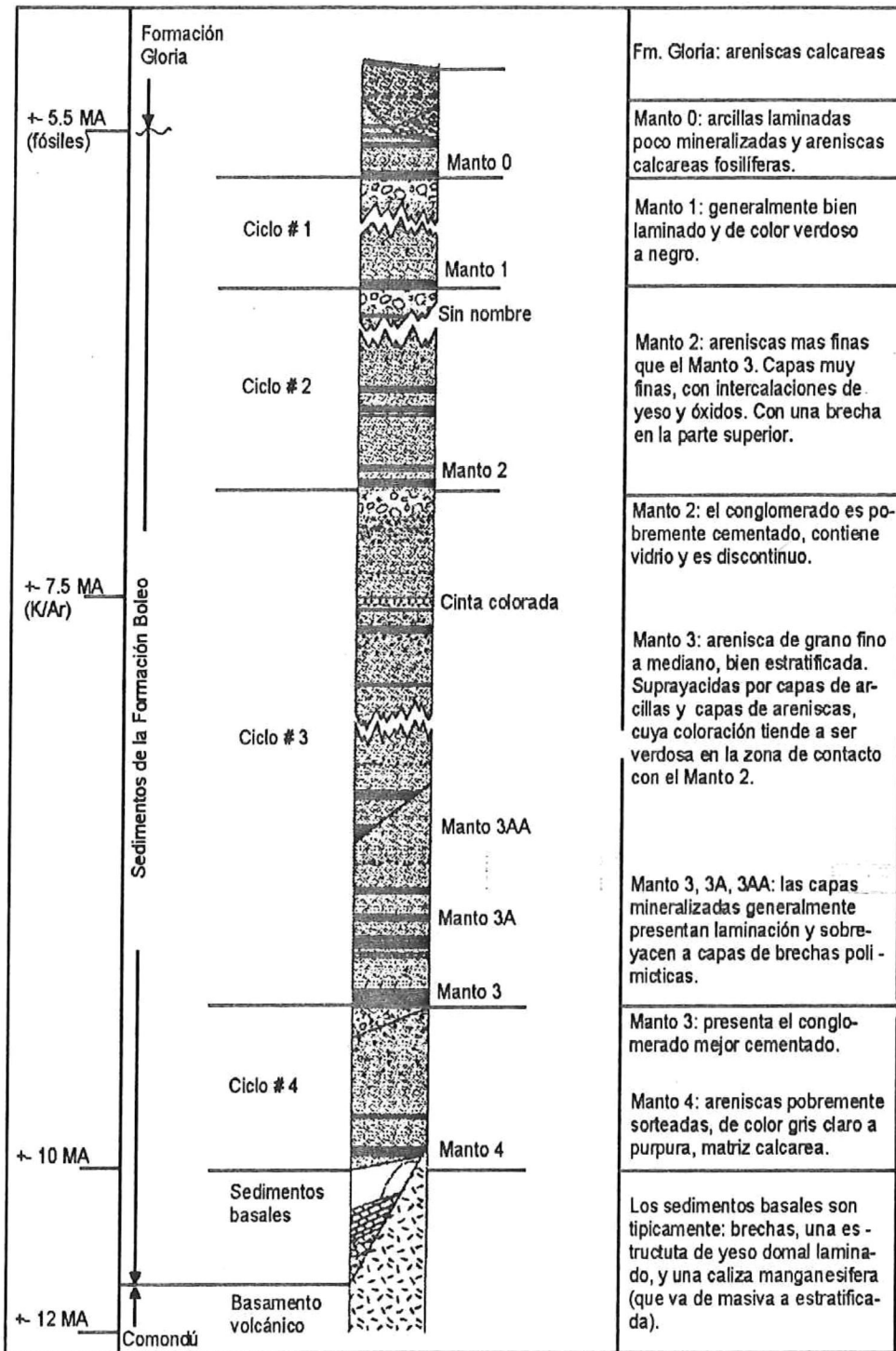


Fig. 12. Estratigrafía de la Fm. Boleo, en ella se observa la secuencia consecutiva de lechos rojos, lechos grises y los ocho mantos mineralizados, siendo los más importantes los Mantos 1 y 3 (Reporte técnico para Minera Curator, S.A., cortesía del Ing. Escadón-Valle, 1998).

El fanglomerado de Arroyo El Mono, es equivalente a los lechos rojos. La localidad de donde se tomaron las muestras es probablemente la porción distal de un abanico aluvial dentro del Miembro Calabaza, ya que carece de clastos y más bien se compone de arenas y arcillas.

En Arroyo El Mono los lechos rojos presentan principalmente plagioclasas, feldespatos, cuarzo, augitas, hornblenda, biotitas, y líticos volcánicos (Muestra #2). Aquí hay una diferencia entre los lechos rojos del Mono que presentan cuarzo y los del Boleo que no.

En El Mono los lechos rojos son de grano fino y en cantidades considerables (hasta 30 m), por lo que la presencia de arcillas es abundante. Los minerales arcillosos presentes son: esmectita, complejos interestratificados de illita/esmectita (I/E), y trazas de illita (Muestras #9 y #10).

Moore y Reynolds (1989) establecen que los minerales del grupo de la esmectita, como los anteriores, pueden tener un doble origen, ambos muy probables en este caso. En primer lugar como producto del intemperismo de otros minerales arcillosos (illita, clorita, y caolinita), asociado a regiones áridas; o bien a partir de la alteración de vidrio volcánico. En el Mono es evidente la presencia de vidrio (Muestra #3), y que existe una gran abundancia de silicatos (plagioclasas, y feldespatos). Es posible que la transformación a esmectita ocurra a partir del vidrio, plagioclasas y feldespatos (y no necesariamente de otras arcillas); aquí podríamos estar observando un proceso similar a la mineralización de las calizas remplazadas por pedernal, pero en este caso sería de minerales ricos en silicatos alterados a esmectita.

Por otro lado Srodoń (1984), atribuye la presencia de illita a una fuente hidrotermal; y que la presencia de I/E revela que ocurren transformaciones entre dos minerales (I/E a illita), impulsadas por un gradiente geotérmico. El autor afirma que el material ílitico puede presentarse por neofonnación y transformación en ambientes de intemperismo, metamorfismo o ambientes hidrotermales. Así mismo reporta que los feldespatos se pueden alterar a illita, pese a que durante la diagenesis usualmente se alteran a caolinita o albita.

Con esas anotaciones, podemos inferir que la esmectita, illita e I/E, en el área de estudio,

se han podido formar a partir de los sedimentos feldespáticos, ayudados por los eventos hidrotermales de la zona. Hay que considerar además, que las muestras 9 y 10 que presentan illita, esmectita e I/E, se asocian a un plano de falla (Fig. 8 y 9).

Aun más importante Walker (1989), señala que las plagoclasas, hornblenda, feldespatos, biotita y magnetita, son la mayor fuente de metales en depósitos estratiformes asociados a lechos rojos, ya que contienen cantidades traza de elementos lábiles debido a su susceptibilidad a alteraciones diagenéticas y a que se presentan en grandes volúmenes ($\geq 25\%$ de los sedimentos originales), ver Tabla I. Señala que las alteraciones diagenéticas sobre lechos rojos ocurren en dos fases: a) en sedimentos jóvenes superficiales, y b) en sedimentos antiguos profundos.

Los fanglomerados y lodolitas rojas que se han reportado para la cuenca del rancho Santa Rosalita son lechos rojos jóvenes, superficiales, con algunas alteraciones características que coinciden con las que reconoce Walker (1989). En general estas incluyen: disolución de silicatos, remplazamiento de silicatos por esmectita, lixiviación de biotitas, y conversión de magnetita a hematita; de estas solamente las dos primeras se presentan en El Mono.

Es notable la disolución de silicatos y su neoformismo subsecuente hasta pedernal, esmectita, illita o I/E. La lixiviación ocurre principalmente en plagioclasas y en las pocas biotitas presentes, aunque también se observa ligeramente en hornblendas. En cuanto a la magnetita solo podemos decir que se encuentra presente pero muy oxidada, y que no se puede decir nada a cerca de su estado de cristalización.

Lechos grises y precipitación de metales.

En ambos depósitos encontramos la presencia de calizas y/o tobas, las cuales interpretamos como los lechos grises reductores que reportan los modelos. Sólo la caliza basal del Boleo presenta mayor grado de alteración, hasta dolomita (Fig. 11a y 11b) y la precipitación de metales formando una caliza manganesífera (Fig. 13). En particular los lechos grises del

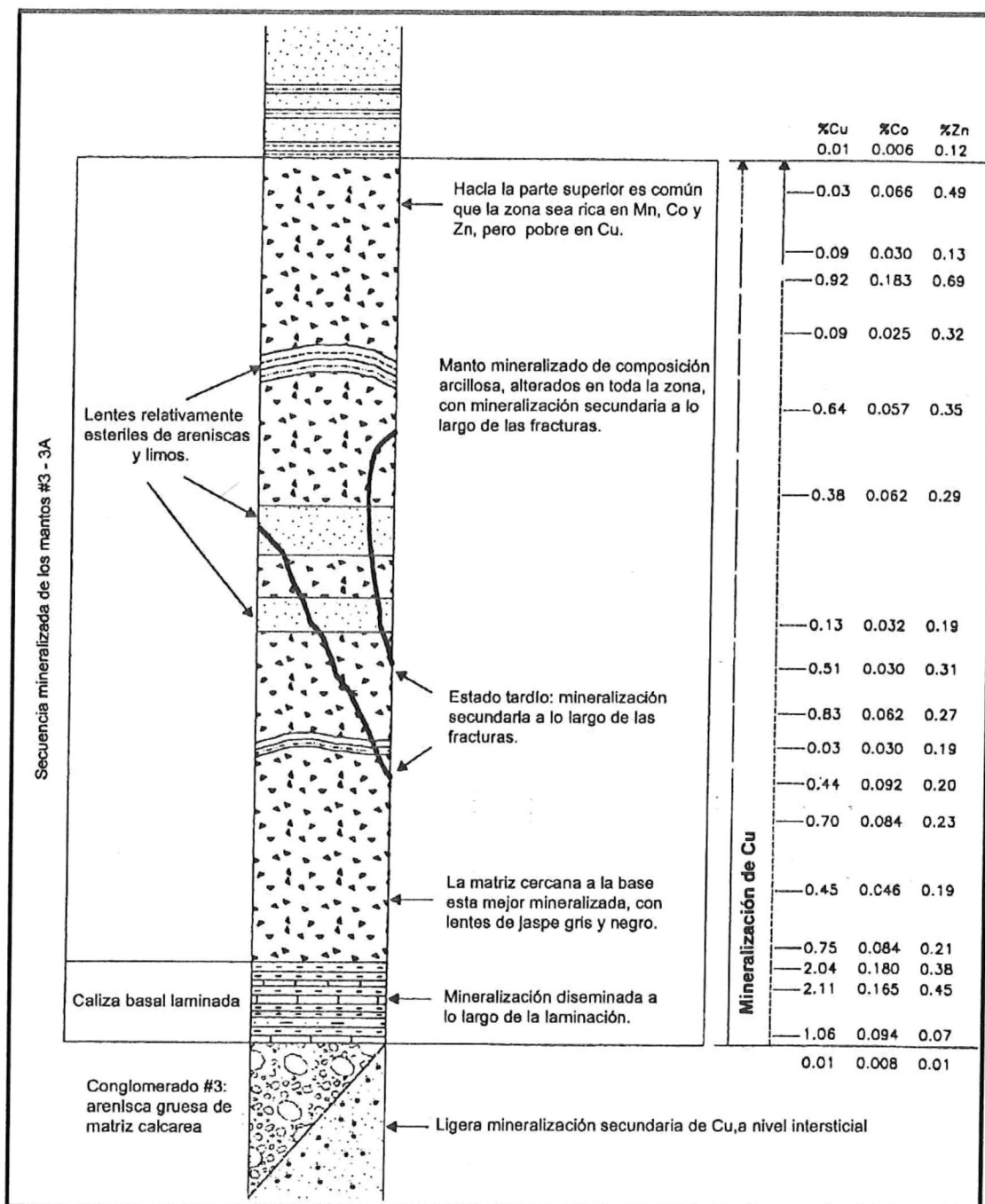


Fig. 13. Detalle de la estratigrafía de los mantos #3 y #3A de la Fm. Boleo. Se observan los rangos del contenido de Cu, Co y Zn a diferentes niveles de la columna. Observece que el %Cu es mayor en la base y menor en la cima (Reporte Técnico para MineraCurator, S.A., cortesía del Ing. Escandón-Valle, 1998).

Boleo son sedimentos impuros de composición mixta, por ejemplo Wilson y Rocha 1955, señalan que van de tobas a calizas tobaceas o dolomitas. Otra característica muy importante es que la caliza basal esta asociada directamente a la presencia de fumarolas (muestra #III), lo cual seguramente ha influido en la depositación de metales (muestra #I), sin embargo su litología esta tan alterada que usando solamente petrografia no se puede diferenciar el tipo de roca original, pero suponemos que son rocas del basamento. Por este patrón de fuertes alteraciones, los fósiles están poco preservados, y también se presentan escasos lentes de pedernal.

En Arroyo El Mono, las calizas sólo han recristalizado la calcita original y su mineralización no precipitó metales sino pedernal. Sin embargo, existen algunas características notables. La primera es que el pedernal se depositó en las calizas y/o sedimentos tobaceos, sustituyendo a los carbonatos de la porción inferior por silicatos. Ledesma-Vázquez y Jonhson, *et al.*, sugieren que dicho reemplazamiento ocurrió en las fases tempranas de la diagenesis de las calizas. Y en segundo lugar, la cuenca en que se depositó era rica en materia orgánica ya que hay evidencias de raíces opalizadas de mangle, *Avicennia, sp.*, y la silicificación de invertebrados e icnofósiles; este tipo de huellas indican manglares, que son ambientes característicos de fondos anóxicos.

Brown 1992, resalta que las variaciones en la composición litológica de lechos grises, por si sola, no juega un papel esencial en la formación de DECS; pero que si son esenciales la presencia de materia orgánica reactiva y de sulfuros, que aseguren la formación y estabilidad de la mineralización. También se requieren de una adecuada permeabilidad.

Evaporitas

En cuanto a la presencia de evaporitas, el depósito del Boleo presenta capas gruesas de yeso en la base. Wilson y Rocha 1955, reportaron espesores de yeso de hasta 80 m ó mas, a partir de núcleos dentro de los distritos Lucifer y Boleo (Fig. 12). Estas capas de yeso son masivas, bandeadas o en grandes cristales de origen secundario; además no tienen una posición fija dentro de los sedimentos basales, sino que más bien pueden estar donde sea: a

veces sobre la caliza basal, directamente sobre el basamento, o intercalada entre la caliza y la brecha basal. Lo anterior demuestra el carácter migratorio de estas capas que aportaron salmueras al sistema. En 1955 se sugirieron dos posibles orígenes para estas capas de yeso: por precipitación a partir de fluidos hidrotermales, o por evaporitas. Actualmente se concluye que las evaporitas fueron el principal proceso formador, debido al volumen, pero al mismo tiempo no se descarta un aporte hidrotermal por la presencia de yeso en la Muestra #II (fumarola).

En arroyo El Mono probablemente no existieron grandes volúmenes de evaporitas, pero si existió un ambiente evaporítico que permitió la formación de cuerpos salinos de dimensiones reducidas. Según Ledesma-Vásquez, *et al.*, 1997, dicho depósito propició la concentración del sílice y su posterior sustitución junto con las calizas, por capas de pedernal. En El Mono, solamente se observaron trazas de yeso en la petrografía, y de halita por observación directa en el campo (muestra #3); o por el contenido de halita que reporta Ledesma-Vásquez (1997) en la DRX de las capas de pedernal.

La importancia de las evaporitas es que son formadoras de las salmueras o fluidos intersticiales, las cuales controlan los cambios de pH y Eh en ambos lechos, estos cambios impulsan la degradación y precipitación de minerales. El factor temperatura juega también un rol igualmente importante.

Salmuera mineralizadora y fluidos hidrotermales.

La salmuera mineralizadora se refiere a los fluidos (cloruros) que finalmente disuelven los lechos rojos y que transporta los metales disueltos de una capa a otra. Involucra evaporitas como fuente de cloruros y como activadoras de los cambios de pH y Eh.

En el Mono la salmuera mineralizadora sólo permitió el reemplazamiento de las calizas y las soluciones salinas por sílice hasta llegar a pedernal. El sílice provenía de la disolución de plagioclasas, feldespatos, cuarzo y vidrio de los lechos rojos. El tipo de alteraciones que presentan plagioclasas, feldespatos y arcillas hacen pensar que los fluidos mineralizantes si han

tenido efecto directo sobre los lechos rojos. El Posible origen de estos fluidos es: 1) fluidos salinos de la superficie calentados a profundidad y que se precipitaron junto con el pedernal, y 2) fluidos hidrotermales, que no sería raro encontrar ya que la cuenca y la zona en general, presentan diferentes manifestaciones. Ambas fuentes, de algún modo, ya habían sido propuestas por Ledesma-Vázquez, *et al.*, 1997. Mas adelante se esquematiza la secuencia de eventos en dos tiempos: antes y después del pedernal (Fig. 14 y 15).

En el Boleo los fluidos mineralizadores eran ricos en metales. Los lechos rojos (areniscas y conglomerados) aportaron gran parte de los metales ya que es visible la alteración del material detrítico lábil (muestra #II y III, fumarola y cinta colorada, respectivamente). Los lechos rojos del Boleo también presentan pedernalización, cloritización y sericitización (Pérez – Segura, 1995).

El tamaño de las evaporitas tiene relación directa con la precipitación de metales y su magnitud. Esto es por que las salmueras son las responsables de transportar los iones metálicos en forma de cloruros, especialmente el cobre (Walker, 1989). En el Boleo la presencia de grandes volúmenes de evaporitas fue un factor favorable para la depositación de metales; en tanto que su escasez en el Mono contribuyó con pocos cloruros disponibles para el transporte de metales.

No se encontraron estudios que diferencien si los fluidos mineralizantes del Boleo, son de origen magmático, metamórfico o ambos.

Otro factor importante para la degradación de minerales y su transporte es la temperatura bajo la corteza. Probablemente la diferencia del grado de mineralización entre estos dos depósitos, se deba a variaciones en las intensidades de los flujos de calor del subsuelo en diferentes épocas y lugares. A simple vista esto se refleja en la presencia del campo geotérmico Tres Virgenes, muy cercano al Boleo; o el campo geotérmico Cerro Prieto en Mexicali, lugar que Brown (1997) señala como zona con alto potencial para la ocurrencia de DECS.

El Boleo y El Mono pertenecen a la misma provincia tectónica, en ambos casos se trata de secuencias sedimentarias cortadas por sistemas de fallas asociadas a la apertura del Golfo.

Sin embargo cada localidad pertenece, estratigráficamente, a edades diferentes del mismo evento. Incluso al comparar Arroyo El Mono con las edades y tipo de depósitos minerales que ocurren dentro de Bahía Concepción, vemos que éstos comprenden minas de manganeso (El Gavilán, Guadalupe y La Trinidad), contemporáneas a la Fm. Boleo del Plioceno Temprano, y que comparten el mismo origen hidrotermal (McFall, 1968).

Tiempo 1

Lechos grises = calizas como medio reductor. No hay información sobre la abundancia de sulfuros, excepto por la presencia de yeso.

Lechos rojos = abanicos aluviales. Estos sedimentos rellenan las cuencas y son producto de la erosión del basamento. Alto contenido en óxidos de hierro.

*Fluidos intersticiales (agua de mar), que proveen de cloruros (Cl⁻).

Basamento: rocas miocénicas de la Fm. Comondú. Basalto y/o andesitas.

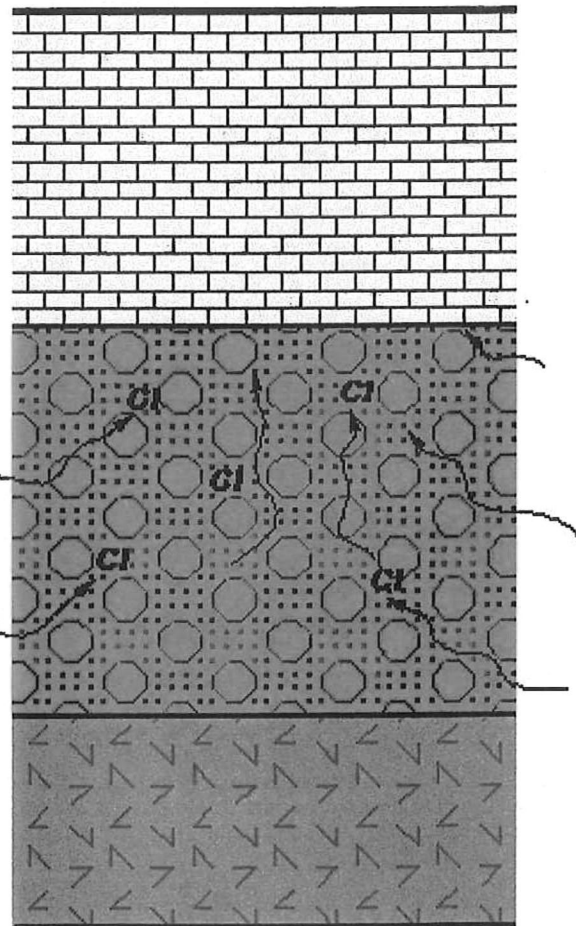


Fig. 14 . Representación del primer ciclo de los sedimentos en Arroyo El Mono. El cual comprende la erosión del basamento, la deposición de lechos rojos y grises, y la presencia de fluidos salinos de origen superficial.

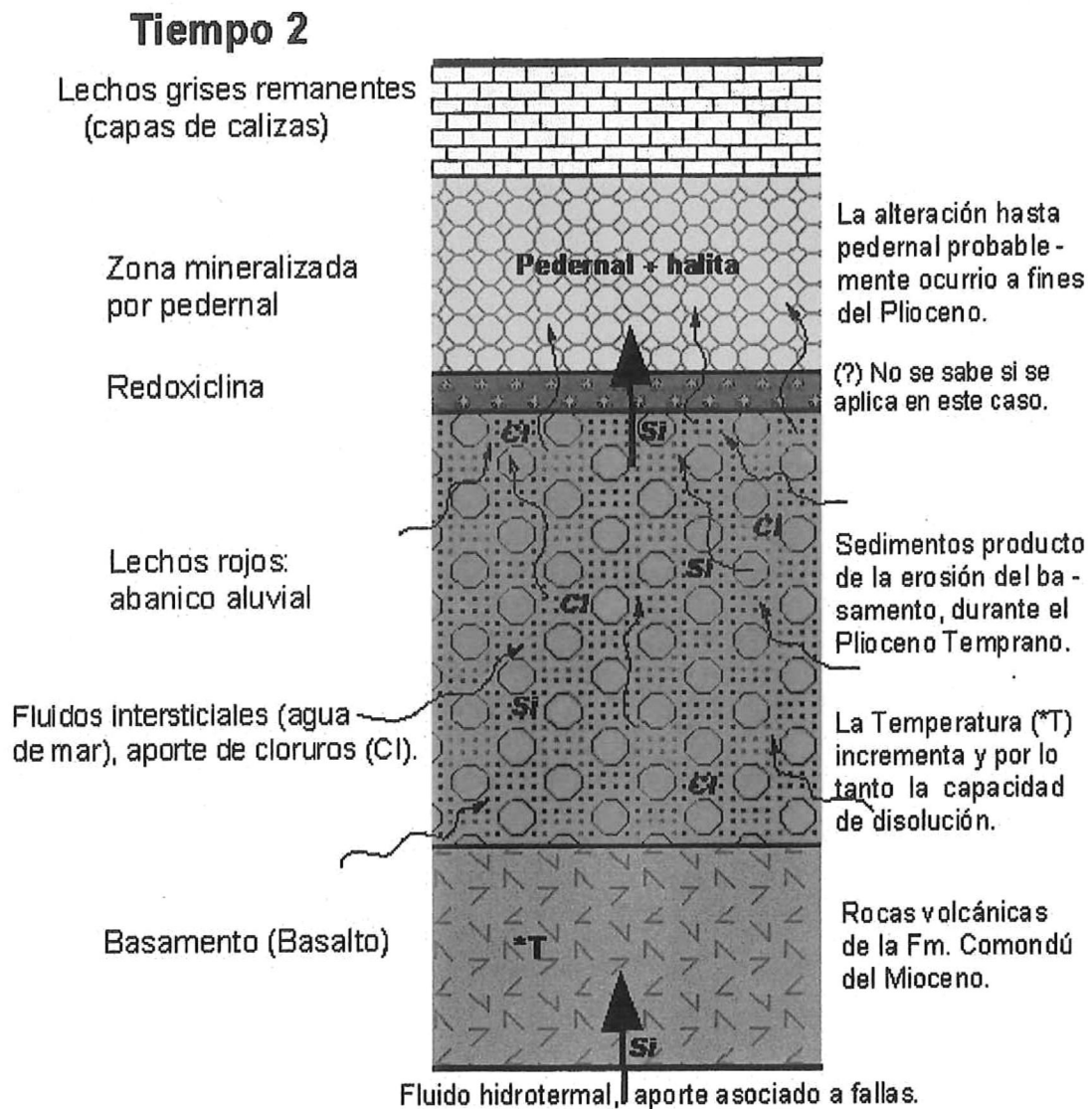


Fig. 15. Representación del segundo evento que permitió la sustitución de calizas por pedernal. Los fluidos mineralizadores pueden haber sido: 1) fluidos salinos de la superficie, y 2) fluidos hidrotermales del interior de la corteza.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la comparación entre los dos depósitos y respecto a los modelos teóricos que los describen, se encontro que:

- 1) En Arroyo El Mono los lechos rojos tienen una composición litológica semejante a los del Boleo. Principalmente incluyen plagioclasas, feldespatos, augitas, y arcillas; los cuales constituyen materiales aptos para la disolución.
- 2) Esencialmente se trata de lechos rojos muy jóvenes y superficiales, ya que las alteraciones sobre los minerales son mínimas en comparación con aquellas que se presentan en El Boleo.
- 3) Los lechos grises parecen tener las características necesarias para constituirse como medios reductores, principalmente por ser una mezcla de calizas y tobas, además de la presencia de materia orgánica.
- 4) La precipitación de pedernal es ya de por sí una manifestación de un proceso de mineralización que remplazo parte de las calizas –tobas (lechos grises) y las incipientes evaporitas.
- 5) En Arroyo El Mono no existen evaporitas, pero el pedernal se depositó gracias a la intervención de fluidos salinos superficiales. La presencia de halita dentro de la estructura del pedernal es clara evidencia de ello.
- 6) El ambiente tectónico y topográfico de ambas cuencas es el mismo. Los dos depósitos pertenecen a la provincia extensional del Golfo de California y presentan cuencas sedimentarias sobre una paleotopografía de mesas y arroyos. El origen de los lechos rojos en ambas cuencas es similar: abanicos aluviales, producto de la erosión de la Fm. Comondú, numerosas fallas se asocian a ambas zonas.
- 7) La intensidad en las alteraciones de los sedimentos y la mineralización en una y otra cuenca no es la misma, porque la temperatura del subsuelo varía de una región a otra.

SUGERENCIAS

El estudio de DECS requiere de una amplia perspectiva ya que muchos aspectos de su geología y génesis son a gran escala (en espacio y tiempo). Autores como Kirkham (1989), señalan que su estudio puede compararse al estudio de los depósitos de petróleo, sólo que los DECS son un área de estudio relativamente nueva y desatendida. Hasta el momento, los estudios más detallados sobre DECS incluyen: la naturaleza de los lechos rojos y lechos grises; las relaciones de porosidad y permeabilidad de ambos; la migración, naturaleza y el tiempo en que los fluidos actúan; el marco tectónico y sedimentario donde ocurren.

Dado que Arroyo El Mono representa sedimentos muy jóvenes, es difícil tener esa perspectiva de la que se hablaba. Sin embargo los futuros estudios deben estar más enfocados a la geoquímica y modelos tectónicos y sedimentarios de cuenca. A corto plazo se puede empezar por estudios a niveles más específicos como:

- 1) Estudios geoquímicos para analizar la composición y contenido de sulfuros en los actuales lechos grises.
- 2) Hacer estudios de permeabilidad en lechos grises y rojos.
- 3) Medir el volumen potencial de lechos rojos, así como una cuantificación precisa de plagioclasas, feldespatos, piroxenos, olivinos y biotitas.
- 4) Buscar otras zonas específicas de alteración asociadas al depósito de pedernal y verificar su naturaleza.

LITERATURA CITADA

- Amaro-Franco, C. E., 1996. Mineralogía y geoquímica en la génesis del pedernal en cuencas someras del Plioceno en el Golfo de California. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. 86 p.
- Barton, M.D. and Jonhson, D.A., 1996. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE – Cu – Au – U) mineralization. *Geology*; march 1996; v. 24; no. 3; p. 259 – 262.
- Brindley, G. W., and Brown, G., editors, 1980. *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification*. Monograph No. 5, Mineralogical Society. London, 495 p.
- Brown, A.C., 1992. Sediment-hosted stratiform copper deposits. *Geoscience Canada*. Canada. Vol. 9 , n 3; p 125 - 141.
- Brown, A.C., 1997. Modern environment for sediment-hosted stratiform copper mineralization, northern Gulf of California Basin. Libro de resúmenes, IV Reunión Internacional sobre Geología de la Península de Baja California, Ensenada, B.C., México.
- Escandón-Valle, F. J., 1995. El yacimiento vulcano-sedimentario del Boleo, Santa Rosalía, Municipio de Mulegé, Baja California Sur. Libro de resúmenes, III Reunión Internacional sobre la geología de la Península de Baja California, La Paz, B.C.S., México. 217 p.
- Glennie, K.W., 1989. A summary of tropical desert sedimentary environments, present and past. In: Boyle, R. W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C. and Kirkhamn, R.V., eds., *Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits: Geological Association of Canada, Special Paper 36*; p 67 – 84.
- Gustafson, L.B., and Williams , N., 1981. Sediment-hosted stratiform deposits of copper, lead, and zinc. *Economic Geology*, 75th. Aniversary Volume, p. 139 – 178.

- Gutiérrez-Sánchez, S., 1994. Origen del pedernal en cuencas someras del Plioceno en el Golfo de California. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. 52 p.
- Holt, J.W., Stock, J.M., Holt, E.W., 1996. Age of the Boleo Formation, Santa Rosalía Basin, Baja California Sur, Mexico. Paper 5. Inédito.
- Hutchinson, C.S., 1983. Economic Deposits and Their Tectonic Setting. John Wiley & Sons. New York. 365 p.
- Jonhson, M.E., Ledesma-Vázquez, J., Mayall, M.A., and Minch, J., 1997. Upper Pliocene stratigraphy and depositional systems: The Peninsula Concepción basins in Baja California Sur, México. In: Jonhson, M.E., and Ledesma-Vázquez, J., eds., Pliocene Carbonates and Related Facies Flanking the Gulf of California, Baja California, México: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 318; p. 57 – 71.
- Kirkham, R. V., 1989. Distribution, settings, and genesis of sediment-hosted stratiform copper deposits. In: Boyle, R. W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C. and Kirkham, R.V., eds., Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits: Geological Association of Canada, Special Paper 36; p 3 – 38.
- Ledesma-Vázquez, J., and Jonhson, M.E., 1993. Neotectonica del área de Loreto – Mulegé. In: Delgado-Argote y Martín-Barajas, A., eds. Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México: Unión Geofísica Mexicana, Monografía 1; p. 115 – 122.
- Ledesma-Vázquez, J., Berry, R. W., Johnson, M. E., and Gutiérrez-Sánchez, S., 1997. El Mono chert: A shallow-water chert from the Pliocene Infierno Formation, Baja California Sur, México. In: Johnson, M. E., and Ledesma-Vázquez, J., eds., Pliocene Carbonates and Related Facies Flanking the Gulf of California, Baja California, México: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 318; p 73 - 81.

- Mayall, M. A., 1993. A comparison of modern and ancient embayments; Mary Creek, St. John, U.S. Virgin Islands, and the Rancho Santa Rosalita Basin, Concepcion Peninsula, Baja California Sur, Mexico. Williams College. Massachusetts. 159 p.
- McFall, C. C., 1968. Reconnaissance Geology of the Concepcion Bay Area, Baja California, México. Stanford University Publications. Geological Sciences. Vol. X, No. 5. 25 p.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C. Jr., 1989. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press. United States of America. 322 p.
- Pérez-Segura, E., 1995. Petrografía de las menas de los yacimientos del Boleo, Santa Rosalía, Baja California Sur, con énfasis en la distribución de cobalto. Informe preparado para Minera Curator, S.A. Hermosillo, Son. 45 p.
- Rendón-Márquez, G., 1995. Técnicas petrográficas para el estudio de rocas y sedimentos en el laboratorio de petrología del CICESE. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas, Serie Geología, CICESE. 33 p.
- Rose, A.W., 1976. The effect of cuprous chloride complexes in the origin of red bed copper and related deposits. Economic Geology; v. 71, p. 1036 – 1048.
- Salas, G.P., 1988. Minería metálica y no metálica. Introducción a la geología de las provincias metalogénicas. En: Salas, G.P., ed., Geología Económica de México. Fondo de Cultura Económica. México; p 231 – 232.
- Skinner, B.J., 1974. Los recursos de la Tierra. Ediciones Omega, S.A. Serie Fundamentos de las Ciencias de la Tierra. Barcelona. 150 p.
- Środoń, J. and Eberl, D.D., 1984. "Illite" in Reviews in Mineralogy Volume 13: Micas. Edited by Bailey, S.W. Mineralogical Society of America. United States of America; p 495 – 544.

- The Open University, 1989. Ocean Chemistry and Deep-sea Sediments. Bearman, G. Editor. Pergamon & The Open University. England. 134 p.
- Walker, T.R., 1989. Application of Diagenetic Alterations in Redbeds to the Origin of Copper in Stratiform Copper Deposits. In: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C. and Kirkham, R.V., eds., Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits, Geological Association of Canada, Special Paper 36; p 85 - 96.
- Wedepohl, K.H., ed., 1969. Handbook of Geochemistry. Vol. II-3, chapter 29: Springer – Verlag, New York; p. D1- D8.
- Wilson, I.F., and Rocha, V.F., 1955. Geology and Mineral Deposits of the Boleo Copper District Baja California, México. Geological Survey professional paper 273. 134 p.
- Zanchi, A., 1993. Structural and Geological Analysis of the Loreto Region (Baja California Sur, México) During Opening of the Gulf of California. Libro de resúmenes, II Reunión Internacional sobre la geología de la Península de Baja California, Ensenada, B.C., México.