

TESIS DEFENDIDA POR
Doris Piñero Lajas
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Antonio González Fernández
Codirector del Comité

Dra. Margarita López Martínez
Codirector del Comité

Dr. Carlos Francisco Flores Luna
Miembro del Comité

Dr. Juan Carlos Herguera García
Miembro del Comité

Dr. Peter Lonsdale
Miembro del Comité

Dr. Luca Ferrari
Miembro del Comité

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
*Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias de la Tierra*

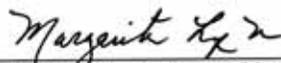
Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

4 de Diciembre de 2008

TESIS DEFENDIDA POR
Doris Piñero Lajas
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



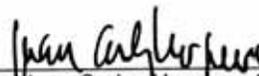
Dr. Antonio González Fernández
Codirector del Comité



Dra. Margarita López Martínez
Codirector del Comité



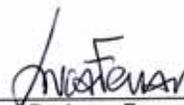
Dr. Carlos Francisco Flores Luna
Miembro del Comité



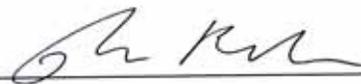
Dr. Juan Carlos Herguera García
Miembro del Comité



Dr. Peter Lonsdale
Miembro del Comité



Dr. Luca Ferrari
Miembro del Comité



Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
*Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias de la Tierra*



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

4 de Diciembre de 2008

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**SÍSMICA DE REFLEXIÓN Y FECHAMIENTO ^{40}Ar - ^{39}Ar DEL BASAMENTO
CONTINENTAL EN EL MARGEN OESTE DE LA CUENCA FARALLÓN (SUR
DEL GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO)**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:
DORIS PIÑERO LAJAS

Ensenada, Baja California, México, Diciembre de 2008

RESUMEN de la tesis de **Doris Piñero Lajas**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada. Ensenada, Baja California. Diciembre de 2008.

SÍSMICA DE REFLEXIÓN Y FECHAMIENTO ^{40}Ar - ^{39}Ar DEL BASAMENTO CONTINENTAL EN EL MARGEN OESTE DE LA CUENCA FARALLÓN (SUR DEL GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO)

Resumen aprobado por:

Dr. Antonio González Fernández

Dra. Margarita López Martínez

El Golfo de California es un rift continental activo con apertura oblicua y desplazamiento lateral derecho. Establecer el límite entre basamento continental y oceánico es uno de los principales problemas que afectan a su estudio debido a la presencia de corteza oceánica de "nueva creación". El objetivo principal de este trabajo ha sido identificar este límite en la parte Oeste de la cuenca Farallón. Para ello se usaron datos de sismica de reflexión multicanal 2D de alta resolución tomados durante la expedición Ulloa 2006, apoyados por la caracterización petrológica y los fechamientos ^{40}Ar - ^{39}Ar de muestras continentales colectadas en las islas Santa Catalina, Santa Cruz y San Diego, y Punta Botella, en la Península de Baja California, y muestras marinas, del margen continental próximo a la isla Las Ánimas (crucero ROCA 2008).

La corteza de "nueva creación" se sitúa en el centro de la cuenca y se identifica principalmente por estructuras cóncavas en los perfiles sísmicos, que se han interpretado como sills. El basamento plutónico continental se localiza en el margen oeste de la cuenca y se reconoce a partir de un reflector continuo de gran amplitud. En el área también aparecen parches de roca volcánica, como el Macizo Farallón-Sur, que se evidencian a partir de discontinuidades en el reflector de gran amplitud.

En la cuenca Farallón se registran evidencias de dos regímenes tectónicos diferentes, el primero relacionado con la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Norteamérica, durante el cual se originó el basamento plutónico. Éste se compone de granodioritas y tonalitas pertenecientes a dos períodos de dicha subducción, Cretácico Superior y Mioceno Temprano. Es la segunda vez que se describe un afloramiento Mioceno de estas características en la Península de Baja California, lo que lo hace importante a la hora de correlacionar márgenes porque las mismas edades se encuentran reportadas para Bahía

Concepción, la cuenca Pescadero, el Sur de Sinaloa y el Norte de Nayarit. El segundo régimen tectónico (extensional) es el relacionado con la apertura del Golfo de California, en esta época se forman la corteza oceánica de "nueva creación" y las dos familias de fallas, antes sólo inferidas por batimetría, que se identifican a partir de los perfiles sísmicos, la primera con dirección NO-SE (Mioceno tardío), y una segunda familia de fallas con dirección NE-SO (Plioceno-Cuaternario). También se reconoce un Reflector Simulador de Fondo posiblemente relacionado con la diagénesis del ópalo, y se reporta la presencia de gas.

Palabras Clave: Sísmica de reflexión, ^{40}Ar - ^{39}Ar , fechamiento, Cuenca Farallón, Golfo de California

ABSTRACT of the thesis presented by **Doris Piñero Lajas** as a partial requirement to obtain the MASTER IN SCIENCE degree in Earth Science with orientation in Applied Geophisic. Ensenada, Baja California, México, December 2008.

SEISMIC REFLECTION AND ^{40}Ar - ^{39}Ar DATING OF CONTINENTAL BASEMENT IN THE WESTERN MARGIN OF FARALLON BASIN (SOUTHERN GULF OF CALIFORNIA, MEXICO)

The Gulf of California is an active continental rift with oblique opening and right lateral displacement. To establish a boundary between continental and oceanic crust is one of the major problems affecting its study due to the presence of "new generation" oceanic crust. The main objective of this work was to identify this limit in the western part of the Farallón Basin. In order to accomplish this goal we used seismic reflection multichannel 2D high resolution data taken during the Ulloa 2006 cruise, supported by the petrological characterization and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of continental samples collected in Santa Catalina, Santa Cruz and San Diego islands, Punta Botella on the Baja California peninsula, and marine samples of the continental margin next to Las Ánimas island (ROCA 2008 cruise).

The "new generation" crust is located in the middle part of the basin and it is identified primarily by plate-shaped structures in the seismic profiles, which are interpreted as sills. The plutonic continental basement is located on the western margin of the basin and is recognized by a continuous high amplitude reflector. There are also volcanic patches in this area, like the South Farallon Massif, which are evident as discontinuities in the high amplitude reflector.

The Farallón Basin is affected by two different tectonic regimes, the first related to the subduction of the Farallón plate under the North American Plate, during which was originated the plutonic basement. It consists of granodiorites and tonalites belonging to two episodes of the subduction, Upper Cretaceous and Early Miocene. It is the second time that an outcrop of the Miocene with these features is described for the Baja California peninsula. It is important to establish the correlation between the margins because the same ages are reported in Concepcion Bay, Pescadero Basin, southern Sinaloa and northern Nayarit. The second tectonic regime (extensional) is related to the opening of the Gulf of California. Then, the "new generation" during which new oceanic crust and two families of faults were formed. These faults, previously only inferred by bathymetry, were here identified from the seismic profiles; the first family of faults has a NW-SE direction and are attributed an age of Late Miocene. The other faults have a NE-SW direction and Pliocene and Quaternary age. A Bottom Simulating Reflector was also recognized, which is possibly related with opal diagenesis. Finally, the presence of gas is also inferred.

A mis padres
A mi abuela
A Javi

Agradecimientos

Agradecer primero a CONACyT, a los proyectos “Sísmica de Reflexión en el Norte del Golfo de California: Cuencas Delfín Inferior y San Pedro Mártir” y “Correlación de Márgenes Conjugadas y Evolución Geoquímica e Isotópica del Magmatismo en las Cuencas del Golfo de California” y al Posgrado de Ciencias de la Tierra por haberme brindado su apoyo durante el transcurso de la Maestría.

A mi comité: Antonio González Fernández, Margarita López Martínez, Carlos Flores Luna, Juan Carlos Herguera García, Peter Lonsdale y Luca Ferrari, por toda la ayuda prestada.

A mis compañeros de campo: Mike, Paula, Jaime Calderón y Andrés Davis, por su gran ayuda en condiciones a veces difíciles.

Al Grupo CANEK y a todos sus integrantes, sobre todo a Julio y Antonio, por su gran apoyo y por todas las enseñanzas.

A los técnicos, investigadores y secretarías de Ciencias de la Tierra, que siempre han estado ahí para que todo saliera bien: Susana Rosas, Víctor Pérez, Gabriel Rendón, Miguel Ángel García, Luis Gradilla, Ramón Mendoza, Daniel Peralta, Víctor Frías, Octavio Meillón, Alex Díaz, a Mario González, Arturo Martín, Alonso Gallardo, John Fletcher, Juan Contreras, Alejandro Hinojosa, Luis Delgado, Jose Manuel Romo, a Conchita Martínez, Martha Barrera, Mari Carmen Pérez e Ivonne Pedrín. Un agradecimiento especial a Sergio Arregui por los mapas y, sobre todo, por la paciencia. Por su apoyo, gracias a Teresa Orozco (UNAM), y al grupo de laboratorio del IPHE. Gracias a Andrés Carbó Gorosabel (UCM) por la inspiración.

A todo el personal de administración, sobre todo a Dolores Sarracino, Ivonne Best, Norma Fuentes y Citlali Romero.

A todos los que han pasado y a los que todavía permanecen en el hogar, por todos los momentos vividos: Neptalí, Omar, Jose, Cristina, Carlos, Fernando, Gema, Alejandro y Marian. A todos los compañeros de CICESE y de otras instituciones que colaboraron para que esta tesis saliera adelante: Jared, Tihui, César, Toño, Felipe, Manuel, Monica, Emilia, Tomás, Gina, Ronald, Juan Carlos, Víctor, Juliana, Raquel, Jazmín, Ricardo, Román, Carlos, Gabi, Nic, Adriana, Xochitl, Rosa, Miguel, Michele, Olga y Mauricio. A Guacho y Jorge Salazar.

A todos los que si por alguna razón me he olvidado de nombrar saben que los llevo en mi corazón.

Y, sobre todo, a mi familia, sin su apoyo no estaría aquí.

CONTENIDO

	Página
Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Contenido.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tablas.....	xiii
Capítulo I. Introducción	1
I.1 Introducción	1
I.2 Objetivos	3
I.3 Descripción de los Capítulos	4
I.4 Alcances y limitaciones del trabajo	5
Capítulo II. Contexto Geológico.....	6
II.1 Área de Estudio.....	6
II.2 Marco Geológico Regional.....	9
Capítulo III. Metodología	14
III.1 Sísmica de Reflexión	14
III.1.1 Método de Sísmica de Reflexión	14
III.1.2 Adquisición de Datos	15
III.1.3 Procesado de Datos	18
III.1.3.1 Procesado Pre-Apilamiento (Pre-Stack)	21
III.1.3.2 Etapa de Apilamiento (Stack)	30
III.1.3.3 Procesado Post-Apilamiento	36
III.1.4 Resolución	38
III.1.5 Consideraciones para la Interpretación de Perfiles Sísmicos	40
III.2 Toma de Muestras en Campo	42
III.3 Método de ^{40}Ar - ^{39}Ar	42
III.3.1 Preparación de las Muestras	45
III.3.2 Irradiación de las Muestras	46
III.3.3 Espectrometría de Masas	47
III.3.4 Presentación de los Resultados	50
Capítulo IV. Resultados	52
IV.1 Tipos de Corteza	52
IV.1.1 Basamento Plutónico	53
IV.1.1.1 Características.....	54
IV.1.1.1.1 Características Batimétricas.....	54
IV.1.1.1.2 Características Sísmicas.....	54
IV.1.1.1.3 Cuencas y Estructuras Principales en el Área.....	55

CONTENIDO (continuación)

	Página
IV.1.1.2 Edad y Características Petrológicas del Basamento	
Cristalino	57
IV.1.1.2.1 Descripción y Edades ⁴⁰Ar-³⁹Ar de las Islas	57
IV.1.1.2.1.1 Isla Santa Catalina	60
IV.1.1.2.1.2 Isla Santa Cruz	63
IV.1.1.2.1.3 Isla San Diego	68
IV.1.1.2.1.4 Punta Botella	70
IV.1.1.2.2 Descripción de las Muestras Marinas	72
IV.1.1.2.3 Otros datos	73
IV.1.2 Basamento Continental de Naturaleza Volcánica	74
IV.1.2.1 Características	75
IV.1.2.1.1 Características Batimétricas	75
IV.1.2.1.2 Características Sísmicas	75
IV.1.2.1.3 Cuencas y Estructuras Principales en el Área	76
IV.1.2.1.4 Reflector Simulador de Fondo	78
IV.1.3 Basamento Oceánico (Corteza Oceánica de Nueva Creación)	79
IV.1.3.1 Características	79
IV.1.3.1.1 Características Batimétricas	79
IV.1.3.1.2 Características Sísmicas	79
IV.1.3.1.3 Cuencas y Estructuras Principales en el Área	81
IV.2 Otros Resultados	82
IV.2.1 Identificación y Correlación de Fallas	82
IV.2.2 Profundidad de Basamento y Espesor de Sedimentos	84
IV.2.3 Presencia de Gas	87
IV.3 Síntesis de los Resultados	88
Capítulo V. Discusión y Conclusiones	89
V.1 Tipos de Basamento	89
V.2 Emplazamiento del Basamento Plutónico (Cretácico Superior y Mioceno Temprano)	91
V.3 Relación con Otros Afloramientos	93
V.4 Direcciones Estructurales Principales	96
V.5 Coincidencia de las Fallas Identificadas con las Interpretadas por Fenby y Gastil (1991)	98
V.6 Apertura de la Cuenca Farallón	98
V.7 El Reflector Simulador de Fondo	99
V.8 Conclusiones	101
Bibliografía	103
Apéndice I. Mapa General de Resultados.....	110
Apéndice II. Localización de las Muestras.....	112

CONTENIDO (continuación)

	Página
Apéndice III. Descripción Petroológica de las Láminas Delgadas.....	114
Apéndice IV. Datos Geoquímicos.....	130
Apéndice V. Edades U-Pb.....	133
Apéndice VI. Experimentos por pasos ^{40}Ar-^{39}Ar	139
Apéndice VII. Descripción de los Perfiles Sísmicos.....	150
Apéndice VIII. Perfiles Sísmicos Interpretados.....	160

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Baja California (México). Con el recuadro blanco se destaca la localización del área de estudio.	7
2	Área de estudio. Como fondo aparece el mapa batimétrico del área. En verde los perfiles sísmicos procesados para este trabajo.	8
3	Mapa tectónico de la región del rift del Golfo de California (tomado de Lonsdale, 1989; Aragón-Arreola, 2006). Las líneas punteadas representan las fallas principales, el trazo grueso las zonas de apertura. El área sombreada representa la Provincia Extensional del Golfo. C denomina las cuencas.	10
4	Las líneas en rojo muestran la trayectoria del barco durante la toma de datos sísmicos colectados en la campaña Ulloa-06. Al fondo el mapa batimétrico.	16
5	Sistema de adquisición marina.	18
6	Líneas procesadas para este trabajo (punteado negro) y mapa de batimetría de la zona. En los cuadros blancos los números generales de las líneas. En la figura de la derecha se puede ver la numeración utilizada durante el procesado. Se recomienda observar esta imagen simultáneamente con la Tabla II.	19
7	Secuencia de procesado utilizada (Modificada de Sheriff y Geldart, 1995)	21
8	Espectro de frecuencias de SU. Las líneas rojas delimitan las frecuencias que contienen energía de reflexión coherente. Por encima de ellas la señal se encuentra saturada y por debajo existe energía de baja amplitud.	23
9	Registro antes y después de realizar el primer filtrado de frecuencias.	24
10	Filtro de frecuencias con ProMAX, antes y después de aplicar el filtro pasabanda. (a) Trazas, (b) Espectro de amplitud, (c) Espectro de frecuencias y (d) Espectro de fase. La imagen superior muestra el registro previo a la aplicación del filtro de frecuencias; la imagen inferior nos lo muestra tras la aplicación de este filtro.	25
11	Espectro f-k en SU. Entre las líneas rojas se encuentra la concentración de energía que nos interesa para el procesado. La señal que se encuentra fuera del abanico se desecha, aunque hay una pequeña franja a los lados de las líneas donde la energía no se elimina totalmente si no que se atenúa.	26
12	Filtro f-K en ProMAX. En líneas negras se representa el trapecio de mayor concentración de energía. La primera figura representa el registro y el espectro f-K antes de aplicar el filtro f-K, en la imagen inferior se pueden observar tras la aplicación del filtro.	27
13	Detalle como actúa la deconvolución a la hora de comprimir la señal	29
14	(A) Autocorrelograma en SU (Antes de aplicar deconvolución y tras aplicar deconvolución). (B) registro sísmico antes y después de aplicar la deconvolución, tras la deconvolución se observa que se ha atenuado la onda directa y se ha comprimido la señal.	30

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
15	Estructura de ordenación por CDP.	31
16	Corrección de NMO. En rojo se muestra la posición de las ondículas una vez reducidas a la vertical.	32
17	Espectro de semblanza en SU. La línea blanca muestra el picado de velocidades seleccionado para corregir las primeras reflexiones. En verde se muestran las velocidades pertenecientes a la múltiple.	33
18	Análisis de velocidad en ProMAX. (a) Espectro de semblanza, (b) Registro de CDP, (c) Corrección dinámica de 5 CDP, (d) Método de “mini-stacks” con NMO de velocidades constantes.	34
19	Modelo de velocidades. Es un ejemplo de un modelo que no está bien conseguido, porque las variaciones horizontales de velocidad tienen que ser más uniformes, por ejemplo la franja de alta velocidad a la altura del CDP 2600 no puede tener una explicación geológica coherente. Incluso hay una variación fuerte de la propagación de las ondas en el agua.	35
20	Ejemplo de apilamiento bruto con SU	36
21	Ejemplo de migración en tiempo de una línea sísmica (ProMAX).	37
22	Modelo de cómo se ha llevado la identificación de fallas y reflectores. En verde y amarillo podemos observar los reflectores, mientras que las fallas se presentan en color negro.	41
23	Secuencia de procesado de muestras con ^{40}Ar - ^{39}Ar	46
24	Flujo de un experimento de ^{40}Ar - ^{39}Ar . En azul el proceso que se está llevando a cabo en cada momento. VTM, VTA, VTB, VTC y VMS representan las válvulas, en color verde significa que están abiertas y en rojo que están cerradas (Modificado de López, Margarita, comunicación personal).	49
25	Tipos de basamento: Plutónico (azul), Macizo Farallón-Sur (naranja) y corteza oceánica de nueva generación (amarillo). En verde aparecen los perfiles sísmicos.	53
26	Ejemplo de basamento acústico identificado como naturaleza plutónica (Este fragmento pertenece al perfil 14_3. Ver Apéndice VIII para una vista más general).	55
27	Diferenciación entre los dos paquetes sedimentarios que hay en las cuencas, están separados con la línea verde. El inferior se encuentra afectado por deformación frágil, que no se aprecia en el superior.	56
28	Cuencas de la región	57
29	Imagen satelital (Landsat) de la Isla Santa Catalina. Con estrellas verdes se marcan las localizaciones de las muestras colectadas.	60
30	Espectro de edad para la muestra SC-17, en verde: biotita; azul y negro: hornblenda.	61

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
31	Diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para SC-17.	62
32	Espectro de edad de dos experimentos en biotita, muestra SC-24. La flecha indica la extensión de la edad de meseta.	63
33	Imagen satelital (Landsat) de la Isla Santa Cruz. Con estrellas se marcan los sitios de muestreo.	63
34	Imagen de la zona milonítica en la isla Santa Cruz	64
35	Espectros de edad de las biotitas de SCR-27 (verde) y SCR-28 (azul y naranja). La flecha indica la extensión de la meseta de SCR-28.	65
36	Espectro de edad de la muestra SCR-27 . Las flechas indican la extensión de la meseta reportada en la tabla V para cada experimento.	66
37	Espectro de edad de las hornblendas SCR-26, SCR-27, SCR-30 y SCR-31.	67
38	Diagrama de correlación conjunto de las muestras SCR-26, SCR-27, SCR-30 y SCR-31, de la Isla Santa Cruz.	67
39	Imagen satelital (Landsat) de la Isla San Diego. Con la estrella verde se marca la situación de la muestra colectada.	68
40	Espectro de edad de los dos experimentos en biotita de SD-25. La flecha denota las fracciones utilizadas para calcular la edad de meseta (2 ^{do} experimento en color morado).	69
41	(a) Diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ con los datos de los dos experimentos realizados en la biotita de la Isla San Diego, (b) Ampliación del diagrama mostrado en (a).	69
42	Afloramiento plutónico de Punta Botella (a la derecha de la foto).	70
43	Espectro de edad de los dos experimentos en biotita de PB-32. La flecha denota las fracciones utilizadas para calcular la edad de meseta (2 ^{do} experimento en color rojo)	71
44	Localización de las muestras de las islas y submarinas.	72
45	Diagrama SiO ₂ contra K.	73
46	Diagrama de elementos traza	74
47	Ejemplo de basamento acústico identificado como de naturaleza volcánica (Este fragmento pertenece al perfil 13_3. Ver apéndice para una vista más general)	75
48	Falla transforme abandonada de Pescadero Norte (Perfil8_1).	76

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
49	Ejemplo de como afectan las corrientes marinas a la sedimentación en esta zona del Golfo de California (Ampliación del Perfil 10_2). En la parte superior se observa el canal en la sección sísmica, mientras que en la parte inferior de la imagen la representación es a partir de datos batimétricos de ecosondas multihaz (la línea punteada marca la trayectoria del perfil 10_2).	77
50	Reflector Simulador de Fondo (línea morada) en el Macizo Farallón-Sur.	79
51	(a) Corteza oceánica de "nueva creación", el basamento acústico se marca con una línea amarilla. (b) Sill afectando a los elementos superiores. Estas figuras son una ampliación del Perfil 21_2.	80
52	Dorsal de Farallón (Sección 15_3)	81
53	Imagen de una falla transforme identificada con sísmica de reflexión (Ampliación del Perfil 10_2)	82
54	Fallas identificadas en los perfiles sísmicos (rojo para inactivas, azul para las que se suponen activas). Con línea punteada se señalan las partes que han sido inferidas por batimetría. En morado se encuentran los lineamientos observados en las islas en imágenes aéreas y satelitales, y en verde se marcan fallas señaladas en otros trabajos (Lonsdale, 1989, Umhoefer et al., 2002 y Fletcher et al., 2003).	83
55	Comparación entre las fallas identificadas en este trabajo (negro) con las inferidas por Fenby y Gastil (1999) a partir de datos batimétricos (rojo).	84
56	Mapa de profundidad de basamento. La escala utilizada se refiere a tiempo doble de viaje (TDDV).	85
57	Mapa de isopacas de sedimentos.	86
58	Arroyo que permite el aporte de sedimentos a la cuenca Las Ánimas.	87
59	Presencia de gas en las cuencas de la región. Esta presencia se infiere las zonas blanqueadas (Ampliación del Perfil 14_3).	88
60	Muestras de rocas plutónicas localizadas en la parte sur de Baja California y en el margen continental. En azul se presentan las muestras del Cretácico, mientras que las muestras del Miceno Temprano aparecen en naranja. Los afloramientos del área de estudio se encuentran exagerados para poder ser representados en la figura.	93

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Parámetros de adquisición de los datos sísmicos	17
II	Número de tiros de cada línea y localización de las mismas.	20
III	Reacciones de interferencia y vida media de los isótopos producidos durante la irradiación de las muestras. Los subíndices de los isótopos de argón identifican su origen.	44
IV	Muestras y fracciones analizadas de los intrusivos por el método de ^{40}Ar - ^{39}Ar	47
V	Resumen de edades de las muestras de Isla Santa Catalina, Isla Santa Cruz, Isla San Diego y Punta Botella (Bt: biotita; Hb: hornblenda; t_i : edad integrada; t_p : edad de la meseta; t_c : edad de la isocrona, MSWD parámetro indicativo de la bondad de ajuste ; n: número de fracciones seleccionadas para obtener dicha edad).	58
VI	Edades de U-Pb	59

Capítulo I

Introducción

I.1 Introducción

Esta tesis forma parte del proyecto CONACyT “Sísmica de Reflexión en el Norte del Golfo de California: Cuencas Delfín Inferior y San Pedro Mártir” que se enfoca en la toma, procesado e interpretación de datos sísmicos; y del proyecto “Correlación de Márgenes Conjugadas y Evolución Geoquímica e Isotópica del Magmatismo en las Cuencas del Golfo de California”, también financiado por CONACyT, en el cual se pretenden entender los procesos geológicos que operan durante la ruptura de la litosfera continental (*rifting* continental).

Los *rifts* continentales son valles angostos limitados por fallas en uno o en ambos extremos (Scholz y Contreras, 1998). La evolución de estos valles promueve la formación de cuencas sedimentarias controladas por fallas. El Golfo de California es una de las dos áreas elegidas por el programa MARGINS, junto con la zona norte y centro del Mar Rojo, para estudiar este proceso. Fue seleccionado, entre otros motivos, por tratarse de uno de los pocos lugares del mundo donde los procesos de apertura activa se pueden estudiar a lo largo de un *rift* completo; este tipo de *rifts* normalmente son de tipo ortogonal, pero en el caso del Golfo de California existe la complejidad añadida de tratarse de un *rift* con divergencia oblicua debido a la fuerte componente lateral derecha que opera en el mismo.

Dentro del estudio del Golfo de California existen dos grandes problemáticas: La edad y la cinemática de las fases de deformación que han llevado a la formación del Golfo. Para comprender más acerca de las mismas hay que saber con exactitud la posición pre-*rift* de la

península de Baja California y conocer la geometría y edad de los sistemas de fallas desarrollados durante el proceso de *rifting*. Con este objetivo, en la zona norte del Golfo, se empleó la correlación de unidades volcánicas y sedimentarias en las márgenes opuestas del *rift* del Golfo de California (Gastil et al., 1981; Oskin et al., 2001), lo que permitió acotar la magnitud y la cronología de las etapas de extensión regional para la zona. Con la vista puesta en este logro nace el proyecto “Correlación de Márgenes Conjugadas y Evolución Geoquímica e Isotópica del Magmatismo en las Cuencas del Golfo de California”, cuyo objetivo principal es reconstruir el proceso de extensión en dos escalas, espacio y tiempo, en dos áreas distintas: el sur del Golfo de California y su margen conjugada en Nayarit-Sinaloa, y en el norte de Baja California, en el área de la isla Ángel de la Guarda. Este trabajo de tesis se centra en la zona sur del Golfo seleccionada para dicho proyecto, donde el estudio de correlación de márgenes permitirá definir el inicio y la evolución de la extensión entre 20 y 6 millones de años (Ma), previa a la separación de la península del continente.

Lo novedoso de la propuesta del proyecto de “Correlación de Márgenes Conjugadas y Evolución Geoquímica e Isotópica del Magmatismo en las Cuencas del Golfo de California” es que integra datos tanto de muestras de rocas marinas como continentales y que se aplican diversas técnicas y metodologías para la caracterización y correlación inequívoca de las unidades volcánicas separadas a través de un sistema de *rift*. El presente estudio se diseñó siguiendo esta línea.

Para la realización de esta tesis se han utilizado muestras continentales colectadas principalmente en las islas pertenecientes a la zona cercana a la localidad de Loreto: Santa Catalina, Santa Cruz, San Diego y Punta Botella, así como muestras submarinas provenientes tanto de los dragados obtenidos durante la operación DANA 2004, como las obtenidas por el robot Jason durante el proyecto ROCA 2008. Además, con el objetivo de utilizar varias técnicas para afianzar los resultados se utilizaron los datos de sismica de reflexión multicanal de alta resolución obtenidos en el proyecto ULLOA 2006, siendo esta técnica la base para la consecución de los objetivos de este trabajo. También se realizó la

cartografía geológica general de las islas, se caracterizaron petrográficamente las muestras colectadas de las unidades de interés, y se realizaron fechamientos tanto de ^{40}Ar - ^{39}Ar , como de U-Pb y análisis químicos de elementos mayores y traza (estas dos últimas técnicas sólo se incluyen como complemento a los datos obtenidos para la tesis ya que no forman parte de los objetivos principales de la misma).

En este proyecto se ha trabajado esencialmente con rocas plutónicas, tanto del Cretácico Superior como del Mioceno, aunándose los esfuerzos de varias instituciones para la consecución de sus objetivos: CICESE, SCRIPPS, UNAM campus Juriquilla y SDSU.

I.2 Objetivos

Una de las motivaciones para realizar esta tesis ha sido realizar un pequeño aporte a la hora de conocer los procesos geológicos que operan durante la ruptura de la litosfera continental y la deformación de márgenes pasivos, así como cubrir en parte el vacío de datos existente en la zona; siendo el objetivo principal de la tesis: Delimitar, en el área de estudio, la zona formada por corteza continental de la formada por corteza oceánica o de 'nueva generación', para lo cual se ha clasificado el tipo de basamento acústico identificado a partir de sísmica de reflexión y se ha realizado una correlación entre la geología de las áreas emergidas y la de las regiones submarinas.

La localización de un límite estructural entre la corteza continental, antigua, y la corteza oceánica, más moderna, es incierto a lo largo de la mayor parte del Golfo debido, sobre todo, a la presencia de un tipo de corteza 'transicional' o de 'nueva generación' (Lonsdale, 1989).

La corteza 'transicional' se forma cuando los espacios formados por la apertura continental se rellenan no sólo de material proveniente del manto sino que lo hacen, en su parte superior, por grandes aportes sedimentarios, mientras que en la parte inferior se rellenan

con intrusiones mantélicas, lo que produce un complejo entramado de diques y *sills* con intercalaciones de sedimentos; esta mezcla hace que no se generen anomalías magnéticas alineadas, lo que dificulta la identificación de este tipo de corteza (Lonsdale, 1989; Moore, 1973; Phillips, 1964). Para efectos de esta tesis la corteza de ‘nueva generación’ se considerará corteza oceánica, sin perder de vista que también está formada por una gran cantidad de sedimentos recientes.

Para la consecución del objetivo principal de la tesis se establecieron una serie de objetivos específicos que se enumeran a continuación:

- 1.- Procesar los datos de sísmica de reflexión multicanal 2D de alta resolución e interpretar sobre las secciones sísmicas las estructuras principales, así como identificar los límites y tipos de basamento acústico.
- 2.- Caracterizar petrográficamente las muestras de rocas plutónicas utilizadas para realizar los fechamientos.
- 3.- Fechar por el método de ^{40}Ar - ^{39}Ar las muestras de basamento (rocas plutónicas) colectadas en las islas.
- 4.- Ligar los datos obtenidos con trabajos previos, y muestras obtenidas en varios cruceros.

Como se mencionó en el apartado anterior, nos hemos apoyado también en la utilización del método de U-Pb para fechar algunas de las muestras de basamento además de la realización de análisis químicos de elementos mayores y traza para identificar la naturaleza del basamento encontrado en las islas.

I.3 Descripción de los Capítulos

La forma en la que se ha redactado la tesis y en la que se van a encontrar los distintos conceptos es la siguiente, a partir de este capítulo.

En el Capítulo II se plantea el contexto geológico tanto regional como local y se va a introducir al lector en el área de estudio. El capítulo III se ha dedicado a la metodología utilizada tanto en la adquisición de los datos sísmicos como en la toma de muestras de roca, describiendo la secuencia de procesado seguida hasta lograr obtener los perfiles sísmicos que se interpretaron. También se menciona cómo se realizó la preparación de las muestras para los distintos análisis que se realizaron y se describe el método seguido durante el fechamiento ^{40}Ar - ^{39}Ar . Mientras, el Capítulo IV ha sido dedicado a los resultados obtenidos tanto en la interpretación de los perfiles de sísmica de reflexión como en la descripción petrográfica de las muestras y los fechamientos de ^{40}Ar - ^{39}Ar . En este capítulo también se incluyen los datos de fechamientos de U-Pb y análisis geoquímicos utilizados como apoyo. Dejando, para el Capítulo V todos los aspectos concernientes tanto a la discusión de los resultados como a las conclusiones obtenidas. Al final del escrito se han añadido una serie de apéndices que se consideran útiles para profundizar en diferentes aspectos mencionados en el resto del documento.

I.4 Alcances y Limitaciones del Trabajo

Este trabajo ha abierto las puertas a futuras investigaciones en la zona tanto en la parte sumergida, en la que se puede realizar una interpretación más minuciosa de los perfiles sísmicos, como en la parte emergida, en la que por medio de visitas posteriores a las islas se puede obtener un mayor detalle en la evolución geológica y estructural de las mismas.

Las limitaciones en este trabajo son, sobre todo, la falta de muestras tanto de pozos como dragados o inmersiones en el área en que se cuenta con datos sísmicos. Estos datos ayudarían tanto a la interpretación de los registros sísmicos como a la correlación entre la zona emergida y sumergida.

Capítulo II

Contexto Geológico

Antes de profundizar en el contexto geológico de la región se prefiere situar al lector en el área seleccionada para el desarrollo del trabajo, así como mencionar algunos de los motivos que propiciaron la selección de esta zona para después, en los siguientes apartados del capítulo, describir la región, su interés y su problemática.

II.1 Área de Estudio

La zona de estudio está situada en la parte sur del Golfo de California (Figura 1), entre los paralelos 24° y 26° de latitud norte (Figura 2). Está conformada por el límite oeste de la cuenca Farallón, y comprende: una parte marina, en la que se ha trabajado con datos de sísmica de reflexión multicanal 2D de alta resolución, tomados por CICESE (México) y Scripps Institution of Oceanography (Estados Unidos) durante septiembre del 2006; y una parte emergida, que comprende las pequeñas islas del sur del Golfo cercanas a las líneas sísmicas (Santa Catalina, Santa Cruz y San Diego) y un lugar en la península, Punta Botella. En estas zonas se realizó un reconocimiento geológico general durante junio del 2007 con el objetivo de localizar basamento de naturaleza continental. Además se colectaron muestras del mismo con el objetivo de conocer su antigüedad utilizando el método de ^{40}Ar - ^{39}Ar .

Algunos de los estudios anteriores que se han llevado a cabo en el área, en cuanto a geofísica se refiere, fueron realizados por Moore (1973) que toma datos de sísmica de reflexión monocanal en todo el Golfo, y Robles-Vázquez (2005) quien estudió la estructura

de la corteza en el área de Baja California Sur, utilizando sísmica de refracción. En el área de geología se cuenta con los trabajos realizados por Drake (2005), Umhoefer et al. (2002) y Dorsey et al. (2001), entre otros, que estudiaron la historia de deformación de la región y su evolución estratigráfica, centrándose en la Península y en las islas del Carmen y San José. Además, el Consejo de Recursos Minerales, realizó la cartografía geológico minera del área en 1999. La escasez de trabajos específicos en la zona fue una de las motivaciones principales para su elección.

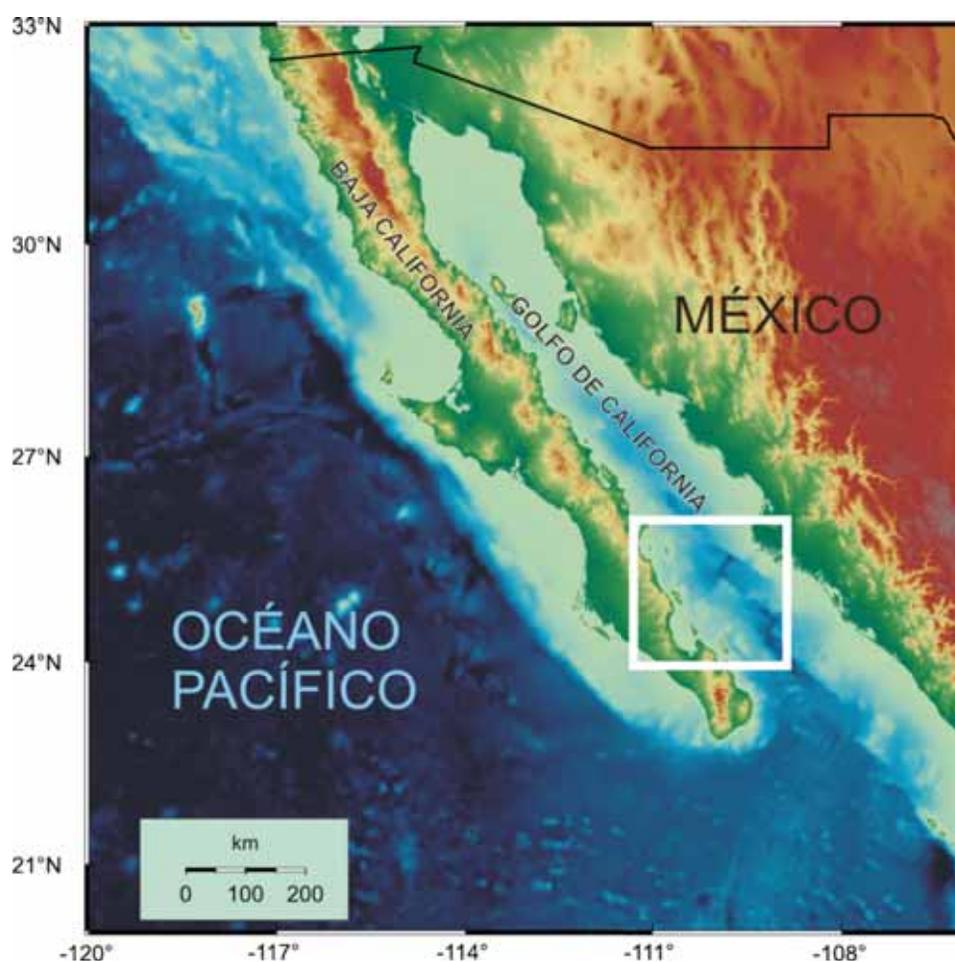


Figura 1.- Baja California (México). Con el recuadro blanco se destaca la localización del área de estudio.

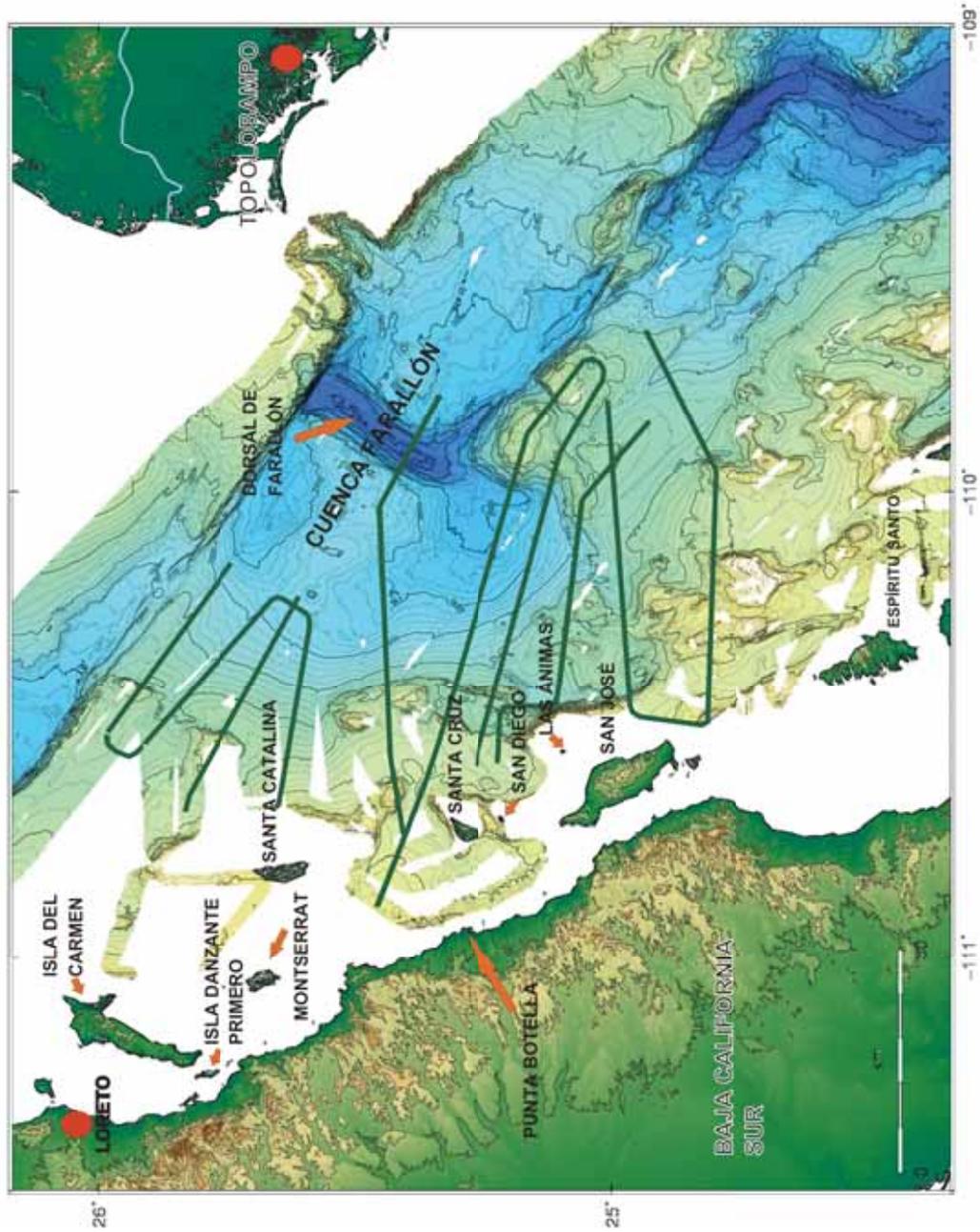


Figura 2.- Área de estudio. Como fondo aparece el mapa batimétrico del área. En verde los perfiles sísmicos procesados para este trabajo.

II.2 Margo Geológico Regional

El área objeto de este estudio pertenece al sistema transforme San Andrés-Golfo de California, de aproximadamente 3000 km de longitud, que se extiende desde el Punto Triple de Mendocino, fuera de la línea de costa de California (EUA), se continúa hacia el SE y finaliza en el Punto Triple de Rivera, que se encuentra en la boca del Golfo de California (México) (Figura 3).

Como se mencionó en el Capítulo I, el Golfo de California es un *rift* continental oblicuo, que constituye uno de los pocos ejemplos recientes de un *rift* continental en la fase inicial de oceanificación. Su arquitectura axial consiste en un arreglo de grandes fallas en escalón con paso derecho ligadas por cuencas *pull-apart* y segmentos cortos de dorsales, que establecen el límite de placas transtensivo entre la Placa de Norteamérica y la Placa Pacífico (Lonsdale, 1989; Fenby y Gastil, 1991; Aragón-Arreola, 2006; Cox y Hart, 1997; Lizarralde et al, 2007).

Con base en modelos cinemáticos globales se ha obtenido que el desplazamiento relativo de la Placa Pacífico respecto a la Placa Norteamérica varía de 56 mm/año (modelo RM2, *Relative Motion 2*, de Minster y Jordan, 1978) a 48.8 ± 1.8 mm/año (DeMets, 1995).

Uno de los motivos por el cual este área concentra el interés de un gran número de investigadores es porque los estilos extensionales dentro de la misma varían tanto longitudinal como transversalmente; a pesar de que la apertura se inició aproximadamente al mismo tiempo en todo el Golfo, hace aproximadamente 12-15 Ma; y a que la cantidad de deformación acumulada en las cuencas es muy similar (Stock y Hodges, 1989; Lonsdale, 1989; Lizarralde et al., 2001; Lizarralde et al., 2007).

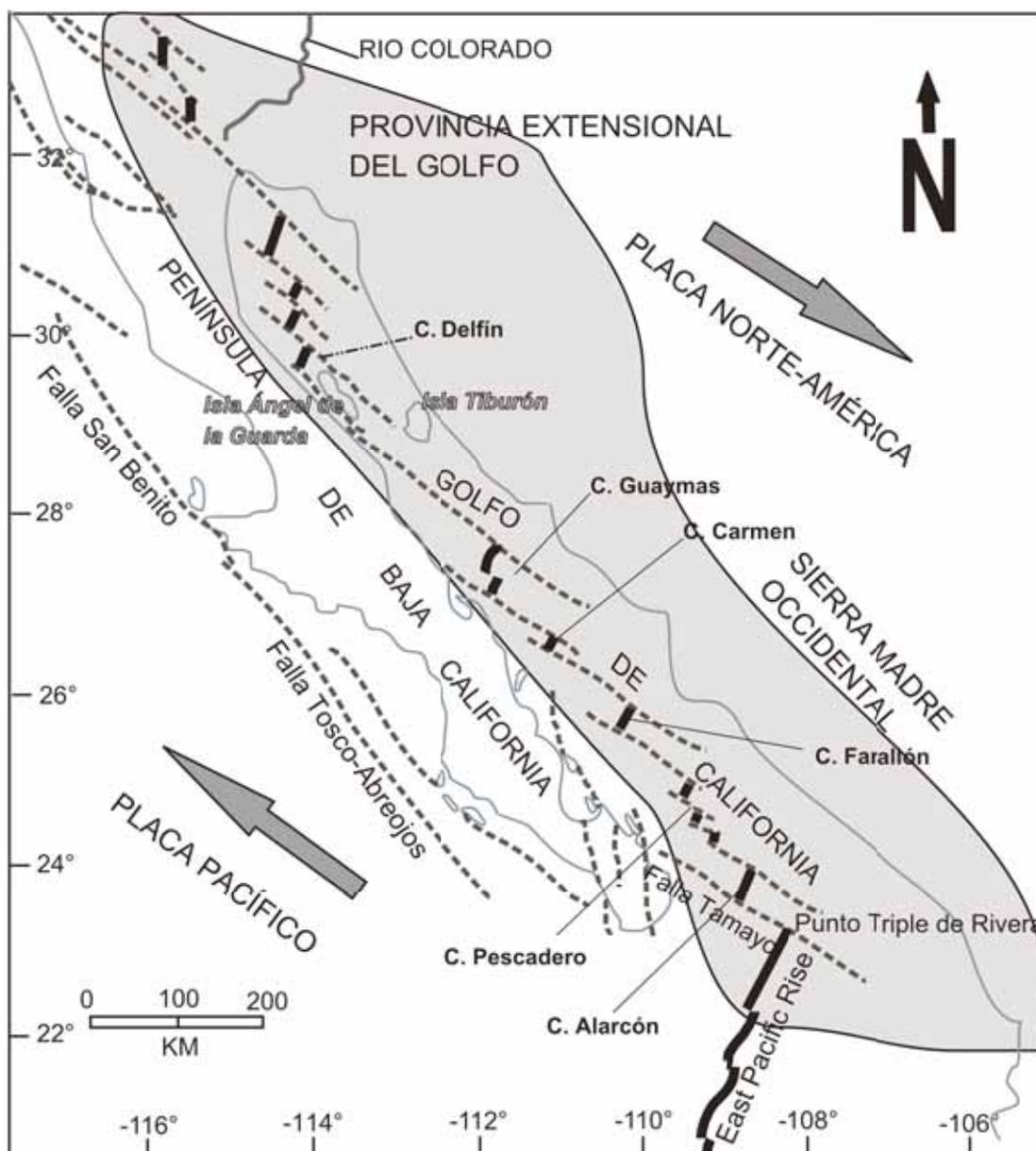


Figura 3.- Mapa tectónico de la región del rift del Golfo de California (tomado de Lonsdale, 1989; Aragón-Arreola, 2006). Las líneas punteadas representan las fallas principales, el trazo grueso las zonas de apertura. El área sombreada representa la Provincia Extensional del Golfo. C denomina las cuencas.

En la zona septentrional del Golfo, al N de las islas de Ángel de la Guardia y Tiburón (Figura 3), la deformación se localiza principalmente en la parte emergida. La constituyen fallas normales activas de alto y bajo ángulo, además de grandes fallas laterales ligadas por amplias zonas de deformación que contienen cuencas *pull-apart*, en donde se apilan varios

kilómetros de sedimentos. El basamento está formado por corteza continental y transicional. En este área se alcanzan más de 5 km de espesor de sedimentos principalmente deltaicos, provenientes del río Colorado (Pérez-Tinajero, 2007; González-Fernández et al., 2005; Persaud et al, 2003).

En la zona centro-sur del Golfo la mayor parte de la deformación se encuentra bajo el nivel del mar. Está compuesta por fallas transformes ligadas por cuencas bien definidas. Estas cuencas contienen centenares de metros de sedimentos y en ellas se presenta abundante actividad magmática. Sólo en la cuenca Alarcón se presenta la formación de piso oceánico nuevo (Aragón-Arreola, 2006; Lizarralde et al., 2007).

En cuanto a las variaciones que se presentan lateralmente; en algunas publicaciones se menciona que el margen E (este) se desarrolla sobre corteza continental más gruesa que el margen oeste y alberga cuencas y fallas abandonadas. Las cuencas activas en el margen central y oeste registran actividad magmática probablemente asociada con la dispersión incipiente de piso oceánico. Estos contrastes geológicos indican la asimetría en la evolución de la actividad tectónica relacionada al proceso de *rifting* (Aragón-Arreola, 2006).

Además de estos cambios morfológicos existen otra serie de complejidades, como son el inicio de la extensión y la cinemática de la misma, que hacen el Golfo aún más interesante. Dentro de este marco existen dos tendencias principales de la comunidad científica para explicar cómo ha evolucionado el Golfo desde el momento de su apertura.

La teoría hasta ahora más aceptada es el modelo propuesto por Stock y Hodges (1989); en este modelo la apertura evoluciona en dos etapas. En la primera etapa o etapa de “Protogolfo” la deformación se divide en dos áreas, una de extensión ortogonal ENE, completamente acomodada por fallamiento normal de rumbo NNW en el área que ocupa el Golfo en la actualidad; y una de movimiento de cizalla dextral en la zona O de la península de Baja California, en la falla de San Benito-Tosco-Abreojos (Figura 3). La etapa de “Protogolfo” comenzó hace aproximadamente 12 Ma y estuvo activa hasta hace 6 Ma. A

partir de este momento la Península de Baja California fue transferida a la Placa Pacífico y comenzó la etapa de extensión oblicua tal y como la conocemos en la actualidad; en ese tiempo la componente dextral del margen de cizalla de la placa salta dentro del Golfo de California, que continúa acomodando la cizalla transtensional (Spencer y Normak, 1979; Hausback, 1984; Lonsdale, 1989 y 1991).

El modelo que se contrapone, en algunos puntos, al modelo anterior aparece en publicaciones recientes y defiende una transtensión generalizada al oriente de la península de Baja California (Gans, 1997; Fletcher y Munguía, 2000; Michaud et al., 2004; Requena-González, 2006; Fletcher et al., 2007). En él se propone que la extensión oblicua comenzó hace 12 Ma y que la falla de Tosco-Abreojos sigue acomodando parte de la deformación entre la Placa Pacífico y la placa de Norteamérica. A esta conclusión se llegó a partir de la identificación de sedimentos recientes fallados en la zona de dicha falla. Esta alternativa implica que la península de Baja California no está acoplada rígidamente a la Placa Pacífico sino que forma una microplaca que se acopló mecánicamente a ella durante el Mioceno Medio (DeMets, 1995; Fletcher y Munguía, 2000; Michaud et al., 2004).

Así como existen dos modelos a la hora de explicar la evolución sufrida por el Golfo, también existen varias opciones cuando se trata de ponerle fecha a las primeras intrusiones marinas. Una de ellas apunta a que las condiciones marinas se establecieron alrededor de ~6.3-6.1 Ma (Oskin y Stock, 2003); pero otros autores sugieren la presencia de sedimentos marinos desde el Mioceno Medio (15.9 Ma), basándose en datos de microfósiles provenientes de la perforación de pozos (Helenes y Carreño, 1999).

Pese a estos conflictos, se puede establecer una evolución petrológica bastante clara a lo largo de toda la región. De manera general, antes de los 12 Ma la geología de Baja California estuvo dominada por rocas producto de márgenes convergentes, mientras que desde los 12 Ma a la actualidad está dominada por rocas producto de márgenes divergentes, es decir, por rocas producto de la extensión del *rift*.

Dentro de la primera etapa se pueden diferenciar varias fases: De los 120 a los 90 Ma se produjo, durante un período de subducción de la placa Farallón que afectó a la mayor parte del margen occidental de Norteamérica, la actividad magmática principal en Baja California. El batolito resultante está zonado, situándose los plutones más jóvenes, grandes, y evolucionados, emplazados a mayor profundidad hacia el E.

Del Cretácico Superior al Oligoceno la mayoría del magmatismo de arco migró hacia el E de la actual Baja California, mientras que las rocas del batolito cretácico experimentaron enfriamiento y exhumación por erosión. La migración sugiere que el magmatismo fue sincrónico a una posible disminución en el ángulo de buzamiento de la Placa de Farallón. La erosión de los batolitos permitió el desarrollo de una plataforma erosiva regional a lo largo del batolito cretácico y la consiguiente acumulación de sedimentos en la región de ante-arco (entre el prisma de acreción y el arco-isla de la zona de subducción) a lo largo del margen O de lo que sería ahora la Península de Baja California. Durante el Mioceno el arco volcánico volvió a migrar hacia el O para retornar la posición que ocupaba en el Cretácico Superior. En esta época (24-12 Ma), mientras cesaba la subducción, se emplazaron rocas volcánicas alineadas cerca del margen E del batolito cretácico en casi toda la longitud de Baja California (Fletcher et al., 2003; Requena-González, 2006); y se formó la Provincia Extensional del Golfo, que controla la morfología de sierras y cuencas en Sonora (Gans, 1997).

Hace aproximadamente 12 Ma se produjo un salto del centro de expansión Pacífico-Farallón hasta una posición localizada al sur del actual Cabo San Lucas y la subducción se detuvo a lo largo de la costa de Baja California. A partir de este momento comenzó la distensión en el margen oriental de la Península, que es posterior al inicio de la distensión en Sonora, y que concuerda, además, con la finalización del volcanismo de arco y la subducción de la placa Guadalupe hacia los 12 Ma. Comenzando así la etapa de *rifting* y la formación de lo que hoy en día conocemos como Golfo de California.

Capítulo III

Metodología

A lo largo de este capítulo se van a exponer las principales características de los procedimientos utilizados para llevar a cabo esta tesis. Estos sistemas se han dividido en dos, metodología empleada en la adquisición y procesado de los datos sísmicos marinos, y la empleada para las muestras de roca colectadas en tierra.

Para el estudio de la parte marina se utilizó el método de sísmica de reflexión multicanal 2D de alta resolución, mientras que en las islas y la península se realizó un reconocimiento de campo general y se colectaron muestras de roca, empleando el método ^{40}Ar - ^{39}Ar para su fechamiento.

III.1 Sísmica de Reflexión

III.1.1 Método de Sísmica de Reflexión

La exploración sísmica o sísmica de exploración es una rama de la Sismología que se ocupa del estudio de la estructura y las propiedades elásticas del subsuelo, empleando como herramienta ondas elásticas generadas artificialmente, que se propagan a través del terreno (Yilmaz, 2001).

La sísmica de reflexión es uno de los métodos utilizados por la exploración sísmica. Su objetivo fundamental es describir la estratigrafía del subsuelo. Para ello se genera un frente

de ondas sísmicas que viaja por el subsuelo hasta encontrar discontinuidades entre capas con diferente impedancia acústica donde aquél es reflejado, registrándose en superficie en una serie de sensores (en este caso se trata de hidrófonos ya que la toma de datos es marina), que se encuentran alineados con la fuente emisora. A partir del estudio de las distintas formas de onda y sus tiempos de trayecto se consiguen obtener imágenes del subsuelo que luego se relacionan con las capas y estructuras geológicas (Yilmaz, 2001).

Cada emisión de la fuente se denomina tiro o disparo, y los datos colectados corresponden al registro de cada uno de los hidrófonos colocados en superficie (en nuestro caso se contaba con 48 hidrófonos por lo que el registro de cada tiro contiene 48 trazas). Estas series de registros de ondas son los que se van a procesar para obtener una sección sísmica, que es una imagen del subsuelo en donde las reflexiones se observan como picos de amplitud que definen las capas reflectoras que después se asociarán a las estructuras geológicas.

El método de sísmica de reflexión se lleva a cabo en tres etapas: Adquisición, procesado e interpretación de datos. A continuación se va a proceder a explicar cada una de estas etapas de forma más detallada. En todo caso, hay que tener en cuenta que estas etapas son interdependientes y que los resultados obtenidos en cada una de ellas dependen mucho de cómo se hayan llevado a cabo las etapas anteriores. Para más información se puede consultar, por ejemplo: Yilmaz, 1987 y Sheriff y Geldart, 1995.

III.1.2 Adquisición de Datos

La toma de datos se llevó a cabo durante el mes de septiembre del 2006, a bordo del B.O. Francisco de Ulloa, propiedad del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada). Esta campaña se realizó en colaboración con Scripps Institution of Oceanography de San Diego (Estados Unidos). Durante la misma se colectaron datos sísmicos a lo largo de más de 2000 km lineales (Figura 4), de los cuales se

han procesado para el presente trabajo alrededor de 800 km. La dirección principal de la toma de datos en esta zona fue E-O, aproximadamente, con el fin de cortar perpendicularmente las estructuras del Golfo.

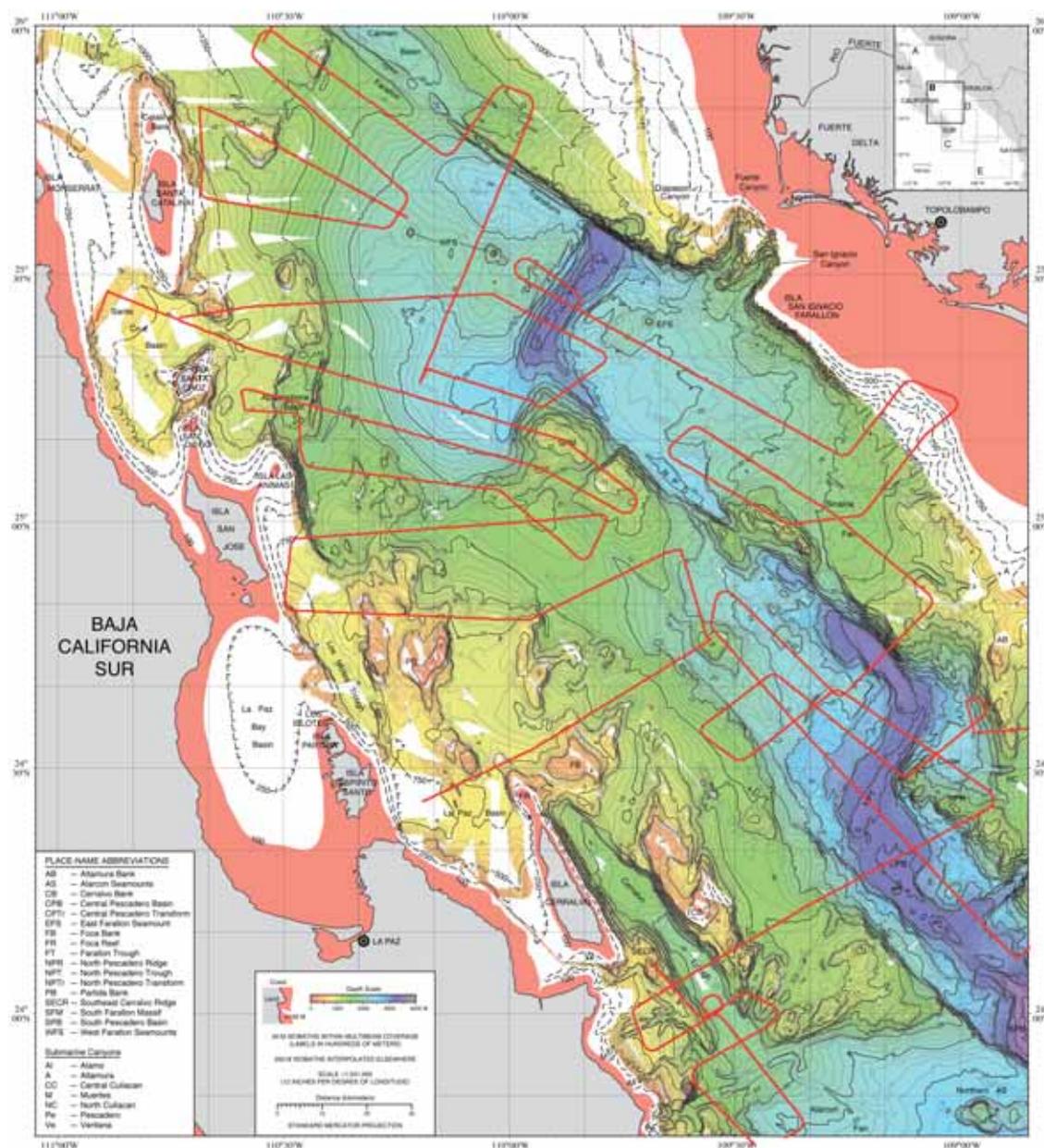


Figura 4.- Las líneas en rojo muestran la trayectoria del barco durante la toma de datos sísmicos colectados en la campaña Ulloa-06. Al fondo el mapa batimétrico.

Se seleccionaron para el procesado los datos pertenecientes al área de la cuenca Farallón ya que es la zona más cercana a las islas del Sur del Golfo, con el propósito de alcanzar uno de los propósitos de la tesis, que consiste en correlacionar el basamento acústico localizado en las líneas de sísmica de reflexión multicanal con el situado en las islas.

Para la adquisición de los datos se utilizó un arreglo marino lineal (Figura 5). Como fuente de energía se empleó un cañón de aire que arrojaba un volumen de 150 pulgadas cúbicas (0.245 m^3) por tiro, con una presión de operación de 2000 psi (13.8 MPa). El cable de registro (es común utilizar el término en inglés *streamer*) tenía una longitud de 600 m y 48 canales (integrados por hidrófonos), con una distancia entre canales de 12.5 m. El periodo de grabación de los datos fue de 4 a 6 s, con un intervalo de muestreo de 1 ms, lo que da un total de 4000 a 6000 muestras por traza. La distancia entre fuentes fue, en la mayoría de los casos, de 37.5 m y la redundancia de un 800% (Tabla I).

Tabla I.- Parámetros de adquisición de los datos sísmicos

Parámetros	Valores
Fuente de energía	Cañón de aire
Longitud de tendido	600 m
Distancia entre fuentes	37.5 m
Distancia entre receptores	12.5 m
Redundancia	800 %
No. De Canales	48
Tiempo de Grabación	4000-6000 ms
Intervalo de Muestreo	1 ms
Numero de muestras por traza	4000-6000

El cañón de aire utilizado fue un cañón G-I (de generación-inyección). Este cañón produce dos burbujas de aire, la segunda más pequeña que la primera, emitida de tal forma que reduce las reverberaciones de aquella, para obtener una señal lo más parecida posible a un pulso único.

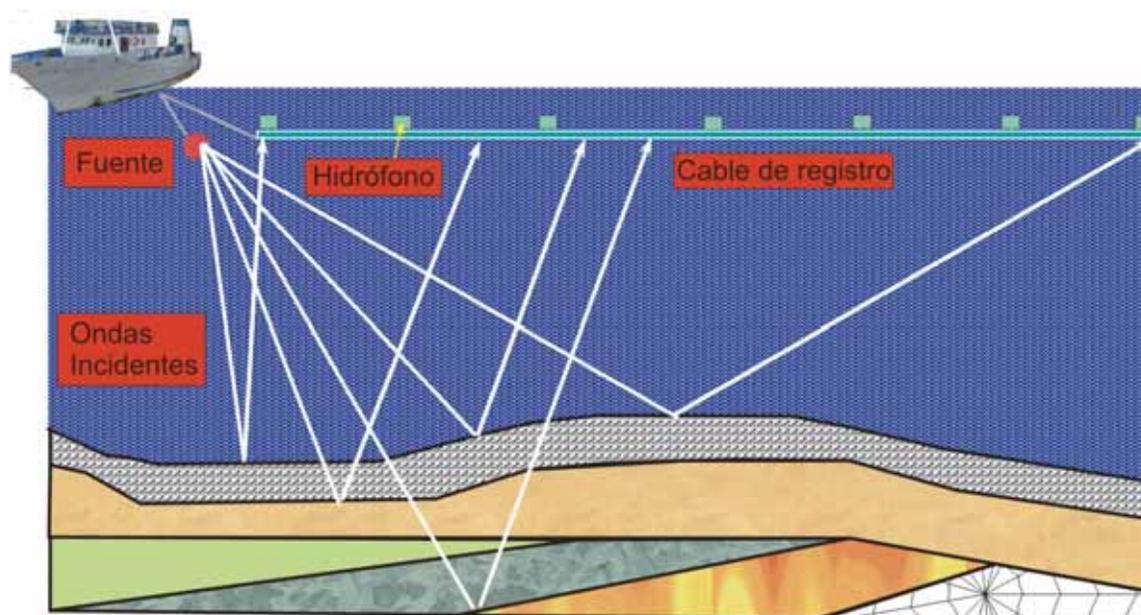


Figura 5.- Sistema de adquisición marina.

El registro de la señal se realizó en una serie de hidrófonos, midiendo variaciones de presión, siendo el cable de registro el arreglo de hidrófonos utilizado. Acto seguido, una vez registrada la señal de forma analógica, se convierte a digital, tomando un número de medidas numéricas por unidad de tiempo, denominándose muestra a cada una de las medidas tomadas.

III.1.3 Procesado de Datos

Los datos tomados fueron divididos en varios tramos, durante el transcurso del crucero, para facilitar su posterior manipulación. Se definió cada transecto como el comprendido entre dos variaciones considerables en la dirección del barco, a cada uno de estos transectos se le denominó línea y fueron nombrados con números consecutivos a partir del 1. Del total de líneas colectadas nosotros trabajamos con 11 (las líneas 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 20, 21, 22 y 23) (Figura 6).

A su vez, por requerimientos del procesado, cada una de estas líneas se dividió en tramos en los que el barco conservaba la misma dirección y velocidad. Esto se hizo con el propósito de mantener constante la distancia entre disparos para evitar distorsiones a la hora de la interpretación. A cada línea a la que se le hicieron subdivisiones se le añadió un guión bajo ('_') al lado del nombre y se numeraron consecutivamente desde el 1 cada una de las divisiones generadas (Tabla II).

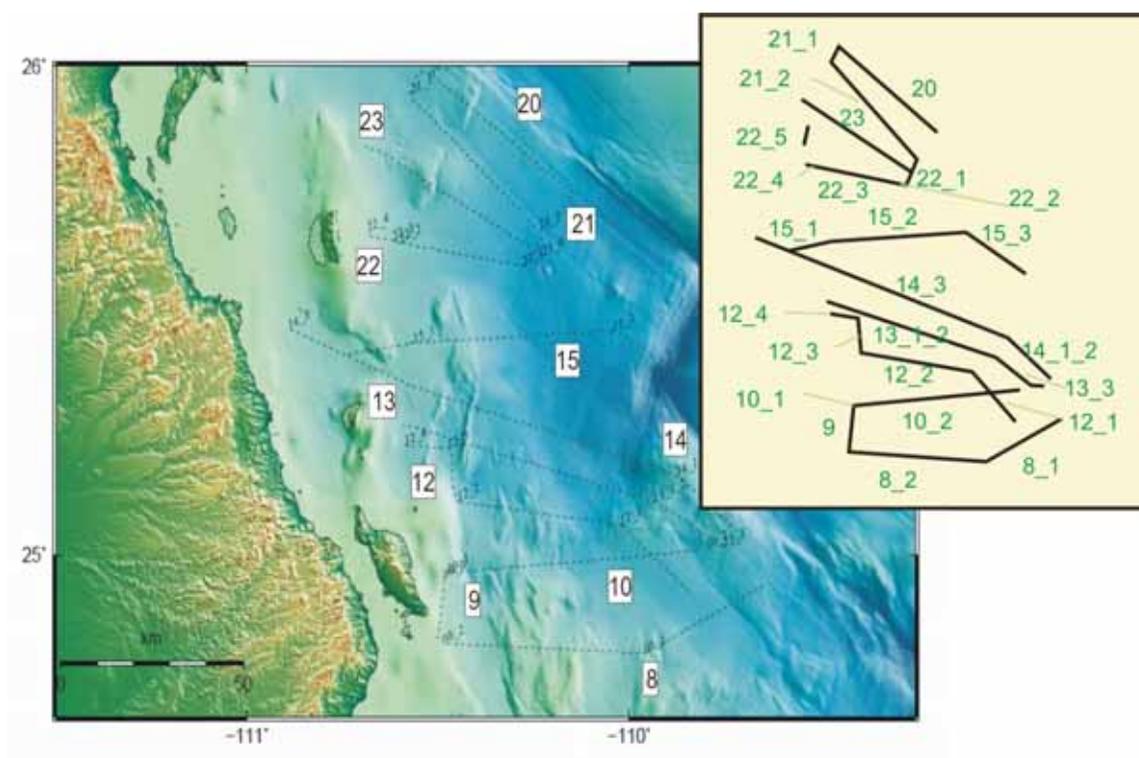


Figura 6.- Líneas procesadas para este trabajo (punteado negro) y mapa de batimetría de la zona. En los cuadros blancos los números generales de las líneas. En la figura de la derecha se puede ver la numeración utilizada durante el procesado. Se recomienda observar esta imagen simultáneamente con la Tabla II.

Además, antes de pasar a la fase de edición de datos, hubo que recuperar de los archivos de navegación los datos pertenecientes a la trayectoria seguida por el barco. Estos archivos contienen las coordenadas geográficas de los puntos de tiro, lo cual permitió referenciar los transectos, especialmente para poder comparar las secciones resultantes con los mapas batimétricos.

Tabla II.- Número de tiros de cada línea y localización de las mismas.

LÍNEA	LONGITUD (Km)	Número de TIROS	LATITUD N INICIAL	LONGITUD W INICIAL	LATITUD N FINAL	LONGITUD W FINAL
8_1	34.7	983	24.93437	-109.65102	24.79740	-109.95670
8_2	53.8	1442	24.79737	-109.95707	24.81710	-110.48623
9	13.8	374	24.83005	-110.49855	24.95147	-110.48297
10_1	1.6	38	24.95305	-110.48237	24.96190	-110.47357
10_2	68.9	1847	24.96200	-110.47323	25.01168	-109.79583
12_1	23.1	624	24.92632	-109.84823	25.06043	-110.02050
12_2	43.4	1172	25.06055	-110.02083	25.10930	-110.44538
12_3	12.4	348	25.10945	-110.44568	25.21647	-110.47238
12_4	11.6	306	25.21660	-110.47272	25.22323	-110.58492
13_1_2	68.6	1850	25.26350	-110.58900	25.10773	-109.93310
13_3	21.3	568	25.10763	-109.93275	25.01640	-109.74953
14_1_2	26.7	698	25.01568	-109.74742	25.16110	-109.87385
14_3	101.9	2927	25.16128	-109.87420	25.46328	-110.89073
15_1	17.5	459	25.41028	-110.73187	25.43340	-110.56250
15_2	52.9	1415	25.43342	-110.56212	25.45800	-110.03907
15_3	28.4	767	25.45798	-110.03868	25.34115	-109.79095
20	45.7	1223	25.74278	-110.15120	25.98392	-110.51775
21_1	7	209	25.98562	-110.52102	25.94303	-110.56807
21_2	45.9	1241	25.94272	-110.56808	25.66520	-110.23177
22_1	10.2	273	25.66303	-110.22983	25.59095	-110.27702
22_2	33.3	888	25.59093	-110.27737	25.63960	-110.59828
22_3	1.9	76	25.63963	-110.59852	25.64233	-110.61630
22_4	7.3	196	25.64242	-110.61663	25.66170	-110.68305
22_5	1.5	40	25.70767	-110.68050	25.72083	-110.67860
23	52.9	1423	25.83517	-110.68682	25.61162	-110.22380

Los datos obtenidos durante la campaña Ulloa-06 se procesaron con dos programas, con el fin de establecer las diferencias entre ambos. Se usó el programa gratuito Seismic Unix versión 39 (al que llamaremos SU para simplificar), desarrollado por el Center for Wave Phenomena (CWP) de Colorado School of Mines (Cohen y Stockwell, 2003). Y, posteriormente, el software ProMAX de la plataforma Landmark obtenido gracias a la licencia universitaria que CICESE tiene con dicha compañía. Se intentaron aplicar los mismos parámetros de filtrado en ambos programas a todos los datos, para obtener una

mejor comparación entre los mismos y entre las distintas líneas. La secuencia de procesamiento utilizada es una secuencia típica de procesamiento de sísmica de reflexión (Yilmaz, 2001; Sheriff y Geldart, 1995) (Figura 7).

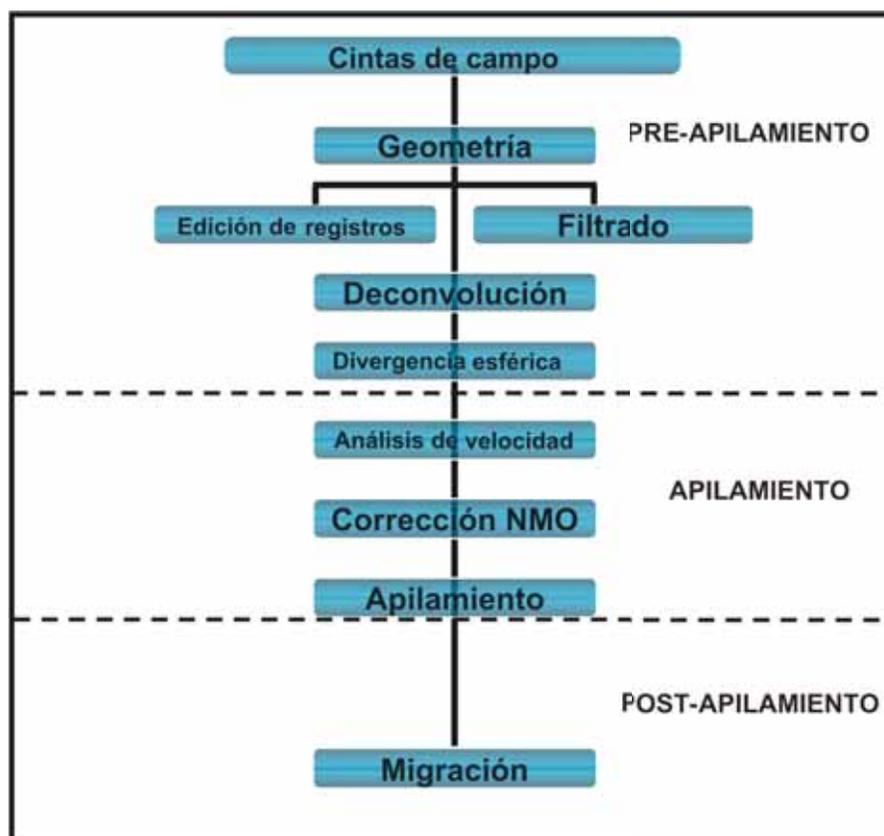


Figura 7.- Secuencia de procesamiento utilizada (Modificada de Sheriff y Geldart, 1995)

III.1.3.1 Procesado Pre-Apilamiento (*Pre-Stack*)

Edición de Registros

Lo primero que se hace una vez que se obtienen los archivos de campo es editarlos. En este caso los datos se encontraban de forma digital en formato SEG-Y (Formato Y de grabación de la Sociedad de Geofísicos de Exploración). Para comenzar el procesamiento con SU hubo

que transformarlos al formato propio de SU. Para el procesado en ProMAX se pudieron mantener los datos en su formato original.

De las 52 trazas grabadas en campo se seleccionaron las 48 que pertenecían a los canales de datos y las otras 4 (que eran trazas de control de funcionamiento) se desecharon.

Para apreciar la calidad de las reflexiones en los registros, se visualizan grupos de tiros donde se detectan las trazas defectuosas o muertas (ausencia de señal), así como ruidos de diferente naturaleza. Para corregir esto se aplica un proceso de eliminación de trazas (*kill*), que consiste en excluir parcial o totalmente aquellas trazas que presentan ruidos fuertes o malas conexiones. En este caso no se utilizó esta herramienta debido a las características de los registros obtenidos.

Además, también se debe eliminar la señal perteneciente a las primeras llegadas de energía sísmica (onda directa) y el ruido de fondo de la columna de agua, para evitar que se superpongan a la señal de las reflexiones. También hay que eliminar, esta vez, de la parte inferior del registro, el ruido de altas frecuencias que puede ser debido a las reverberaciones del tiro anterior. Para enmendar estos problemas se utilizan los procesos denominados eliminación de primeros arribos (en inglés *top mute*, muchos términos en sísmica son más habituales en inglés), y eliminación de arribos finales (en inglés, *bottom mute*). En nuestro caso este paso se aplicó en ProMAX tras realizar un primer filtrado de frecuencias.

Primer Filtrado de Frecuencias

Antes de aplicar cualquier filtro de frecuencias es necesario realizar el estudio espectral (frecuencias y amplitudes) de los registros a fin de caracterizar cada uno de los eventos presentes. Sobre el espectro frecuencia-número de traza se localiza la zona con mayor concentración de energía, es decir, las frecuencias que contienen energía de reflexión coherente; se rechazarán las frecuencias en las que no aparece información o las que son

muy ruidosas (ruido ambiental, de la propela del barco, ruido proveniente de vibraciones del cable de registro, etc.) (Figura 8).

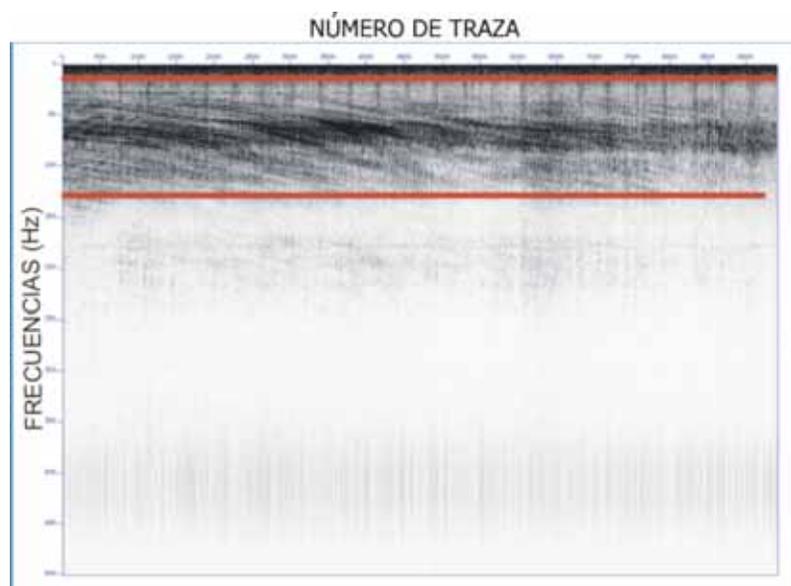


Figura 8.- Espectro de frecuencias de SU. Las líneas rojas delimitan las frecuencias que contienen energía de reflexión coherente. Por encima de ellas la señal se encuentra saturada y por debajo existe energía de baja amplitud.

Tras realizar el estudio espectral se decidió aplicar un filtro pasabanda trapezoidal de tipo Ormsbry, de corte senoidal, en las frecuencias 21, 26, 135 y 155 Hz. Al seleccionar las frecuencias de corte se tuvo en cuenta que en los bordes del trapecio las frecuencias no se eliminan drásticamente si no que se atenúan. Al aplicar este filtro se consiguió eliminar especialmente el ruido producido por frecuencias bajas (Figura 9).

En ProMAX (Figura 10) es mucho más amigable la selección de los parámetros, ya que permite visualizar la señal simultáneamente con diferentes representaciones. Se pueden ver simultáneamente el espectro de frecuencias, las trazas pertenecientes a un tiro, un diagrama intensidad de frecuencia-frecuencia y un diagrama de fase-frecuencia. Otra de las ventajas de ProMAX es que permite ver estos diagramas para todos los tiros de forma rápida; mientras que con SU hay que manipular un *script* (pequeño programa de texto formado por

mandatos simples que automatiza ciertas tareas sencillas) cada vez que se quiere graficar algo diferente. Por lo tanto ProMAX permite realizar un mejor reconocimiento de toda la señal, para elegir los mejores parámetros de aplicación para todos los datos.

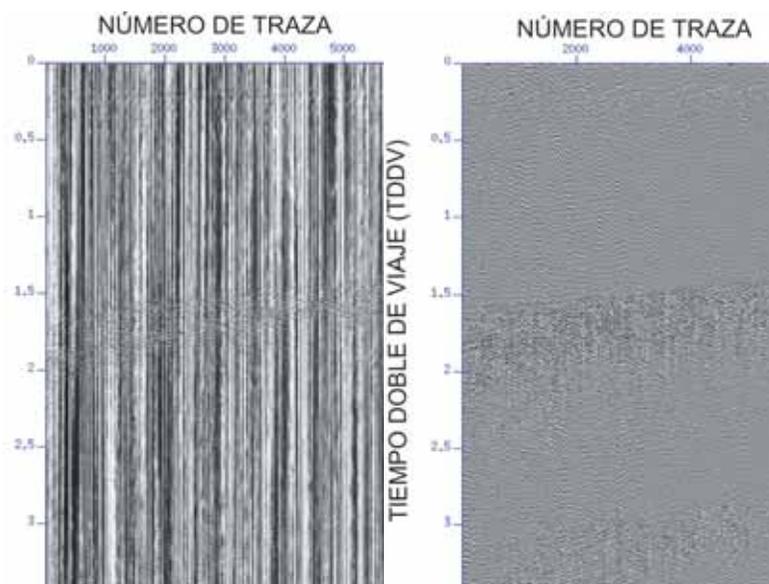


Figura 9.- Registro antes y después de realizar el primer filtrado de frecuencias.

En los resultados que se muestran en las figuras 9 y 10 se puede observar una disminución significativa de las amplitudes de la onda directa (primer arribo y reverberaciones posteriores de la fuente), así como una mejor definición de las reflexiones. Asimismo algunas bandas de baja frecuencia presentes en las secciones originales se atenúan considerablemente.

Filtro f-k

El filtro f-k es útil para eliminar el ruido coherente que se presenta con una tendencia lineal, se le conoce también como filtro de velocidad o de pendientes. Con él se pueden discriminar eventos por estar alineados según las rectas cuyas pendientes definen las distintas velocidades (Yilmaz, 2001).

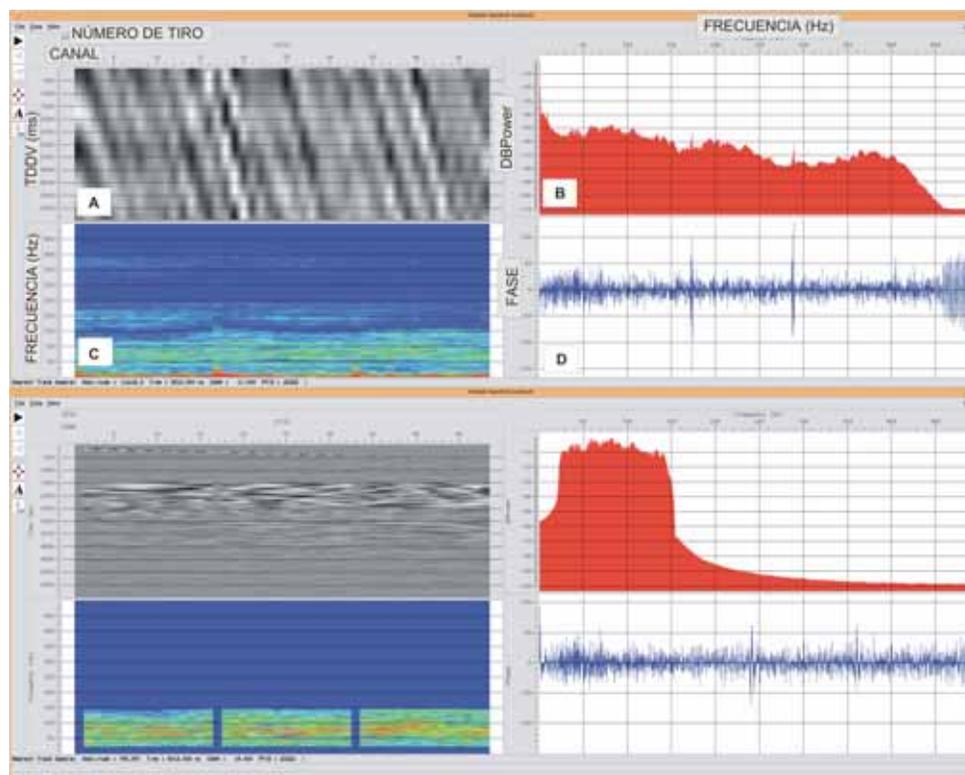


Figura 10.- Filtro de frecuencias con ProMAX, antes y después de aplicar el filtro pasabanda. (A) Trazas, (B) Espectro de amplitud, (C) Espectro de frecuencias y (D) Espectro de fase. La imagen superior muestra el registro previo a la aplicación del filtro de frecuencias; la imagen inferior nos lo muestra tras la aplicación de este filtro.

Este filtro permite eliminar ondas guiadas, atenuar refracciones, etc., además de permitir atenuar el aliasing espacial, ocasionado por un muestreo espacial insuficiente de las altas frecuencias durante la etapa de adquisición de datos; este tipo de ruido se evidencia por una repetición de las pendientes en la región opuesta del espectro (Yilmaz, 1987). Los eventos de baja velocidad se observan a ángulos menores, mientras que las reflexiones de mayor velocidad, se localizan en sectores angulares mayores (Figura 11).

En SU este filtro sólo se puede aplicar en forma de abanico (Figura 11), mientras que en ProMAX se puede seleccionar con un trapecio el área donde se localiza la concentración de energía mayor, por lo que se puede constreñir mejor la señal (Figura 12). Sin embargo, se presenta el inconveniente de que el tiempo de cómputo es mayor que en SU.

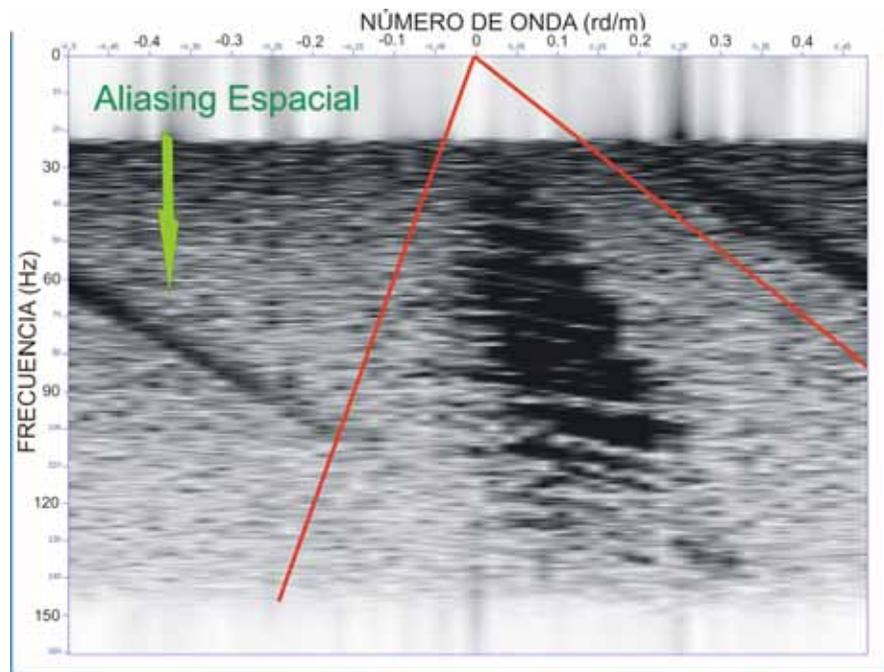


Figura 11.- Espectro f-k en SU. Entre las líneas rojas se encuentra la concentración de energía que nos interesa para el procesado. La señal que se encuentra fuera del abanico se desecha, aunque hay una pequeña franja a los lados de las líneas donde la energía no se elimina totalmente si no que se atenúa.

En SU las pendientes del filtro se calcularon a partir del origen (0,0) del espectro f-k y un punto cercano a la región afectada por aliasing, empleando la fórmula de la pendiente de una recta:

$$m=k/f \quad (1)$$

siendo k en número de onda, y la f la frecuencia del punto sobre el espectro f-k.

Una vez aplicado el filtro se observa una atenuación de la onda directa y una mejor definición de las reflexiones más superficiales (Figura 12), además de haberse eliminado el efecto del aliasing espacial. Al aplicar este filtro se introduce ruido de alta frecuencia que debe ser eliminado a posteriori con un filtrado de frecuencias pasa-banda.

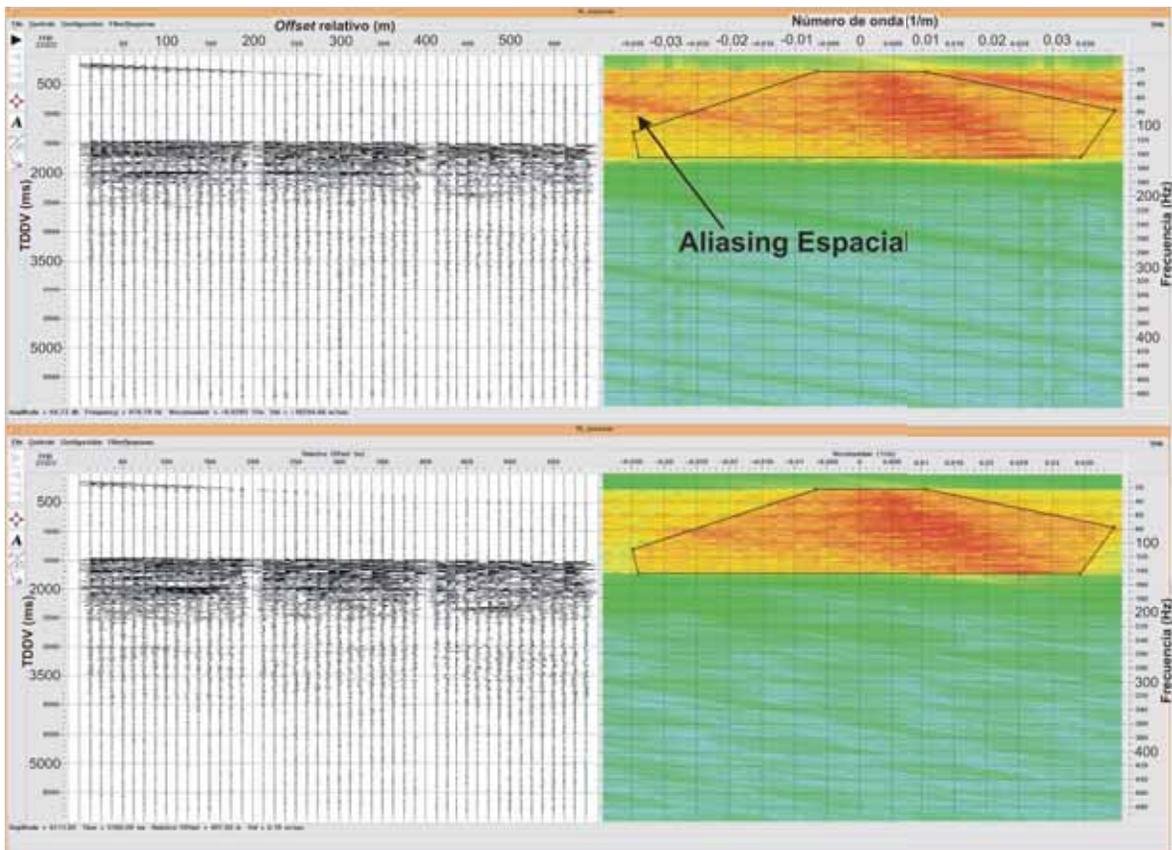


Figura 12.- Filtro f-K en ProMAX. En líneas negras se representa el trapecio de mayor concentración de energía. La primera figura representa el registro y el espectro f-K antes de aplicar el filtro f-K, en la imagen inferior se pueden observar tras la aplicación del filtro.

Geometría

La geometría se aplica para localizar geográficamente la posición de cada disparo y de cada traza, con el objetivo principal de calcular la posición de los CDP (siglas en inglés de Punto Común en Profundidad, se profundizará en este tema en el apartado III.1.3.2). Para ello es esencial definir correctamente las coordenadas (latitud, longitud y altitud) de cada una de las estaciones (fuente y receptores). En nuestro caso la altitud es constante ya que se trata de un sistema de adquisición marina y se toma como referencia el nivel del mar.

Divergencia Esférica

Es un fenómeno físico causado por el aumento paulatino del tamaño del frente de ondas a medida que éste se aleja de la fuente. Siendo, la amplitud de la señal que se registra de menor a mayor *offset* (distancia fuente-receptor) y a mayor tiempo de viaje. Los datos deben ser corregidos para recuperar o minimizar esta pérdida de amplitud.

Según McQuillin et al., 1979, cuando se considera un medio con velocidad constante, la amplitud es inversamente proporcional al *offset*. No obstante, la velocidad del medio suele aumentar con la profundidad por lo que la recuperación de amplitudes involucra el uso de un modelo de velocidades. Debido a la ausencia de velocidades del terreno en esta etapa del proceso, la corrección inicial se efectuó empleando una velocidad de 1500 m/s que corresponde a la velocidad de las ondas P en el agua. Después del primer análisis de velocidad se realiza una segunda iteración para mejorar la corrección de este efecto.

Al aplicar la corrección por divergencia esférica, se incrementa la amplitud de la señal a tiempos mayores, mientras se disminuye para aquella situada a tiempos menores.

Deconvolución

Para empezar, hay que tener en cuenta que un sismograma puede ser considerado como la convolución de una ondícula sísmica proveniente de la fuente con la respuesta de la Tierra a ese impulso. La respuesta a un impulso de la Tierra es lo que se registraría si la ondícula fuera sólo un pico (Yilmaz, 1987). Pero, esto no es así, ya que la ondícula no está formada por un único pico (*spike*) sino que tiene reverberaciones (ruido de menor amplitud) posteriores al impulso principal.

A nosotros nos interesa aislar la parte de la señal que proporciona el terreno. Para ello se usa la deconvolución, que es el proceso inverso de la convolución, su objetivo último es

extraer la función de reflectividad de la traza sísmica, para lo cual se comprime la ondícula procedente de la fuente, aumentando así la resolución temporal (Yilmaz, 1987) (Figura 13).

Para seleccionar las partes de los registros sobre los que se va a aplicar la deconvolución, hay que llevar a cabo la autocorrelación de los sismogramas (autocorrelograma) (Figura 14). Con el autocorrelograma se consiguen separar las componentes periódicas de las no periódicas. Las componentes periódicas se consideran debidas a la fuente, mientras que las no periódicas se atribuyen al efecto, supuestamente aleatorio, de los reflectores del subsuelo (Yilmaz, 1987).

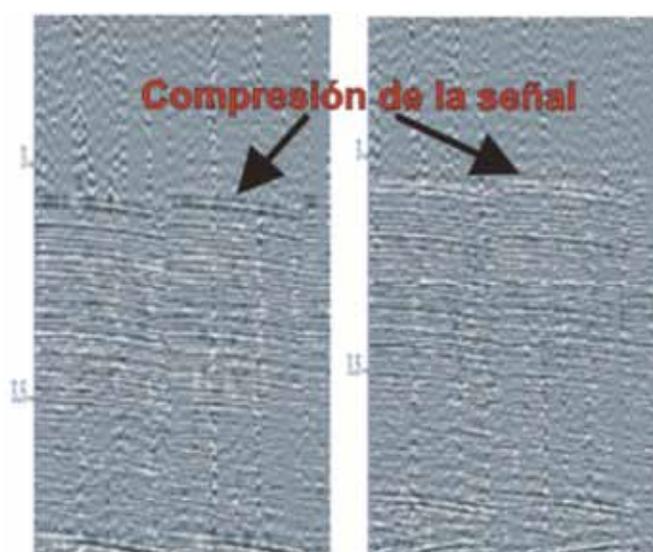


Figura 13.- Detalle como actúa la deconvolución a la hora de comprimir la señal

Las componentes periódicas que se identifican en un autocorrelograma también pueden ser debidas a las ondas múltiples. Éstas son eventos (frentes de onda) que han sufrido más de una reflexión. Son registradas con igual frecuencia pero menor amplitud y un tiempo de retardo mayor que la onda que incidió primero (Sheriff y Geldart, 1991). Y, al tratarse también de componentes periódicas, pueden ser atenuadas durante este proceso.

Para este trabajo la deconvolución solamente se aplicó para eliminar las reverberaciones de la fuente. Las múltiples no fueron atenuadas porque no interfieren con el resto de la señal ya que aparecen a tiempos muy altos.

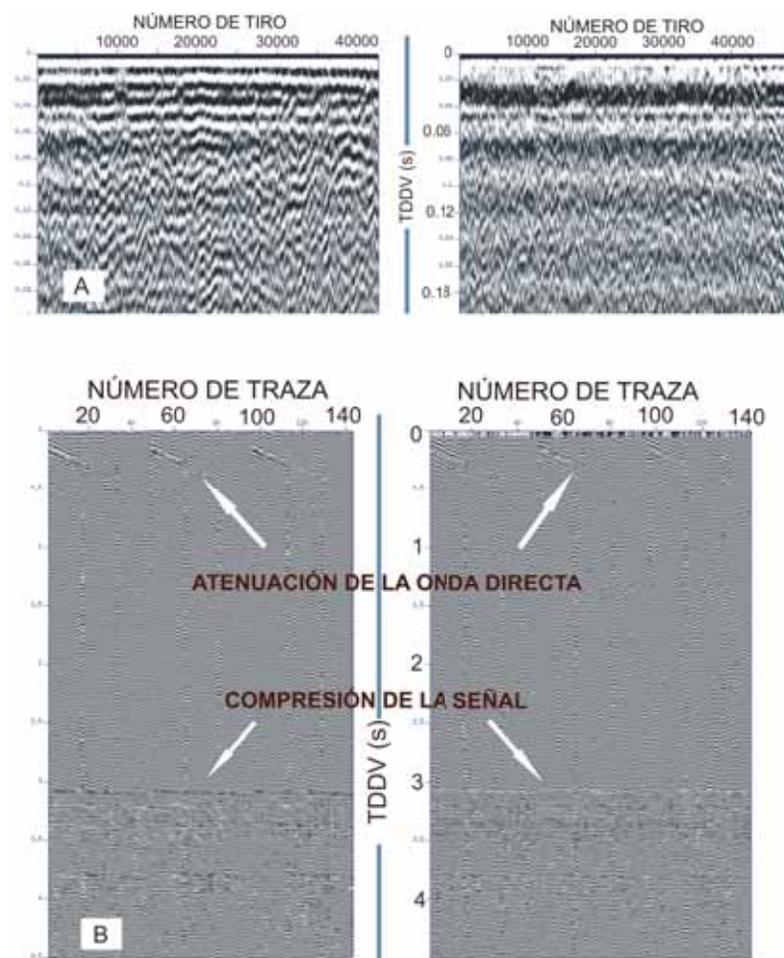


Figura 14.- (A) Autocorrelograma en SU (Antes de aplicar deconvolución y tras aplicar deconvolución). (B) registro sísmico antes y después de aplicar la deconvolución, tras la deconvolución se observa que se ha atenuado la onda directa y se ha comprimido la señal.

III.1.3.2 Etapa de Apilamiento (*Stack*)

El objetivo último de esta etapa es la suma de la señal de las trazas que tienen un mismo punto de reflejo en profundidad para mejorar la calidad de la señal. Al término de la misma se habrá conseguido atenuar significativamente el ruido no coherente además de una gran

parte del ruido coherente, como podrían ser las múltiples. Para llegar a esto se siguieron los procesos que se narran a continuación.

Ordenar Trazas por CDP

Para poder apilar las trazas, primero hay que agrupar las que, por geometría, pertenecen al mismo CDP (siglas de *Common Depth Point* o Punto Común en Profundidad) (Figura 15), que hasta ahora estaban ordenadas por disparo. El CDP se supone, por simplicidad, la proyección vertical del CMP (*Common Mid Point* o Punto Medio Común), como en el caso ideal de capas planas, horizontales y homogéneas (Yilmaz, 1987). El CMP se encuentra en superficie en el punto medio entre la fuente y el receptor.

Todas las trazas pertenecientes a un mismo CDP se reflejan aproximadamente en los mismos puntos y, por tanto, pueden sumarse para obtener una traza resultante (Traza CDP) que tendrá una mejor relación señal/ruido.

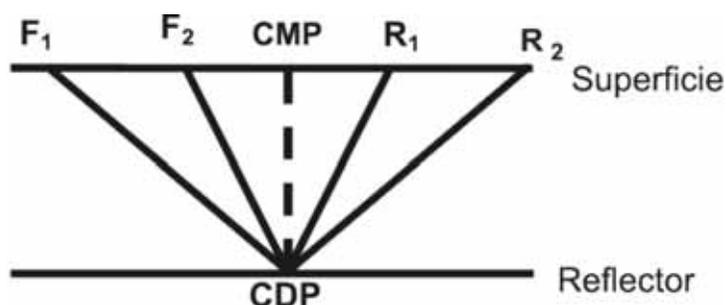


Figura 15.- Estructura de ordenación por CDP.

Corrección de NMO

De acuerdo con la teoría de propagación de ondas, se sabe que los tiempos de reflexión se incrementan con el *offset*, esto es conocido como el efecto de NMO (*Normal Move-Out*); y se elimina aplicando la corrección correspondiente (Liner, 2004; Yilmaz, 2001). En

general, el objetivo de esta corrección es el de simular que los sismogramas fueron adquiridos con *offset* igual a cero (Figura 16) (Yilmaz, 1987).

La corrección de NMO utiliza un modelo de velocidades estimado en el análisis de velocidad (la forma de realizar este modelo se explica en el apartado siguiente). Si el modelo es correcto, los registros resultantes tendrán todos los reflectores corregidos de hipérbolas de reflexión a la horizontal (considerando capas planas). Por lo tanto todas las trazas pertenecientes a un mismo CDP estarán en fase y se podrán sumar.

Al hacer esta corrección las múltiples, que tienen una desviación mayor que las reflexiones primarias no son corregidas completamente al no quedar alineadas, por lo tanto se atenúan al ser sumadas.

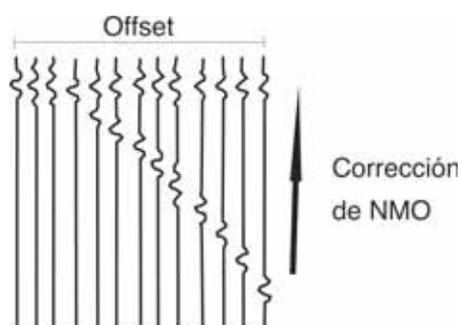


Figura 16.- Corrección de NMO. En rojo se muestra la posición de las ondículas una vez reducidas a la vertical.

Análisis de Velocidad

El análisis de velocidad se hace para poder efectuar la corrección de NMO. Se trata de identificar las velocidades del subsuelo que mejor corrigen las trazas para llevarlas a *offset* cero, esto quiere decir que se va a simular que la señal viaja en la vertical.

Hay varios métodos que permiten realizar el análisis de velocidad. En SU se utilizó el método de espectro de semblanza (Figura 17), que está basado en la correlación cruzada de las trazas de un CDP para un rango de valores de velocidad (Yilmaz, 1987). Los gráficos resultantes son una serie de máximos y mínimos que se disponen como isolíneas de igual semblanza. El objetivo de esta gráfica es localizar las zonas de valor máximo de semblanza, que representarían aquellos reflectores con mayor contraste de impedancia acústica. En este método hay que tener cuidado de no seleccionar las velocidades pertenecientes a las múltiples, que son las señales que siguen la misma tendencia que la señal original pero a tiempos mayores.

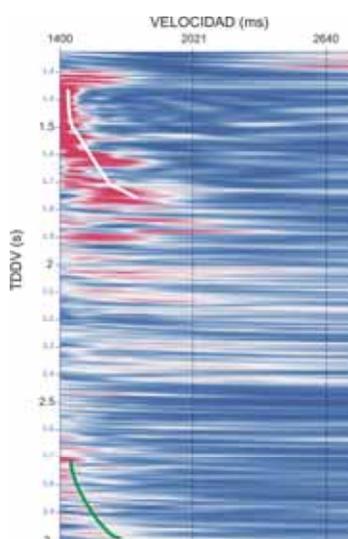


Figura 17.- Espectro de semblanza en SU. La línea blanca muestra el picado de velocidades seleccionado para corregir las primeras reflexiones. En verde se muestran las velocidades pertenecientes a la múltiple.

La ventaja de ProMAX es que se pueden aplicar dos o más métodos de análisis de velocidad simultáneamente (Figura 18), además de tener el registro de varios CDP donde se puede ver qué horizonte es el que se corrige para cada velocidad seleccionada. En la Figura 18 aparece en primer lugar el espectro de semblanza; otro método utilizado es el método de velocidades constantes, que es un método gráfico de prueba y error, poco preciso, pero visualmente efectivo. A cada grupo de CDP se le aplica una velocidad constante para

corregir por NMO. Las ondículas que muestran horizontalidad en los registros indican que la velocidad es adecuada para corregir por NMO. Estas velocidades funcionan sólo en un intervalo de tiempo específico.

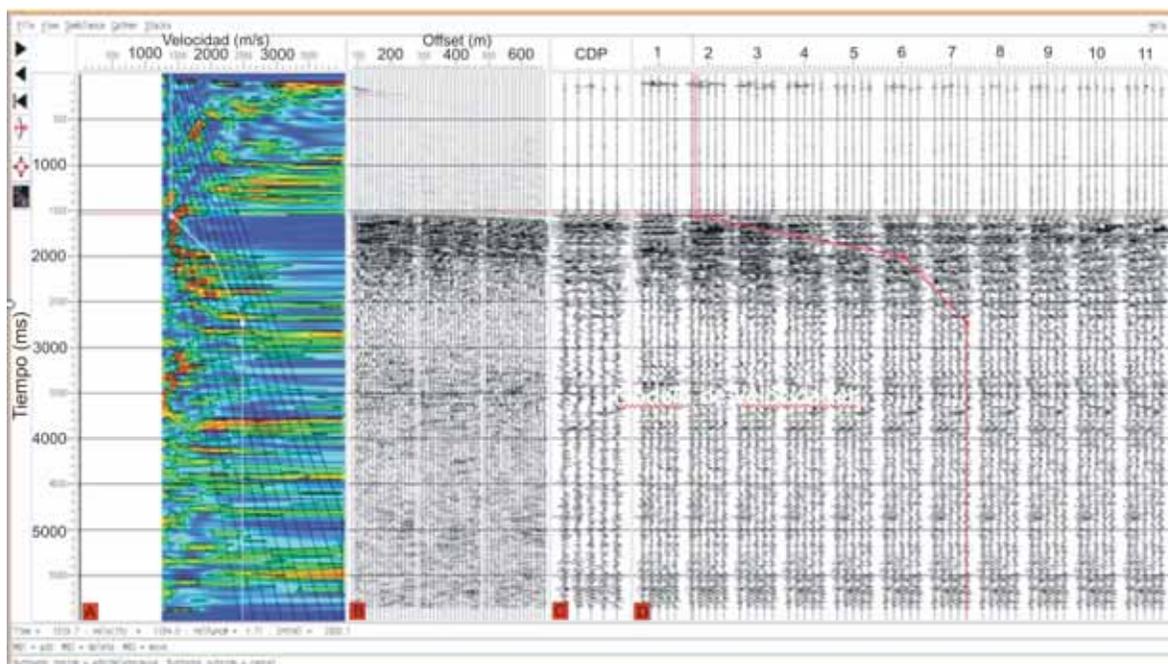


Figura 18.- Análisis de velocidad en ProMAX. (A) Espectro de semblanza, (B) Registro de CDP, (C) Corrección dinámica de 5 CDP, (D) Método de “mini-stacks” con NMO de velocidades constantes.

Una vez identificadas las velocidades se grafica el modelo de velocidades (Figura 19), éste debe seguir el perfil de la sección sísmica que obtenemos tras el procesado; es una forma de comprobar si el modelo de velocidades seleccionado es el adecuado. Es fácil identificar lugares donde el modelo de velocidad cambia lateralmente de manera brusca. Por ejemplo, en la figura 19, podemos observar un perfil de velocidades que necesita ser revisado debido a la anomalía de velocidades que presenta.

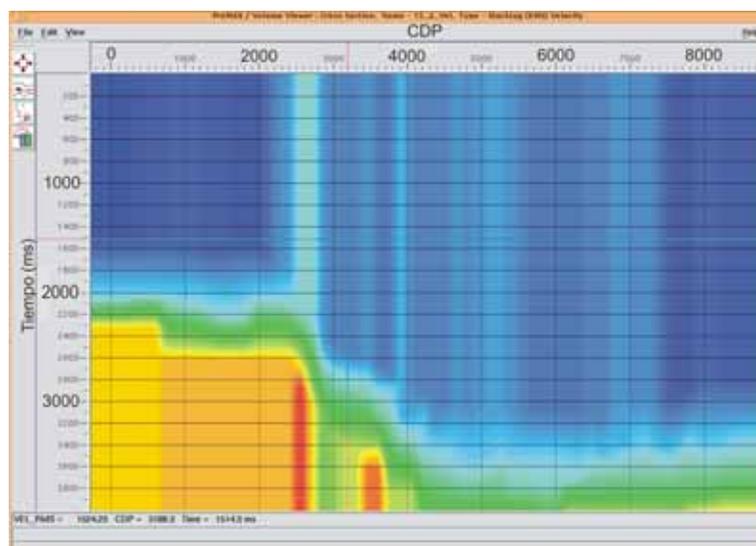


Figura 19.- Modelo de velocidades. Es un ejemplo de un modelo que no está bien conseguido, porque las variaciones horizontales de velocidad tienen que ser más uniformes, por ejemplo la franja de alta velocidad a la altura del CDP 2600 no puede tener una explicación geológica coherente. Incluso hay una variación fuerte de la propagación de las ondas en el agua.

Apilamiento (*Stack*)

Después de las correcciones anteriores se procede a sumar todas las trazas que pertenecen a un mismo CDP, con esta suma se consigue amplificar la señal coherente y disminuir el ruido (no coherente). En este momento se obtiene la primera sección sísmica del proceso (Figura 20), aunque no la definitiva. La sección sísmica está formada por todas las trazas CDP y representa una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo con offset cero, donde la escala horizontal representa la distancia y la escala vertical el tiempo doble de viaje (TDDV). Es posible volver atrás en el procesado y modificar parámetros para mejorar la sección sísmica.

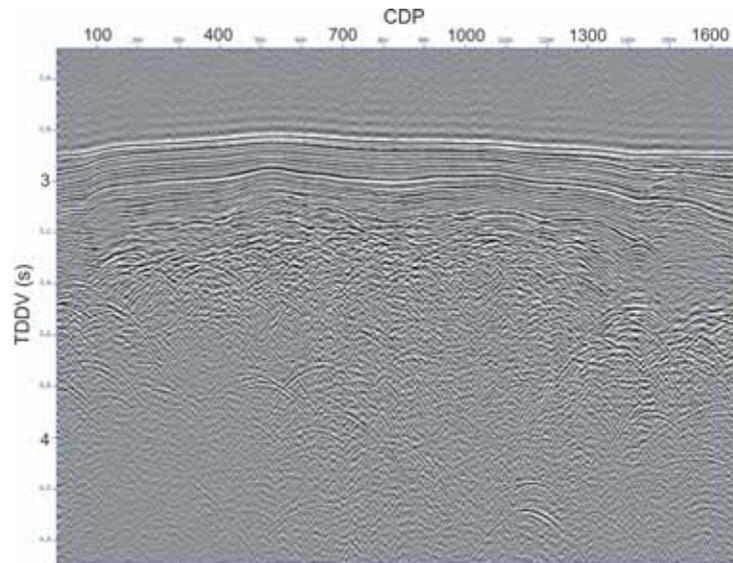


Figura 20.- Ejemplo de apilamiento bruto con SU

III.1.3.3 Procesado Post-Apilamiento

El procesado post-apilamiento es la última fase de la etapa del procesado de datos. La parte más importante de este ciclo es la migración, ésta se desarrollará más adelante. Además de la migración se pueden aplicar otra serie de procesos para aumentar la resolución de la imagen obtenida, como puede ser aplicar deconvolución predictiva para recuperar las altas frecuencias perdidas durante el apilamiento y suprimir ruido coherente generado durante el apilamiento, o introducir algún tipo de ganancia de amplitud para lograr una mejor visualización.

La migración es el proceso que mayor tiempo de cómputo requiere. Su objetivo principal es eliminar difracciones y reubicar los reflectores a su verdadera posición ya que hasta ahora se había considerado que las reflexiones se producían en la vertical.

Los efectos que produce la migración son: Aumento del echado de los horizontes, su acortamiento y ascenso en sentido contrario al echado; estrechamiento de los sinclinales y colapso de las hipérbolas de difracción a su ápice.

Normalmente, para migrar, se aplican velocidades un 10 % inferiores a las velocidades de NMO. Hay que tener cuidado en no sobremigrar la imagen, si esto ocurre aparecen las denominadas “sonrisas”, ruidos con formas cóncavas hacia arriba. Estas sonrisas son muy comunes en los bordes, debido a que falta parte de la energía que se necesita para colapsar la difracción, además los puntos de ruido también producen sonrisas.

En este trabajo sólo se ha realizado la migración en tiempo (Figura 21) porque no se cuenta con datos de pozos en la cuenca, que nos permitan hacer una migración o conversión a profundidad con suficiente confiabilidad.

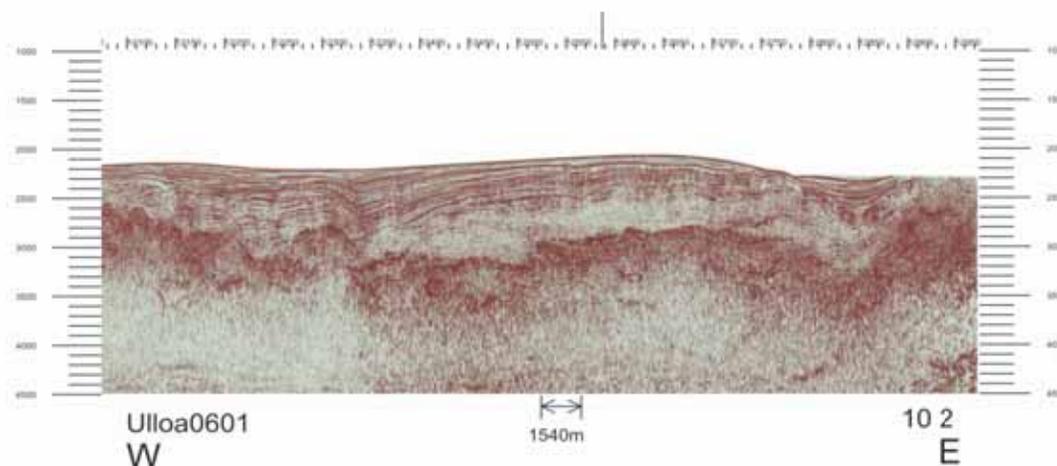


Figura 21.- Ejemplo de migración en tiempo de una línea sísmica (ProMAX).

Nótese que todas las velocidades a las que se ha hecho referencia en este capítulo se refieren a velocidades de procesado, en ningún momento se deben confundir éstas con las velocidades propias del terreno.

III.1.4 Resolución

Un punto importante a tener en cuenta antes de comenzar con la interpretación de los perfiles obtenidos es ser conscientes del tamaño de los rasgos que vamos a ser capaces de diferenciar. Esta capacidad va a venir dada en cada caso por la resolución tanto vertical como horizontal que se tenga en cada momento.

La resolución calculada sólo es válida en áreas específicas ya que depende tanto del procesamiento realizado como de las características del terreno; aunque sirve para hacerse una idea general de los resultados.

Resolución Vertical

Resolución vertical se refiere a la capacidad para diferenciar dos eventos sísmicos cercanos correspondientes a diferentes niveles de profundidad. Viene dada por la ecuación:

$$R = \frac{T}{4} * V \quad (2)$$

Donde: T = Período dominante (s)

V= velocidad del medio (m/s)

Convencionalmente se usaban las conclusiones enunciadas por Widess (1973) que proponía el límite de la resolución como $\lambda/8$, siendo λ la longitud de onda dominante. Pero, como los cálculos de Widess se basaron en observaciones teóricas, actualmente se prefiere manejar, con presencia de ruido, el umbral de resolución dado por $\lambda/4$ (Chopra et al., 2006). Aunque, en casos extremos, con relaciones señal/ruido muy bajas se llega a recurrir a $\lambda/2$.

Utilizando como ejemplo el caso más extremo y tomando para basamento una longitud de onda de 0.02 m y una velocidad de 3000 m/s, se obtiene una resolución vertical de 30 m

(empleando $\lambda/4$). Si se hace lo mismo para la cubierta sedimentaria, tomando una longitud de onda de 0.01 s, y una velocidad de 2000 m/s, se obtiene una resolución vertical de 10 m.

Aplicando el proceso de deconvolución se mejora la resolución vertical ya que se sustituye la fuente, que tiene cierta duración (reverberaciones), por un pico o *spike*, que tiene una duración mínima.

Resolución Horizontal

La resolución espacial u horizontal se refiere a la habilidad para diferenciar y/o reconocer dos rasgos desplazados lateralmente como dos eventos adyacentes distintos (Chopra et al., 2006).

Para datos no migrados se define a través de la Zona de Fresnel, y viene dada por la ecuación (Yilmaz, 2001):

$$R \approx \frac{V}{2} \sqrt{\frac{t_o}{f}} \quad (3)$$

f = frecuencia dominante (Hz)

t_o = tiempo de viaje del frente de onda (s)

V = Velocidad del medio (m/s)

Si tomamos para el basamento un tiempo medio de viaje de 4 s, y una velocidad a basamento de 3000 m/s y una frecuencia de 50 Hz, obtenemos una resolución horizontal de 424 m, para el basamento. Haciendo la misma operación para el sedimento, considerando un tiempo doble de viaje de 2.5 s, una velocidad de 2000 m/s y una frecuencia de 100 Hz, se obtiene una resolución horizontal de 25 m. Se observa que la resolución disminuye mucho con la profundidad.

En datos migrados la resolución espacial aumenta, siendo su límite último la distancia entre canales. La migración colapsa las difracciones, por lo que colapsa la zona de Fresnel, aunque no totalmente ya que tiene limitaciones debidas a la inclinación de los reflectores y al modelo de velocidades.

III.1.5 Consideraciones para la Interpretación de Perfiles Sísmicos

Para realizar la interpretación se ha utilizado el programa SeisWorks de la plataforma Landmark. Ésta es una herramienta que permite, a partir de comandos sencillos, desplegar las líneas sísmicas de una zona, siendo de gran ayuda al correlacionar las estructuras ya que el programa define los puntos de cruce de las líneas. La interpretación se ha realizado sobre perfiles migrados en tiempos dobles de viaje (TDDV).

Los objetivos primarios en toda interpretación sísmica consisten en identificar las principales estructuras tanto tectónicas como sedimentológicas existentes en las líneas sísmicas. Para ello se buscan reflectores que sean continuos lateralmente y que reflejen algún aspecto característico de los perfiles, intentándolos reconocer a lo largo del resto de los perfiles que se tienen para poder establecer una correlación entre ellos. A estos reflectores se les denomina horizontes. Otro objetivo es la identificación de fallas, éstas se localizan en los puntos donde se tiene ausencia de señal y los horizontes pierden su continuidad lateral.

En nuestro caso, uno de los objetivos de la interpretación de estos perfiles es la diferenciación entre el basamento acústico y la zona de sedimentos. Para ello se buscó un horizonte que tuviera gran amplitud y una buena correlación lateral; que se localizara entre una zona en la que se pudiera identificar la estructura sedimentaria de otra a partir de la cual esa estructura no se pudiera identificar y la señal sísmica se perdiera (ver horizonte amarillo en Figura 22).

Después se interpretó el fondo marino para poder manejarlo como horizonte. Se hizo así porque un ejercicio de este trabajo ha sido calcular el espesor de los sedimentos, lo cual se hace restando la profundidad en la que se localiza el horizonte perteneciente al basamento acústico, del horizonte perteneciente al fondo. También se ha contado en todo momento con los datos de batimetría multihaz existente en la zona gracias a cruceros anteriores, pero en este caso no se utilizaron para realizar este cálculo sino como apoyo en la correlación de fallas y otras estructuras entre líneas.

Por último se identificaron las principales estructuras sedimentarias y fallas, que se intentaron seguir a lo largo de varias líneas (Figura 22). Las fallas identificadas serán comparadas en el Capítulo IV con las localizadas por Fenby y Gastil en 1991, inferidas a partir de batimetría.

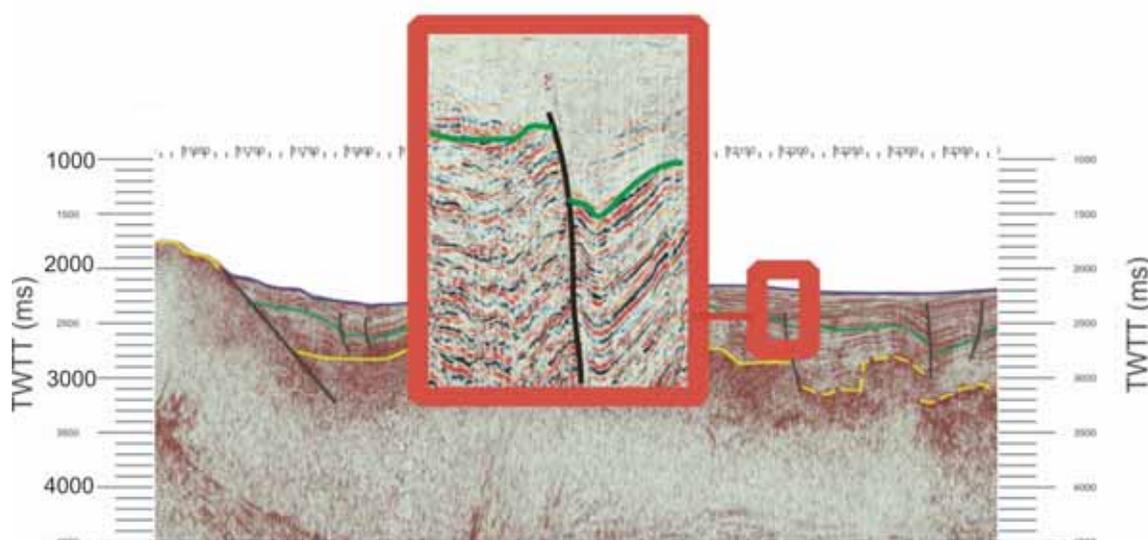


Figura 22.- Modelo de cómo se ha llevado la identificación de fallas y reflectores. En verde y amarillo podemos observar los reflectores, mientras que las fallas se presentan en color negro.

III.2 Toma de Muestras en Campo

Para obtener las muestras de cuerpos intrusivos se visitaron varias islas del Golfo de California, realizándose un reconocimiento general de las mismas. En esta campaña de campo, que se llevó a cabo en junio del 2007, se visitaron las islas: Danzante Primero, Monserrat, Santa Catalina, Santa Cruz y San Diego. Según el mapa de INEGI 1:250000, estas islas están formadas por rocas volcánicas, sin embargo, se encontraron rocas plutónicas en las islas Santa Catalina, San Diego y Santa Cruz. Adicionalmente se tomaron muestras del intrusivo que aflora en Punta Botella, ubicado en la Península de Baja California. La localización de las muestras colectadas se muestra en el Apéndice I y II.

Se tomaron aproximadamente 20 kg de cada muestra, de la cuales se prepararon concentrados de hornblenda y biotita para hacer geocronología por ^{40}Ar - ^{39}Ar , láminas delgadas para descripción petrográfica y análisis geoquímicos de elementos mayores y traza. Por último, una parte del concentrado se envió a San Diego State University para fechamiento de circones por el método de U-Pb.

A continuación se describe brevemente el método de fechamiento ^{40}Ar - ^{39}Ar y la metodología seguida para el análisis experimental.

III.3 Método ^{40}Ar - ^{39}Ar

En 1965 Merrihue propuso la factibilidad de medir la relación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ como alternativa a la medición tradicional $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$. Esta innovación fue descrita por Merrihue y Turner en 1966 y a partir de entonces se denominó método ^{40}Ar - ^{39}Ar . Posteriormente los fundamentos de éste método fueron presentados por Dalrymple y Lanphere (1971, 1974), McDougall (1974) y Dalmeyer (1979).

El método ^{40}Ar - ^{39}Ar es básicamente el geocronómetro K-Ar, la diferencia radica en que el ^{40}K es cuantificado a partir del ^{39}Ar , producto de la activación con neutrones del ^{39}K en un

reactor nuclear. La evaluación del ^{40}K a través del ^{39}Ar , proporciona la ventaja de que ambos isótopos de argón pueden ser medidos mediante espectrometría de masas. Por esta razón es posible obtener espectros de edad, liberando en etapas consecutivas, el argón que se encuentra atrapado en la estructura cristalina de los minerales. Esta técnica, conocida como calentamiento por pasos, permite determinar si el geocronómetro ha permanecido como sistema cerrado, es decir, es posible identificar y en algunos casos corregir los efectos de pérdida o ganancia de argón. Por último, en las últimas décadas la versatilidad del método ^{40}Ar - ^{39}Ar se ha visto incrementada con el uso de espectrómetros de masas ultrasensibles que permiten el análisis de muestras de roca y minerales cada vez más pequeñas, llegando en algunos casos al análisis de mono-cristales. Para este tipo de experimentos se utiliza como sistema de calentamiento un rayo láser, lo cual minimiza la contaminación de la muestra con el argón que siempre se encuentra presente en los instrumentos de análisis.

El argón es un gas noble, por lo que no forma enlaces químicos. El $^{40}\text{Ar}^*$, producto del decaimiento radiactivo del ^{40}K , permanece atrapado en la estructura cristalina de los minerales hasta su liberación por incremento en la temperatura. Se define como temperatura de cierre (T_c), aquella temperatura por debajo de la cual, los diferentes minerales empiezan a acumular $^{40}\text{Ar}^*$. Se puede tomar para la hornblenda ($T_c \sim 500^\circ \text{C}$) y para la biotita ($T_c \leq 300^\circ \text{C}$) (Faure, 1986).

El método ^{40}Ar - ^{39}Ar se basa en la producción de ^{39}Ar a partir de ^{39}K , mediante la irradiación con neutrones, según la reacción:



dónde n es neutrón y p es protón.

El ^{39}Ar producto de ésta reacción ($^{39}\text{Ar}_K$ a partir de ahora) es un isótopo radiactivo con una vida media ($t_{1/2}$) de 269 años.

Como ya se mencionó, la principal ventaja del método ^{40}Ar - ^{39}Ar consiste en la liberación del argón en etapas. Para cada una de estas etapas se mide la relación ($^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$) y a partir de éste dato se puede calcular una edad, ya que:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left\{ 1 + J \left(\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}_K} \right)_m \right\} \quad (5)$$

En donde λ es la constante de decaimiento del ^{40}K y J es el parámetro de irradiación, que se determina a partir de monitores de irradiación. Así, con las edades calculadas para cada etapa se construye un espectro de edad, que es la forma típica de representar los resultados del método ^{40}Ar - ^{39}Ar .

Durante la irradiación de las muestras en el reactor nuclear, se producen, además de la reacción de interés ($^{39}\text{K} \xrightarrow{n,p} ^{39}\text{Ar}_K$), otras reacciones de activación con neutrones. Las reacciones que producen interferencia con los isótopos de argón, se enumeran a continuación (Tabla III).

Tabla III.- Reacciones de interferencia y vida media de los isótopos producidos durante la irradiación de las muestras. Los subíndices de los isótopos de argón identifican su origen.

$^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{38}\text{Cl} (n, \gamma)$	$^{38}\text{Cl} \rightarrow ^{38}\text{Ar}_{\text{Cl}} + \beta^-$	$t_{1/2} = 37.3 \text{ min}$
$^{35}\text{Cl} \rightarrow ^{36}\text{Cl} (n, \gamma)$	$^{36}\text{Cl} \rightarrow ^{36}\text{Ar}_{\text{Cl}} + \beta^-$	$t_{1/2} = 3.1 \times 10^5 \text{ años}$
$^{42}\text{Ca} \rightarrow ^{39}\text{Ar}_{\text{Ca}} (n, \alpha)$		$t_{1/2} = 269 \text{ años}$
$^{40}\text{Ca} \rightarrow ^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}} (n, \alpha)$		$t_{1/2} = 35.1 \text{ días}$
$^{40}\text{Ca} \rightarrow ^{36}\text{Ar}_{\text{Ca}} (n, n\alpha)$		estable

Una vez que los isótopos de argón son corregidos por las reacciones de interferencia, es posible calcular la relación ($^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_K$), que puede ser graficada en función del ^{39}Ar liberado y en conjunto con el espectro de edad confirmar la homogeneidad del mineral, ya

que la relación ($^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$) es equivalente a la relación del Ca/K de la muestra. La construcción del espectro de edad se realiza suponiendo una composición atmosférica para el ^{40}Ar atrapado al momento de alcanzar la T_c del mineral. Para determinar si esta suposición es correcta, los isótopos de Ar obtenidos para cada muestra, se grafican en el diagrama de correlación ($^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$), la intersección con el eje de las ordenadas de la mejor línea recta obtenida en este diagrama indica de manera independiente la composición de ^{40}Ar inicial y la intersección de esta línea con el eje de las abcisas es equivalente a la edad de la muestra ya que es representativa del ($^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$).

III.3.1 Preparación de Muestras

Primeramente se procedió a seleccionar el corte adecuado de cada muestra para preparar las galletas que se utilizarían para elaborar las láminas delgadas. La descripción petrográfica de las muestras analizadas se detalla en el Apéndice IV.

Se seleccionaron las muestras más frescas para los experimentos (^{40}Ar - ^{39}Ar), una alícuota de la fracción menor de 180 μ de estas muestras se envió a San Diego State University para el fechamiento de circones por el método de U-Pb. Otra porción de la muestra se pulverizó para análisis geoquímico de elementos mayores y traza. Los análisis geoquímicos se realizaron en el Centro de Geociencias de la UNAM, aunque no es el objetivo de esta tesis realizar la caracterización geoquímica de las muestras, se presentan los resultados de los análisis geoquímicos en el Apéndice V; mientras que las edades U-Pb obtenidas por Marty Grove y Dave Kimbrough se podrán consultar en el Apéndice VI.

Para los experimentos ^{40}Ar - ^{39}Ar , la preparación de muestras (Figura 23) consiste en elegir la porción de roca más fresca y libre de alteración (intemperismo y/o oxidación), de ser necesario se eliminan las porciones alteradas con métodos mecánicos (sierra eléctrica, martillo y cincel, etc.). El material fresco se muele y tamiza, utilizándose las mallas de 710, 335, 250 y 180 μ . Las fracciones se lavan con agua destilada y se secan de 6 a 8 hrs a 60°C.

Se examinan las muestras bajo el microscopio binocular. Para preparar los concentrados de hornblenda y biotita se elige la muestra que presente libres los cristales en el tamaño más cercano al original observado en la muestra de roca.

La separación de minerales se realiza con el separador magnético Frantz, la fracción concentrada del mineral de interés, nuevamente se examina bajo el microscopio binocular para seleccionar los cristales mas frescos y libres de inclusiones.

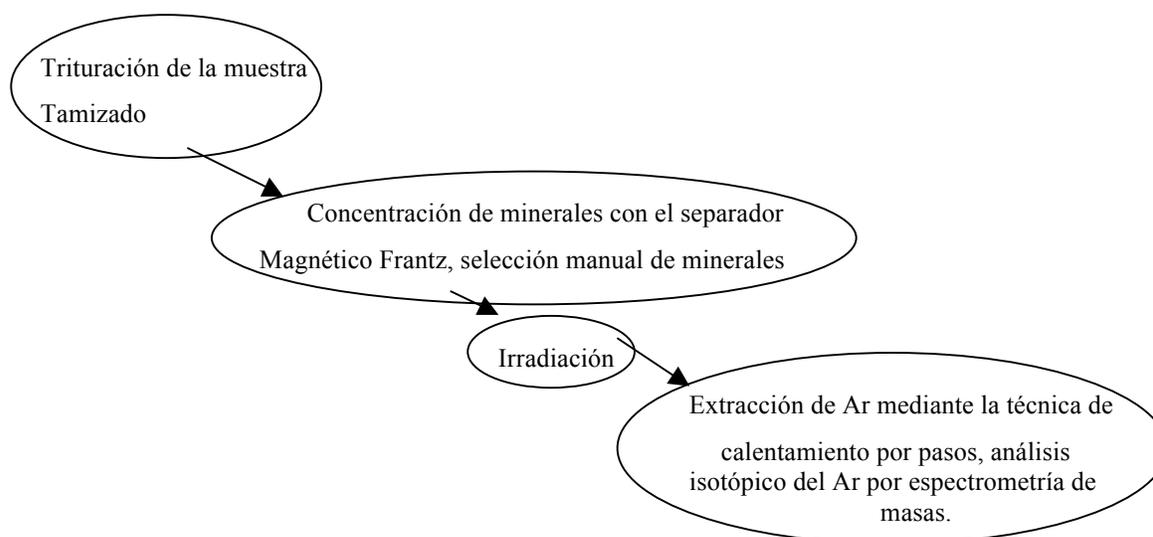


Figura 23.- Secuencia de procesamiento de muestras con ^{40}Ar - ^{39}Ar

La relación de las muestras analizadas por ^{40}Ar - ^{39}Ar se presenta en la Tabla IV

III.3.2 Irradiación de las Muestras

Se irradiaron las muestras en el reactor nuclear de la Universidad de McMaster (Canadá). Para su irradiación se colocaron los minerales en un sobre de papel de aluminio y se dispusieron en una cápsula junto con los monitores de irradiación: sanidino TCR 2 ($t_s =$

27.87 ± 0.04 Ma) y sanidino FCT 2 ($t_s = 27.84 \pm 0.04$ Ma). La cápsula, con muestras y monitores, se envolvió con una lámina de cadmio. El propósito de utilizar la envoltura de Cd, fue eliminar la reacción de interferencia ($^{40}\text{K} \xrightarrow{n,p} ^{40}\text{Ar}_K$), producto de la activación del ^{40}K con neutrones térmicos, éstos se ha demostrado que son detenidos efectivamente con dicha lámina. Las muestras y monitores recibieron una dosis de 30 MW.

Tabla IV.- Muestras y fracciones analizadas de los intrusivos por el método de ^{40}Ar - ^{39}Ar

ISLA	NOMBRE	MINERAL	TAMAÑO
Santa Catalina	SC-17	Biotita	0.685-0.355 mm
Santa Catalina	SC-17	Hornblenda	0.685-0.355 mm
Santa Catalina	SC-24	Biotita	0.685-0.355 mm
San Diego	SD-25	Biotita	0.355-0.254 mm
Santa Cruz	SCR-26	Hornblenda	0.355-0.254 mm
Santa Cruz	SCR-27	Biotita	0.355-0.254 mm
Santa Cruz	SCR-27	Hornblenda	0.355-0.254 mm
Santa Cruz	SCR-28	Hornblenda	0.685-0.355 mm
Santa Cruz	SCR-28	Biotita	0.685-0.355 mm
Santa Cruz	SCR-30	Hornblenda	0.355-0.254 mm
Santa Cruz	SCR-31	Hornblenda	0.355-0.254 mm
Punta Botella	PB-32	Biotita	0.685-0.355 mm

III.3.3 Espectrometría de Masas

Para la extracción y análisis del Ar, se colocan unos cuantos cristales de las muestras irradiadas en cada cavidad del porta-muestras y se introducen a la cámara de vacío. El factor J se determina con los monitores de irradiación, en este caso el Ar se extrajo en un solo paso. El análisis isotópico de argón se realizó con el espectrómetro de masas VG5400, como fuente de calor se utilizó el láser Innova 70C. Para las extracciones de argón en un

paso se aplicó una potencia de 7 Watts con el láser. Para el fechamiento de las muestras se realizaron experimentos de calentamiento por pasos, incrementando la potencia del láser en cada etapa de calentamiento. En este tipo de experimento, para cada fracción de argón analizada se mide un blanco con el fin de determinar la composición del argón presente en el equipo, y poder sustraer esta señal a cada uno de los escalones. Tanto para la muestra como para el blanco se colectaron 15 barridos de la masa 36 a la 40. La mayoría de los experimentos se realizó por duplicado con el objetivo de determinar la reproducibilidad de los mismos y seleccionar una trayectoria de calentamiento más adecuada con el fin de verificar la presencia de una meseta en el espectro de edad.

Para la reducción de datos se utilizó el programa RaDan y AgeCalc, elaborados expresamente para el Laboratorio de Geocronología del CICESE por Jonás de Basabe Delgado. Estos programas utilizan las ecuaciones recomendadas por York et al (2004), para todos los cálculos de ajuste a una línea recta. Estos programas incorporan los factores de corrección por reacciones de interferencia para el reactor de McMaster (Bottomley, 1975; Masliwec, 1984). El diagrama de flujo de un experimento típico se muestra en la figura 24.

Como se dijo anteriormente, la edad de una muestra se calcula utilizando la ecuación (5). El parámetro de irradiación J se determina con monitores de irradiación, que son muestras de edad conocida (t_s) irradiadas junto con las muestras. J se determina con la siguiente ecuación:

$$J = \frac{e^{\lambda t_s} - 1}{\left(\frac{{}^{40}\text{Ar}^*}{{}^{39}\text{Ar}_K} \right)} \quad (6)$$

Una vez determinado el valor de J, con la relación (${}^{40}\text{Ar}^*/{}^{39}\text{Ar}_K$) medida en la muestra se puede calcular la edad utilizando la ecuación (5). El error analítico se reporta al nivel de 1σ y proviene de la propagación de errores de todas las mediciones realizadas.

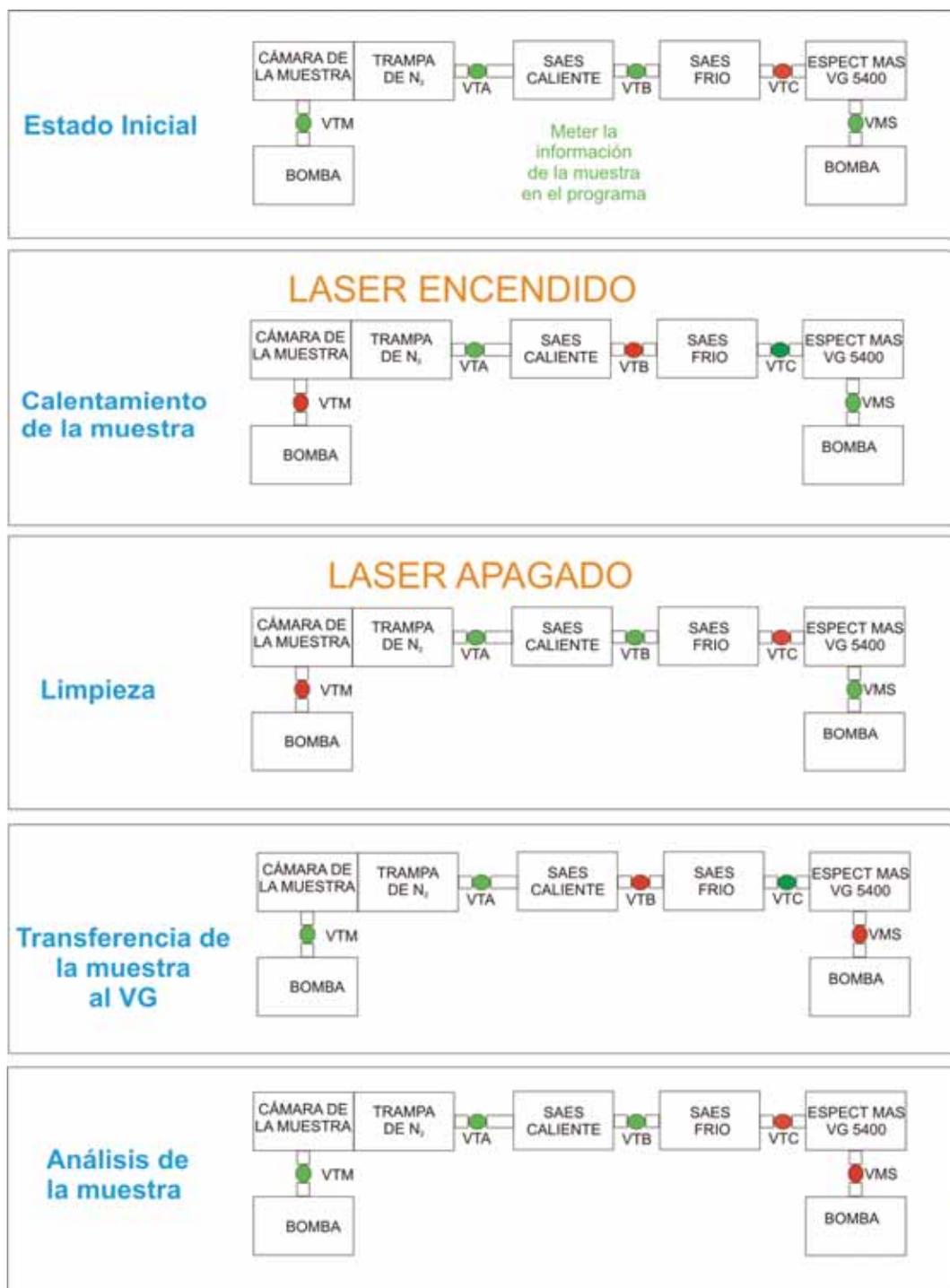


Figura 24.- Flujo de un experimento de ^{40}Ar - ^{39}Ar . En azul el proceso que se está llevando a cabo en cada momento. VTM, VTA, VTB, VTC y VMS representan las válvulas, en color verde significa que están abiertas y en rojo que están cerradas (Modificado de López, Margarita, comunicación personal).

III.3.4 Presentación de los Resultados

Los resultados se presentan en forma de espectros de edad y diagramas de correlación ($^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$). En los espectros de edad se grafican las edades obtenidas para cada fracción en forma consecutiva en función del % ^{39}Ar liberado. En el Apéndice VII se sintetizan los resultados obtenidos para cada muestra, especificándose las edades obtenidas para cada fracción y la edad integrada. La edad integrada es equivalente a un experimento donde el argón es liberado en un único paso, para calcularla, se suma el argón liberado en las diferentes etapas del experimento. Se calcularon edades de meseta para aquellas muestras que rindieron tres o más fracciones consecutivas con edades estadísticamente indistinguibles dentro de 1σ de incertidumbre, y que representaran más del 50% del ^{39}Ar total liberado por la muestra. Se reporta la edad de meseta como el promedio ponderado de las edades obtenidas para dichas fracciones. La edad de meseta, la edad integrada y la edad de isocrona incluyen la incertidumbre en J.

Por último, se reportan las edades de isocrona calculadas con la mejor línea recta definida por los datos en el diagrama de correlación ($^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$). Para este cálculo se utilizan las ecuaciones recomendadas por York et al., 2004. Reportándose la bondad de ajuste ($\text{SumS}/(n-2)$) y el número de datos utilizados para calcular la línea recta. El inverso de la intersección de la línea recta de mejor ajuste con el eje de las ordenadas indica la relación inicial del ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$). Con éste diagrama se puede determinar si la suposición de que el ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)_i = 295.5, es decir, tiene composición atmosférica, es correcta. Si el ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)_i > 295.5, es indicativo de la presencia de argón en exceso, por lo que la mejor estimación de la edad de la muestra se toma calculando la edad a partir del inverso de la intersección de la línea con el eje de las abcisas, es decir la edad de isocrona t_c .

Para este trabajo, en algunas muestras, la distribución de los datos no permitió definir inequívocamente una línea recta. Este es el caso de las fracciones de argón con alto contenido de $^{40}\text{Ar}^*$, donde los datos se agrupan cerca del eje de las abcisas. Para obtener

estas edades se calculó la línea forzando la intersección de este conjunto de datos con un $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_i = 295.5$. La edad que se obtuvo es equivalente a la obtenida en el espectro de edad.

Capítulo IV

Resultados

IV.1 Tipos de Corteza

El objetivo principal del trabajo ha sido establecer, dentro del área de estudio, el límite entre basamento continental y basamento oceánico (Figura 25). A continuación, se van a describir las directrices utilizadas para establecer tal diferenciación, éstas han sido definidas a partir tanto de características sísmicas, como físicas (a partir de muestras de roca obtenidas en el área). También se ha tenido en cuenta el contexto geológico, así como las semejanzas morfológicas con estructuras de composición conocida. La interpretación sísmica, junto con las muestras obtenidas *in situ* son los principales referentes en los que nos hemos apoyado para establecer esta diferenciación. Hay que tener en cuenta que las delimitaciones que se establecen en este apartado son generales, por lo que dentro de cada área pueden existir fragmentos pertenecientes a un tipo de basamento distinto al que se define de forma general. Y las definiciones de basamento que aquí se dan son específicas para este área.

Todos los perfiles sísmicos que se muestran tienen la escala vertical en tiempo doble de viaje (TDDV), en segundos, ya que al no haber pozos en la cuenca, los datos no se han podido convertir a profundidad con el grado adecuado de confianza. La descripción detallada de cada uno de los registros sísmicos, así como su interpretación se encuentran en los Apéndices VII y VIII, respectivamente.

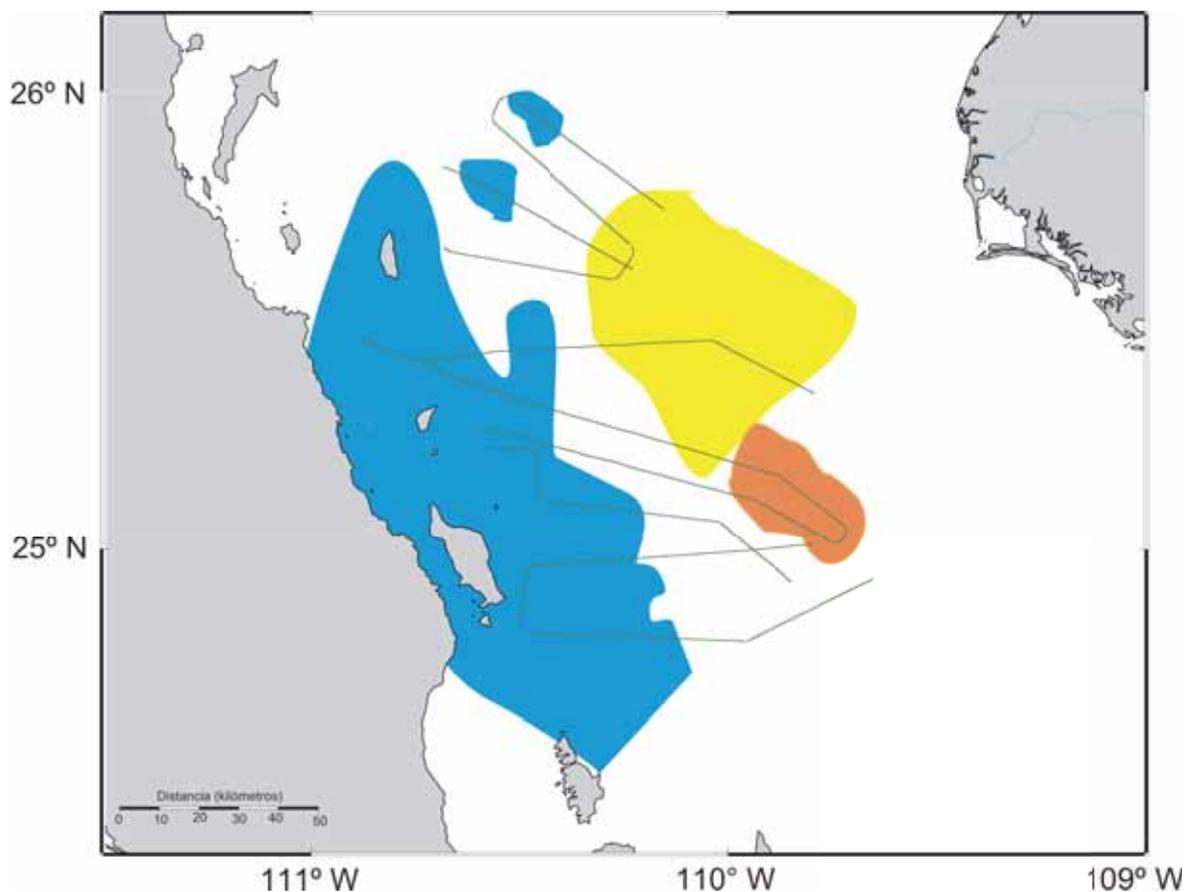


Figura 25.- Tipos de basamento: Plutónico (azul), Macizo Farallón-Sur (naranja) y corteza oceánica de nueva generación (amarillo). En verde aparecen los perfiles sísmicos.

IV.1.1 Basamento Plutónico

El basamento plutónico está formado por corteza continental adelgazada. Se encuentra situado a lo largo del margen oeste del área de estudio (Figura 25), paralelo a la línea de costa de la Península de Baja California. Es el único tipo de basamento del que contamos con muestras en el presente estudio.

IV.1.1.1 Características

IV.1.1.1.1 Características Batimétricas

La batimetría ofrece la primera pista a la hora de reconocer este tipo de basamento. En el área se pueden observar dos zonas con profundidades muy dispares (Figura 4). La menos profunda, que se encuentra situada, aproximadamente, por encima de la isobata de 1000 m, se puede seguir a lo largo de todo el margen oeste de la zona; limita hacia el Este con una región más profunda, que ya forma parte de la cuenca Farallón. Ambas áreas se encuentran separadas por un escarpe muy pronunciado, de más de 300 m de altura, que pertenece a la falla San Martín (Figura 26), que es una falla normal con vergencia hacia el Este, inactiva, y que forma el límite oeste de la cuenca Farallón.

La zona ubicada al oeste de la falla San Martín es la definida como formada por rocas de naturaleza plutónica, y es la marcada en la Figura 4 con colores amarillos y verdes claros.

IV.1.1.1.2 Características Sísmicas

El basamento continental se ha interpretado en las líneas sísmicas como el definido por un reflector muy continuo y de gran amplitud, debido al cambio de impedancia acústica entre los sedimentos y el material subyacente, a partir del cual la energía de las ondas sísmicas apenas penetra (Figura 26).

Se ha identificado, de forma continua, a lo largo de toda una franja, limitando al oeste con la Península de Baja California (Perfiles 8_2, 9, 10_1, 12_3, 12_4, 13_1_2, 14_2, 15_1, 20 y 23). Aparece también en la parte N, como fragmentos aislados (monte Valverde y monte San Fernando en los perfiles 21_2 y 23).

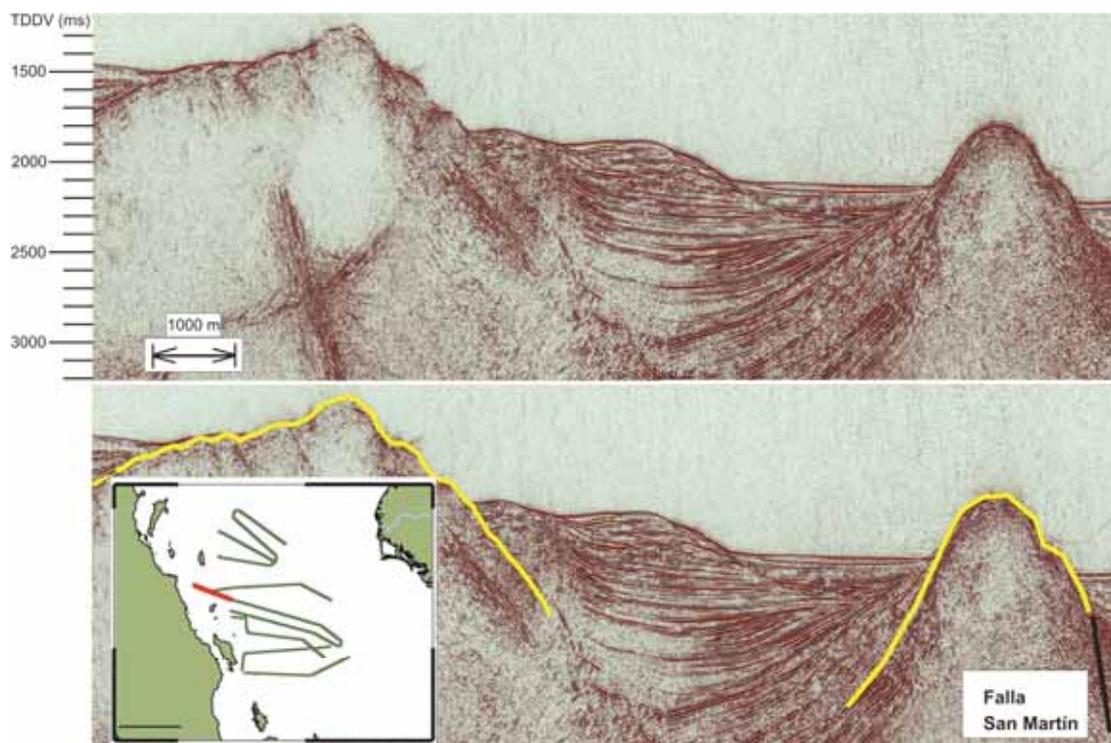


Figura 26.- Ejemplo de basamento acústico identificado como naturaleza plutónica (Este fragmento pertenece al perfil 14_3. Ver Apéndice VIII para una vista más general).

IV.1.1.1.3 Cuencas y Estructuras Principales en el Área

Las fallas principales localizadas en el área son falla El Venado, Espíritu Santo, Asunción, San Bernabé, La Víbora y la transforme abandonada de Pescadero Norte (perfiles 10, 12, 13, 14 y 15), con una dirección aproximada de 140 grados, en la parte centro y Sur. Mientras que en la parte Norte se encuentran las fallas Morrito y Vista Bella (Perfiles 20, 21, 22 y 23) con una dirección predominante de $\sim 30^\circ$ grados. Los lineamientos identificados en las islas Santa Catalina, Santa Cruz y San Diego siguen esta dirección. Para conocer la localización de las estructuras en los perfiles se recomienda consultar el Apéndice VII y/o la figura 53.

Con el apelativo de fallas principales nos estamos refiriendo a fallas que afectan a nivel de basamento, mientras que las fallas que sólo afectan al paquete sedimentario han sido consideradas como fallas secundarias.

La falla San Martín es la estructura más importante localizada dentro del área, ya que forma el límite oeste de la cuenca Farallón. Es una falla normal, inactiva, con vergencia hacia el este. Con un salto de aproximadamente 600 m (Perfil 14). Se encuentra situada en el límite este del monte Obregón y el monte San Blas, siendo la responsable de su levantamiento.

Las cuencas que encontramos en esta zona (Santa Cruz, Sobrero y Las Ánimas) están formadas por dos paquetes sismoestratigráficos, el inferior afectado por deformación frágil y el superior en el que no se observa deformación. Normalmente, las fallas localizadas en estos paquetes sedimentarios tienen vergencia hacia el E, y se encuentran inactivas ya que no llegan a alcanzar la parte superior de los mismos (Figura 27).

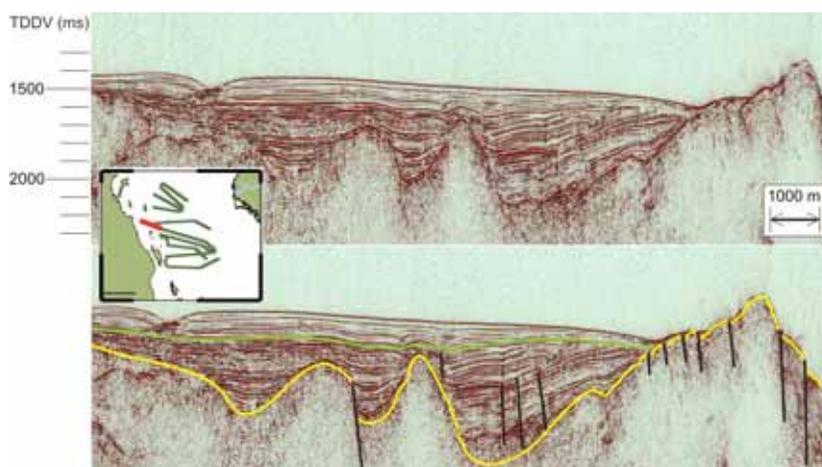


Figura 27.- Diferenciación entre los dos paquetes sedimentarios que hay en las cuencas, están separados con la línea verde. El inferior se encuentra afectado por deformación frágil, que no se aprecia en el superior.

La cuenca Santa Cruz (Figura 28), con un espesor aproximado de 1200 m, se encuentra situada al oeste de las islas. En ella se ha localizado la única familia de fallas secundarias de tipo normal con vergencia hacia el oeste que tenemos en el área. Probablemente estas fallas se encuentran activas ya que afectan a todo el paquete sedimentario.

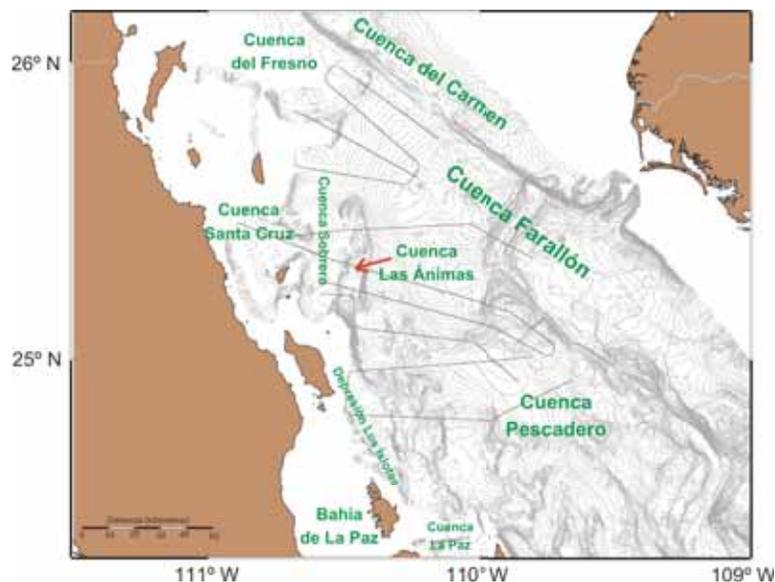


Figura 28.- Cuenkas de la región

IV.1.1.2 Edad y Características Petrológicas del Basamento

Cristalino

Se cuenta con muestras tanto de la parte emergida como del fondo marino, de las que se ha realizado las descripciones petrológicas (Apéndice III), se ha obtenido su antigüedad con el método de ^{40}Ar - ^{39}Ar (Apéndice VI), además de realizarse fechamientos por el método U-Pb (Apéndice V) y análisis químicos de elementos mayores y trazas (Apéndice IV), que se utilizarán como apoyo a los resultados obtenidos. Un mapa con la localización de todas las muestras se presenta en el Apéndice II.

IV.1.1.2.1 Descripción y Edades ^{40}Ar - ^{39}Ar de las Islas

Se realizó reconocimiento geológico en las islas aledañas al área del estudio de sismica de reflexión. Se constató que las islas Santa Catalina, Santa Cruz y San Diego estaban formadas principalmente por rocas plutónicas, mientras que en las islas Danzante y Montserrat no se encontraron afloramientos de rocas de esta naturaleza. Las islas Danzante

Primero y Montserrat están formadas principalmente por rocas volcánicas. Se tomaron muestras de rocas plutónicas para realizar experimentos ^{40}Ar - ^{39}Ar .

De las 44 muestras colectadas, 13 son de rocas plutónicas. Se examinaron las láminas delgadas para seleccionar las muestras que contenían minerales frescos y se prepararon concentrados de hornblenda y/o biotita. Se analizaron dos muestras de isla Santa Catalina (SC-17 y SC-24), cinco de la isla Santa Cruz (SCR-26, SCR-27, SCR-28, SCR-30 y SCR-31) y únicamente una muestra de la isla San Diego (SD-25). Adicionalmente se visitó un afloramiento en la Península de Baja California en Punta Botella, del cual también se analizó una muestra (PB-32).

Tabla V.- Resumen de edades de las muestras de Isla Santa Catalina, Isla Santa Cruz, Isla San Diego y Punta Botella (Bt: biotita; Hb: hornblenda; t_i : edad integrada; t_p : edad de la meseta; t_c : edad de la isocrona, MSWD parámetro indicativo de la bondad de ajuste ; n: número de fracciones seleccionadas para obtener dicha edad).

Muestra	min	t_i (Ma)	t_p (Ma)	t_c (Ma)	$(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_i$	MSWD	n	% ^{39}Ar
ISLA SANTA CATALINA								
SC-24	Bt	17.70 ± 0.15	17.86 ± 0.14			0.39	4	96.15
		17.72 ± 0.13	18.02 ± 0.13			0.57	3	76.53
SC-17	Bt	85.55 ± 0.43	87.20 ± 0.35			0.62	3	59.27
				87.64 ± 0.86	277 ± 47	1.30	3	59.27
SC-17	Hb	87.14 ± 0.49				---	1	48.36
		84.72 ± 0.49	90.30 ± 0.85					
ISLA SANTA CRUZ								
SCR-26	Hb	97.19 ± 0.47	98.72 ± 0.51			2.27	4	88.18
		95.69 ± 0.67	99.02 ± 1.98			6.95	3	73.95
SCR-27	Hb	90.68 ± 1.07				1.06	2	69.74
		94.74 ± 0.74	98.23 ± 0.95					
SCR-27	Bt	88.40 ± 0.49	90.65 ± 0.91			2.13	2	45.68
SCR-28	Bt	88.63 ± 0.40				0.61	6	82.53
		90.64 ± 0.49	91.62 ± 0.43					
SCR-30	Hb	106.05 ± 1.37	103.44 ± 1.36			1.44	3	75.19
SCR-31	Hb	102.26 ± 0.65		100.0 ± 1.7	294 ± 16	13.43	11	99.50
		104.95 ± 0.81						99.27
ISLA SAN DIEGO								
SD-25	Bt	94.33 ± 0.41				0.87	4	55.27
		94.41 ± 0.65	95.76 ± 0.47					
PUNTA BOTELLA								
PB-32	Bt	---				2.16	6	64.09
		99.09 ± 0.43	100.94 ± 0.51					
				100.69 ± 3.05	328 ± 147			

En la Tabla V se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada una de las islas, en el cual se incluyen las edades integradas, las edades de meseta y las edades de isocrona de cada muestra. También se indica el porcentaje de ^{39}Ar liberado y el número de fracciones que definen la meseta y/o isocrona. Los datos completos de ^{40}Ar - ^{39}Ar obtenidos para cada muestra se presentan en el Apéndice VI, en él se encuentran los espectros de edad, los diagramas de $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$, los diagramas de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ y una tabla con la información relevante de cada experimento.

Como complemento al análisis geocronológico por ^{40}Ar - ^{39}Ar , se enviaron concentrados de tamaño menor a 0.254 mm a la Universidad Estatal de San Diego para el análisis de circones mediante U-Pb. Los análisis y separación de circones fueron realizados por Dave Kimbrough (SDSU) y Marty Grove (UCLA). En la medida de lo posible, se fecharon por U-Pb las mismas muestras utilizadas para el estudio ^{40}Ar - ^{39}Ar , excepto aquellos casos en los que no se contaba con la cantidad de muestra necesaria para realizar la prueba. Se presenta una síntesis de las edades U-Pb obtenidos en la Tabla VI.

Tabla VI.- Edades de U-Pb

Muestra	Edad (Ma)	MSWD
SANTA CATALINA		
SC-8	19.21 ± 0.32	6.5
SC-17	96.4 ± 1.9	7.9
SC-20	93.51 ± 0.85	1.9
SANTA CRUZ		
SCR-26	97.4 ± 1.3	3.1
SCR-27	98.1 ± 1.8	7.2
SCR-28	96.04 ± 0.92	2.1
SCR-30	96.4 ± 1.6	3.8
SAN DIEGO		
SD-25	94.7 ± 1.8	10.3
PUNTA BOTELLA		
PB-32	98.7 ± 1.1	2.5

A continuación se describen los resultados obtenidos para cada una de las islas.

IV.1.1.2.1.1 Isla Santa Catalina

Es una isla de aproximadamente 13 x 4.5 km de longitud (Figura 29). Se identificó como compuesta principalmente de material plutónico. Se observaron afloramientos de dos tipos de roca plutónica, un primer tipo en la parte norte de la isla (muestras SC-17, SC-20) y el segundo tipo en la parte sur (muestras SC-8, SC-24). Las diferencias entre los mismos son sobre todo de carácter petrológico, tamaño de grano y abundancia de minerales máficos, así como la existencia de enclaves y deformación. Las muestras tomadas hacia el S presentan un tamaño de grano más pequeño, mayor contenido de máficos y no presentan deformación ni enclaves. Estas características aparecen tanto en campo como en lámina delgada.



Figura 29.- Imagen satelital (Landsat) de la Isla Santa Catalina. Con estrellas verdes se marcan las localizaciones de las muestras colectadas.

Descripción de los Análisis $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$

De la muestra SC-17 que corresponde al granito norte, se analizaron muestras de biotita y hornblenda. En la figura 30 se muestra el espectro de edad obtenido para ambos minerales.

La biotita rindió una edad de meseta de 87.20 ± 0.35 Ma en completo acuerdo con la edad de isocrona de 87.64 ± 0.86 Ma, calculada con las fracciones que definen la edad de meseta

(ver línea de color verde en la figura 30). Las hornblendas de esta muestra rinden edades similares a la biotita, sin embargo su distribución en el espectro de edad no define una meseta. Los datos de la hornblenda se graficaron en el diagrama de correlación, como puede verse en la figura 31, su distribución no permite definir una línea recta. La mejor estimación de la edad de la hornblenda se toma de la fracción central del segundo experimento con una edad de 90.30 ± 0.85 Ma. Es posible suponer que esta edad represente el límite inferior de la edad de enfriamiento de la hornblenda debido a que representa el 48% del ^{39}Ar liberado en un solo paso. Con base en la forma escalonada del espectro de edad, puede inferirse que de realizarse más etapas de calentamiento en esta región del espectro de edad, se obtenga una edad mayor. Los resultados ^{40}Ar - ^{39}Ar en esta muestra son congruentes con las edades 96.4 ± 1.9 y 93.51 ± 0.85 Ma, obtenidas por U-Pb en circones separados de las muestras (SC-17 y SC-20).

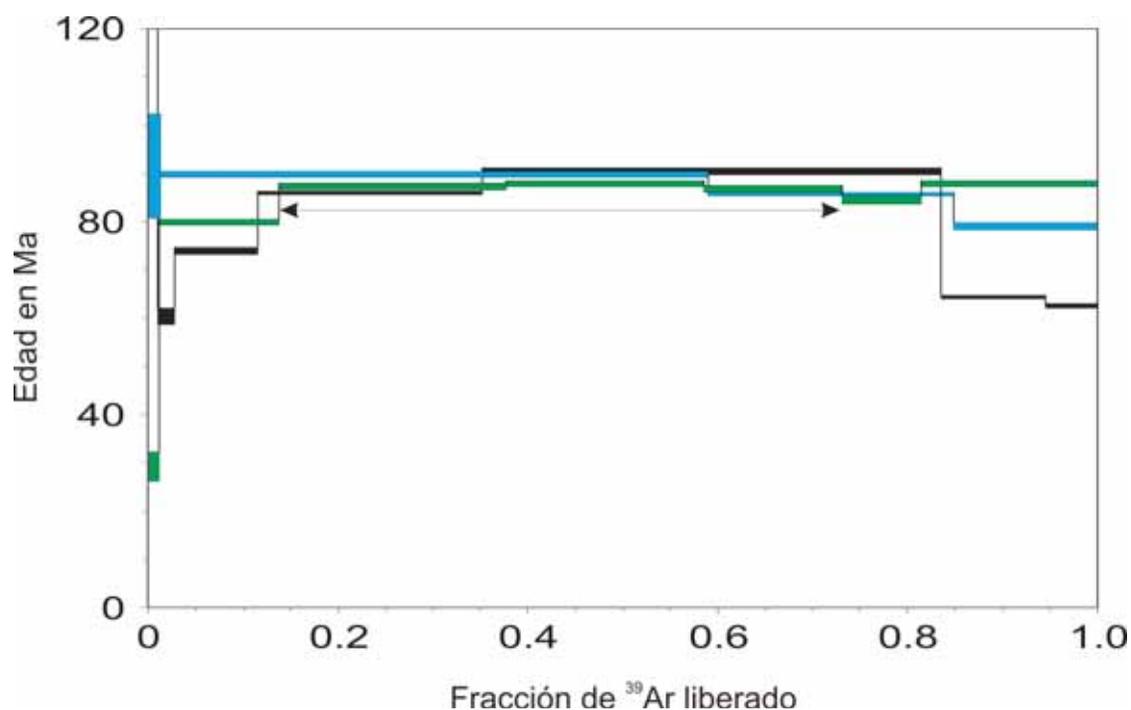


Figura 30.- Espectro de edad para la muestra SC-17, en verde: biotita; azul y negro: hornblenda.

Del granito sur se analizó por ^{40}Ar - ^{39}Ar un concentrado de biotita de la muestra SC-24. Las edades obtenidas en los dos experimentos rinden espectros de edad reproducibles y con muy ligera pérdida de argón. Los espectros de edad (Figura 32) son casi planos con edades de meseta estadísticamente indistinguibles (17.86 ± 0.14 y 18.02 ± 0.13 Ma). Este resultado es congruente con la edad obtenida para el granito sur por U-Pb, muestra SC-8 que rinde una edad de 19.21 ± 0.32 Ma.

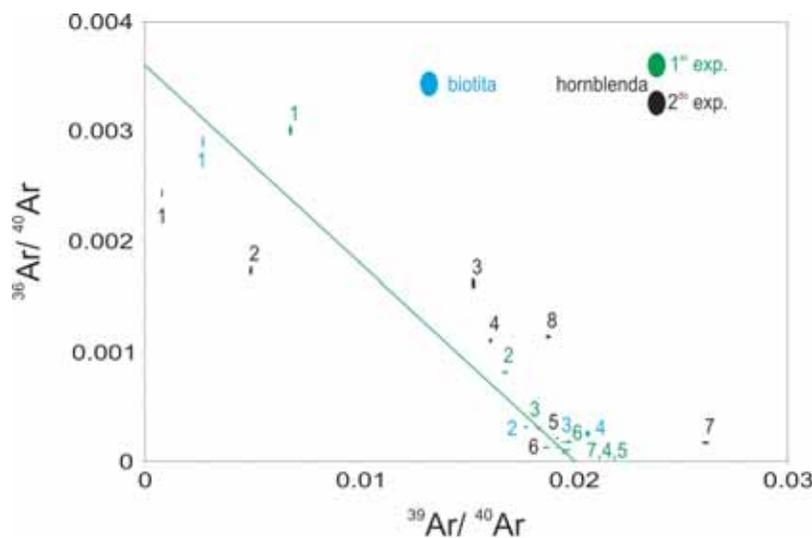


Figura 31.- Diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para SC-17.

Estos resultados permiten afirmar la existencia de dos granitoides diferentes en la isla Santa Catalina uno emplazado en el Cretácico Superior y otro en el Mioceno.

Por último, en la zona Norte, se observa deformación en lámina delgada. Posiblemente el evento de deformación está registrado por las edades ^{40}Ar - ^{39}Ar en hornblenda y biotita de la muestra SC-17. Con base en los resultados de experimentos de trazas de fisión realizados se sabe que esta deformación no está relacionada con la exhumación de la isla, que fue bastante posterior (John Fletcher, comunicación personal).

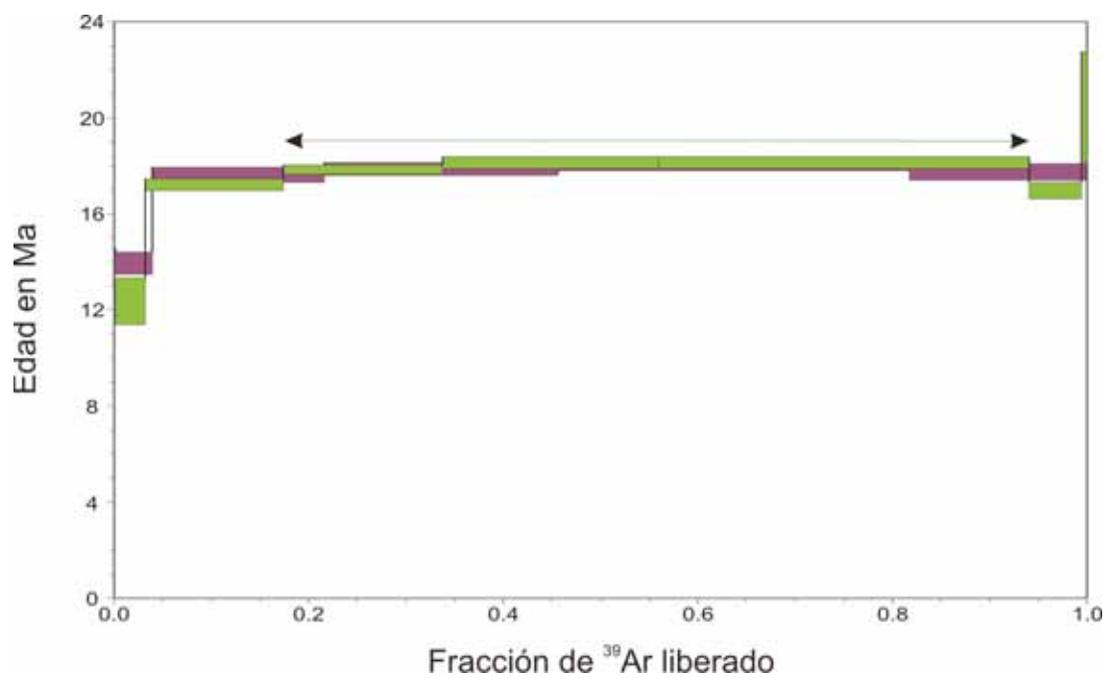


Figura 32.- Espectro de edad de dos experimentos en biotita, muestra SC-24. La flecha indica la extensión de la edad de meseta.

IV.1.1.2.1.2 Isla Santa Cruz



Figura 33.- Imagen satelital (Landsat) de la Isla Santa Cruz. Con estrellas se marcan los sitios de muestreo.

Se encuentra situada al sur de la isla Santa Catalina. Con una extensión cercana a los 7 x 3 km de extensión (Figura 33). Está compuesta principalmente por roca plutónica deformada, esta deformación se puede observar tanto en campo, por la presencia de una zona milonítica (Figura 34), como en lámina delgada (Apéndice III). Se tomaron 5 muestras a lo largo del margen NO.



Figura 34.- Imagen de la zona milonítica en la isla Santa Cruz

Descripción de los Análisis ^{40}Ar - ^{39}Ar

Primero se analizaron los concentrados de biotita (SCR-27 y SCR-28) (Figura 35), obteniéndose patrones similares y edades de meseta estadísticamente indistinguibles para ambas muestras (90.65 ± 0.91 y 91.62 ± 0.43 Ma, respectivamente). Las edades de meseta coinciden con la edad de la isocrona (91.70 ± 0.71 Ma) obtenida integrando ambas muestras. Se seleccionaron las fracciones centrales de las muestras como representativas, ya que despliegan un patrón de pérdida de Ar al inicio del experimento y al final del mismo. Aunque, para la muestra SCR-28, ambos ensayos son análogos, se seleccionó como válido el segundo experimento (ver línea naranja en la figura 35), ya que en el primero se puede ver un salto brusco en uno de los escalones centrales que pudo deberse a problemas técnicos en el espectrómetro, haciendo que la edad obtenida fuera inferior a la del segundo caso.

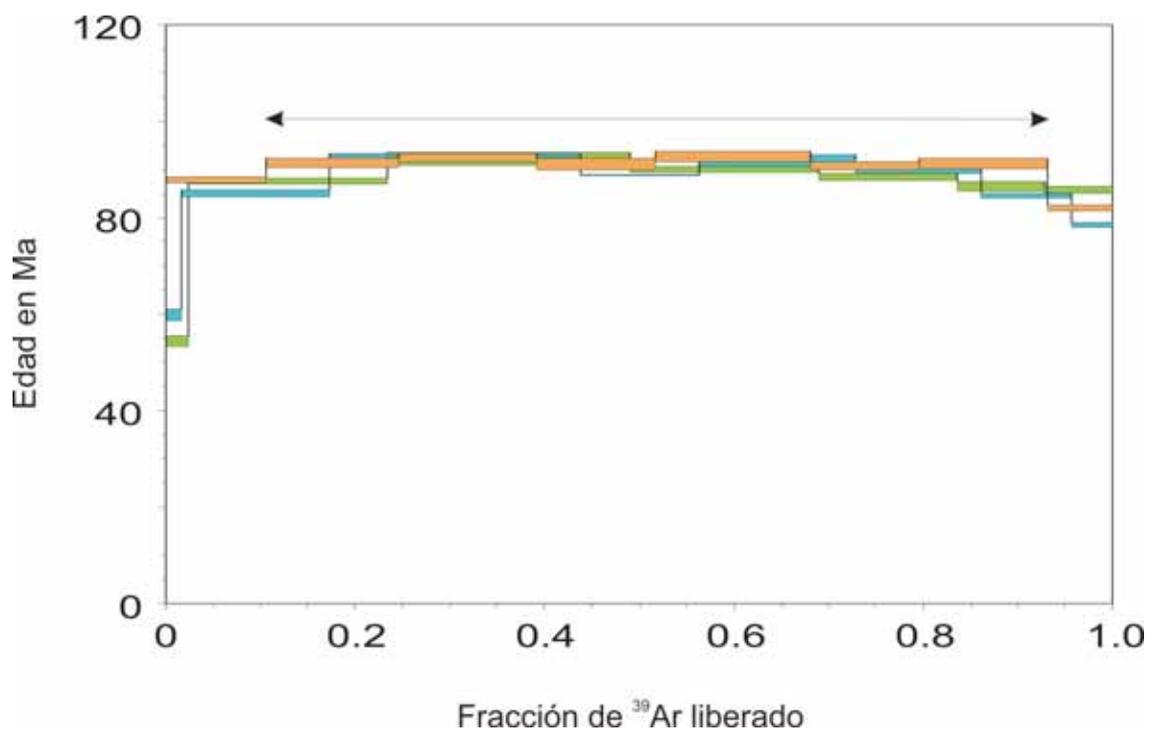


Figura 35.- Espectros de edad de las biotitas de SCR-27 (verde) y SCR-28 (azul y naranja). La flecha indica la extensión de la meseta de SCR-28.

En la muestra SCR-27, se contó con concentrados de Hornblenda y Biotita (Figura 36). En el concentrado de Hb se realizó un segundo experimento, integrado por más intervalos, con el fin de definir mejor la pérdida de Ar que se presenta al principio. Se seleccionaron las fracciones centrales como las más radiogénicas ya que presentan una evolución prácticamente lineal. Resultando una edad de meseta de 98.23 ± 0.95 Ma, mayor a la obtenida a partir de la Bt. Con esto podemos inferir que las Bt pudieron estar afectadas por la deformación.

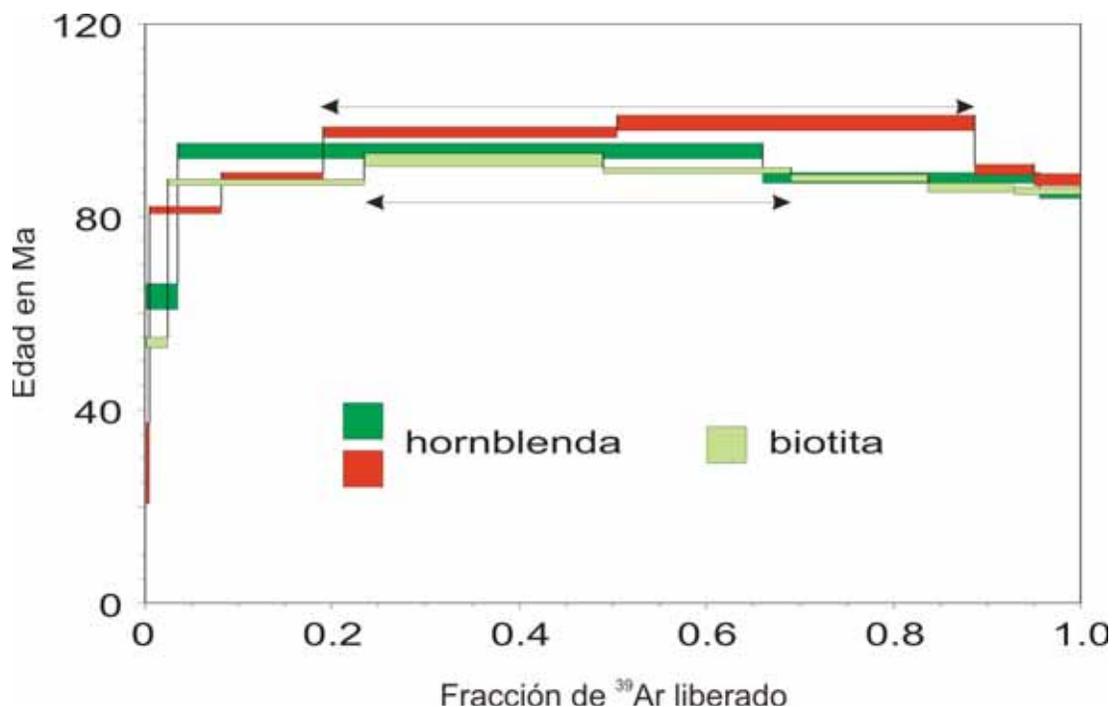


Figura 36.- Espectro de edad de la muestra SCR-27 . Las flechas indican la extensión de la meseta reportada en la tabla V para cada experimento.

Al procesar el resto de muestras (SCR-26, SCR-30 y SCR-31), se observó que su comportamiento era semejante al seguido por SCR-27 (Figura 37), obteniéndose edades cercanas a la misma (98.72 ± 0.51 Ma para SCR-26, 98.23 ± 0.95 Ma para SCR-27 y 103.44 ± 1.36 Ma para SCR-30). No se pudo obtener una edad de meseta confiable para SCR-31, por lo que se optó por el graficado conjunto de todas ellas en un mismo diagrama de correlación (Figura 38). Seleccionando las fases más radiogénicas de cada una de las muestras y forzando la isocrona a una relación de $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_i=295.5$, las muestras siguen la línea recta de mejor ajuste, arrojando una edad de 98.96 ± 0.82 Ma.

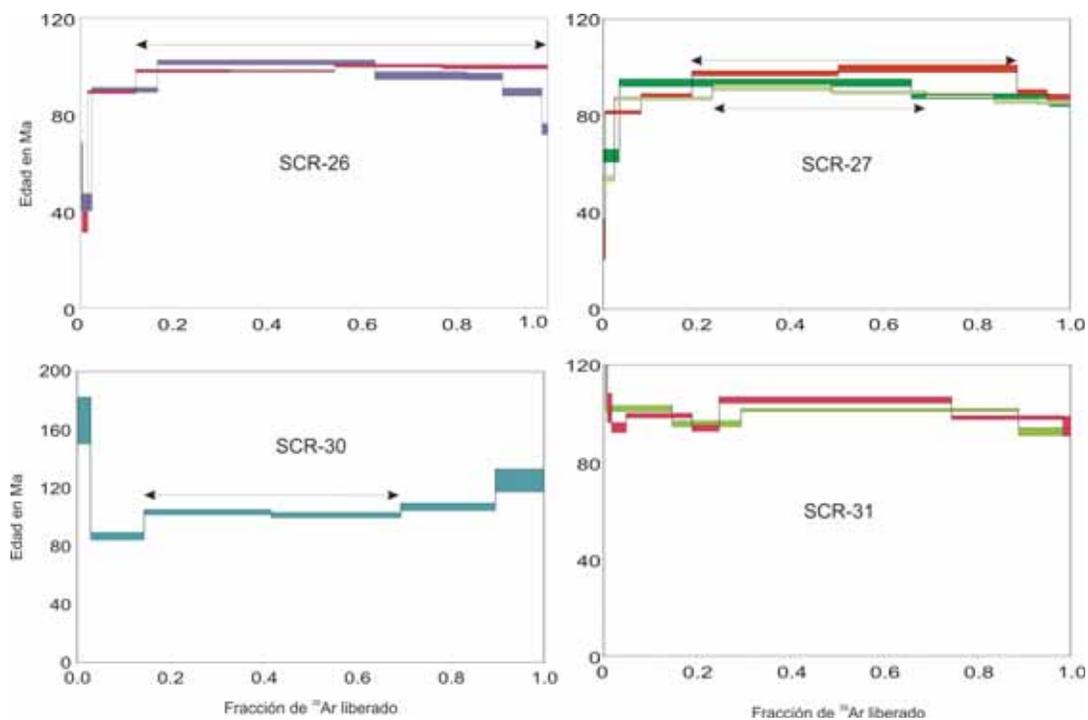


Figura 37.- Espectro de edad de las hornblendas SCR-26, SCR-27, SCR-30 y SCR-31.

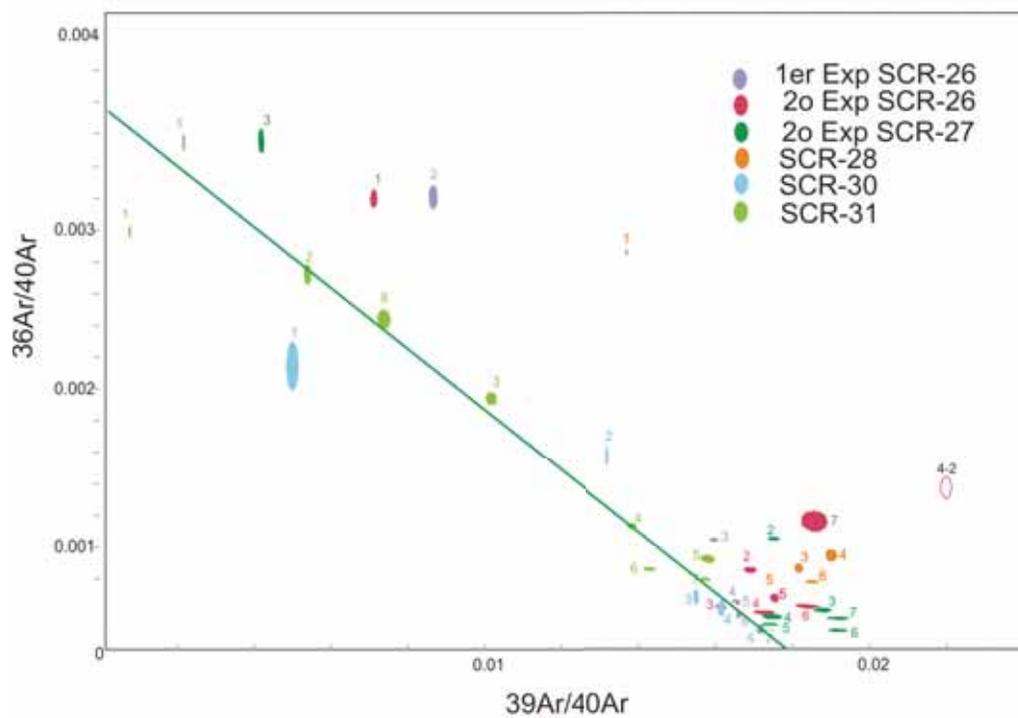


Figura 38.- Diagrama de correlación conjunto de las muestras SCR-26, SCR-27, SCR-30 y SCR-31, de la Isla Santa Cruz.

A partir de los resultados anteriores se deduce que la isla es homogénea en cuanto a edad se refiere, siendo ésta acorde con las edades obtenidas a partir del análisis de zircones, 97.4 ± 1.3 , 98.1 ± 1.8 , 96.04 ± 0.92 y 96.4 ± 1.6 , de las muestras SCR-26, SCR-27, SCR-28 y SCR-30, respectivamente.

IV.1.1.2.1.3 Isla San Diego

Es la isla más meridional del área de estudio, en la que se colectaron muestras, y la de menor tamaño, solamente 1.5 x 0.5 km (Figura 39). Está formada, casi en su totalidad, por material plutónico, que presenta las mismas características a lo largo de toda la isla. Sus características petrológicas son similares a las obtenidas para el resto de las islas, presentando una tasa de deformación muy escasa.



Figura 39.- Imagen satelital (Landsat) de la Isla San Diego. Con la estrella verde se marca la situación de la muestra colectada.

Descripción de los Análisis ^{40}Ar - ^{39}Ar

Se colectó una muestra de roca plutónica (SD-25) (Figura 39), que es la que constituye la mayor parte de la isla. Se utilizó para realizar el ensayo un concentrado de Bt. En la figura 40 se pueden ver los resultados de los dos experimentos realizados. Obteniéndose una edad de meseta 95.76 ± 0.47 Ma. En este caso también se seleccionó el segundo ensayo (línea morada) porque es el que seguía un mejor patrón de calentamiento, aunque ambos experimentos ofrecían edades equivalentes.

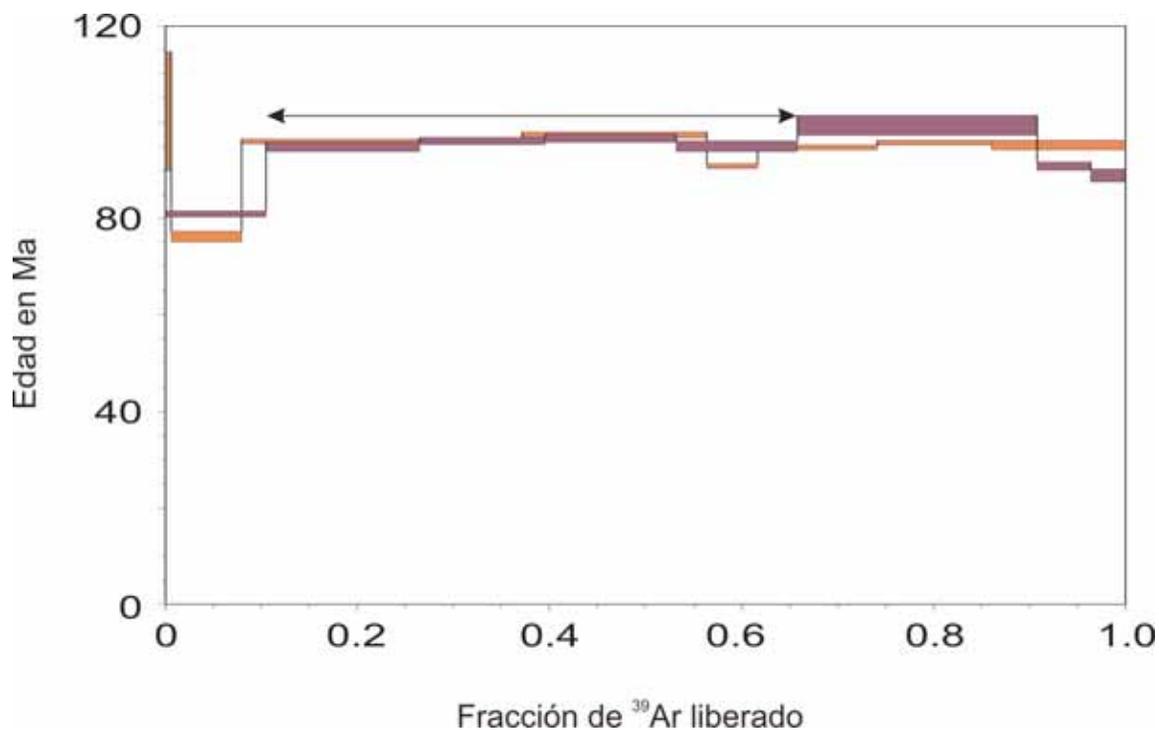


Figura 40.-Espectro de edad de los dos experimentos en biotita de SD-25. La flecha denota las fracciones utilizadas para calcular la edad de meseta (2^{do} experimento en color morado).

La edad de meseta concuerda con la edad obtenida en el diagrama de correlación (Figura 41). Y, con la obtenida con el método de U/Pb, 94.7 ± 1.8 Ma.

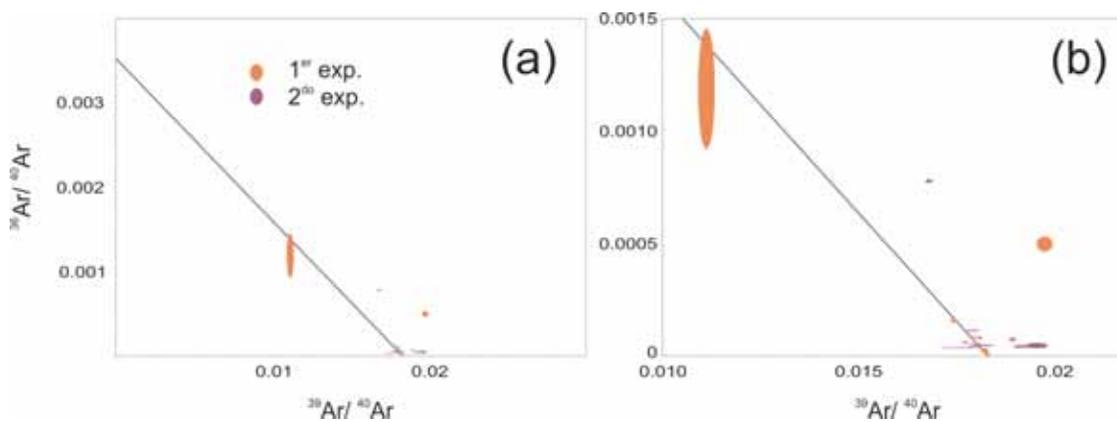


Figura 41.- (a) Diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ con los datos de los dos experimentos realizados en la biotita de la Isla San Diego, (b) Ampliación del diagrama mostrado en (a).

IV.1.1.2.1.4 Punta Botella

Se decidió reconocer este punto situado en la Península porque, a partir del informe que el Consejo de Recursos Minerales realizó en 1999, se conocía la existencia de un afloramiento granítico en el lugar, pero se desconocía la antigüedad del mismo y si sus características eran similares a las rocas encontradas en las islas.

El lugar estaba formado por material de composición granítica, de tamaño de grano grande, con alto contenido en feldespato potásico; del cual se tomó una muestra PB-32 (Figura 42).



Figura 42.- Afloramiento plutónico de Punta Botella (a la derecha de la foto).

Descripción de los Análisis ^{40}Ar - ^{39}Ar

Para conocer la edad de la muestra se llevaron a cabo dos ensayos. El primero no se pudo finalizar porque en la última fracción analizada (línea verde en la figura 43), la muestra liberó una concentración excesiva de Ar que saturó la señal de la masa 40 y consecuentemente imposibilitó el cálculo realista de la edad de esta fracción. Teniendo en cuenta esta incidencia se procedió a repetir el experimento multiplicando el número de pasos en el área crítica.

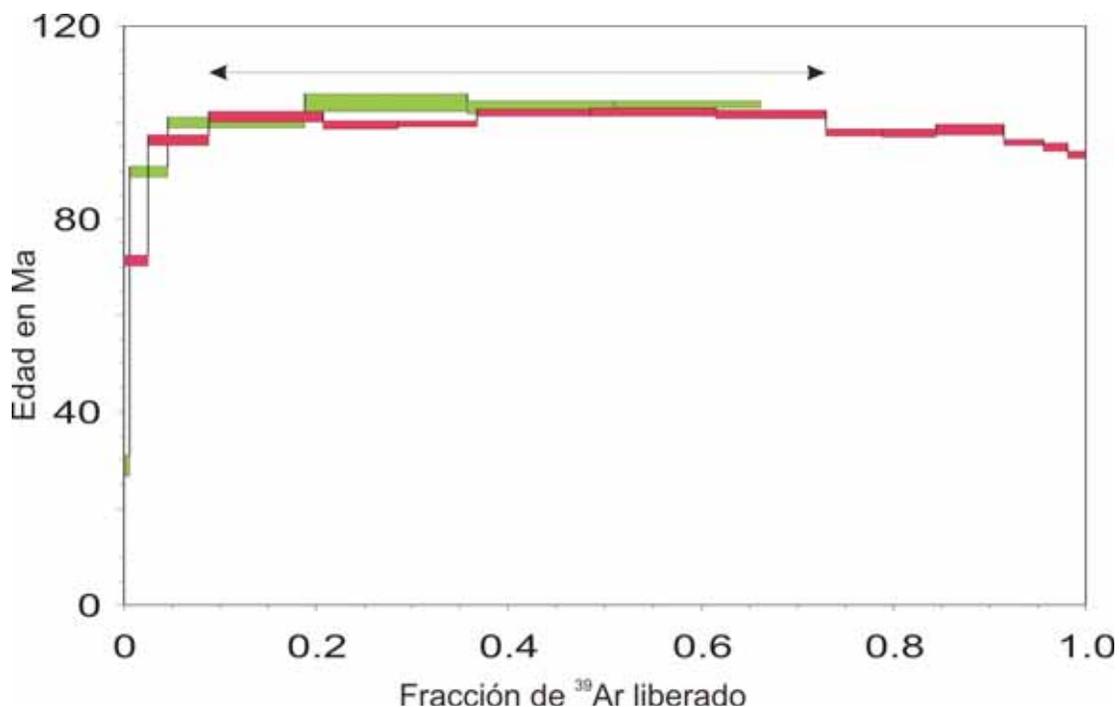


Figura 43.- Espectro de edad de los dos experimentos en biotita de PB-32. La flecha denota las fracciones utilizadas para calcular la edad de meseta (2^{do} experimento en color rojo)

La muestra presenta un patrón de pérdida de Ar al inicio del experimento. Se obtuvo una edad de meseta de 100.94 ± 0.51 Ma, como ésta no muestra una evolución perfectamente uniforme, se compararon los datos con los obtenidos en el diagrama de correlación (Figura 44), el cual ofreció un resultado completamente coherente, 99.28 ± 1.28 Ma.

En resumen las edades obtenidas para todas las muestras por ^{40}Ar - ^{39}Ar concuerdan con las obtenidas por U/Pb. Nos indican la existencia de dos eventos de emplazamiento, uno en el Mioceno Temprano, y otro en el Cretácico Superior, al que pertenecen la gran mayoría de las muestras obtenidas, y por lo tanto las islas de las región que nos ocupa.

IV.1.1.2.2 Descripción de las Muestras Marinas

Se cuenta con muestras marinas tanto de la expedición DANA-04 como ROCA08 (Figura 44). Son muestras de granodiorita y tonalita, lo que coincide con la naturaleza del resto de rocas plutónicas analizadas.

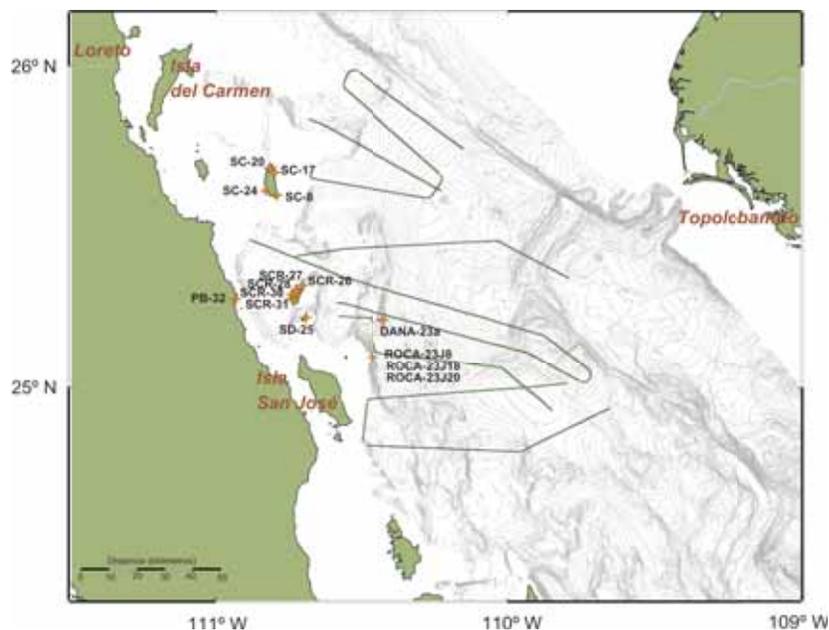


Figura 44.- Localización de las muestras de las islas y submarinas.

De la expedición DANA se ha descrito una muestra, DANA23a, es una granodiorita de Bt. Se contaba con fechamientos por el método de U-Pb de esta muestra, anteriores a la realización de la tesis. Es una muestra del Cretácico Superior, 93.4 ± 0.3 Ma (Peter Lonsdale, comunicación personal). Con esta muestra se definió la naturaleza del basamento plutónico, ya que fue obtenida en un dragado realizado en el monte San Blas, entre los perfiles 12 y 13.

De la expedición ROCA-08, se han descrito tres muestras, ROCA23J-8 (tonalita de Bt y Hb), ROCA23J-18 (granodiorita de Hb) y ROCA23J-20 (Tonalita de Bt). Estas muestras fueron colectadas de forma selectiva con un robot sobre el escarpe cercano a la isla Las

Ánimas, sobre la falla El Coyote. Nos han servido para delimitar, de una forma más segura, la localización del basamento plutónico.

Una descripción más detallada de las muestras se puede consultar en el Apéndice VI.

IV.1.1.2.3 Otros Datos

Para todas las muestras de las que se obtuvieron edades U-Pb se hicieron análisis geoquímicos de elementos mayores y traza, los cuales se presentan en el Apéndice IV.

En la Figura 45 se presentan una clasificación de las muestras analizadas. En ella se puede observar que todas las muestras pertenecen al grupo de los calcoalcalinos, por lo que confirmamos que se trata de rocas de arco.

En la Figura 46, se ha graficado una comparación de la composición de elementos traza de todas las muestras, observándose que todas las muestras presentan una misma tendencia general, aunque las muestras SD-25 y SCR-27 se separan un poco de dicha tendencia.

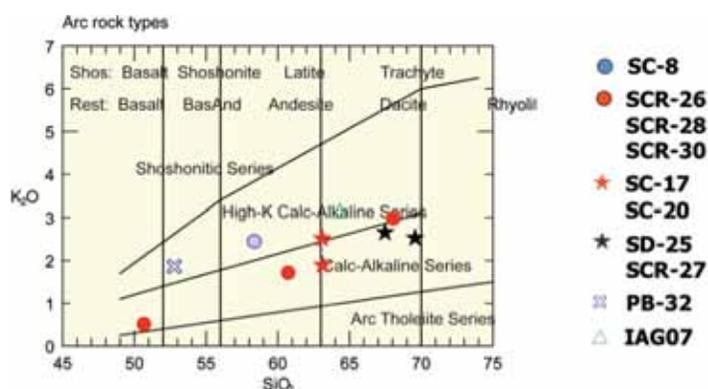


Figura 45.- Diagrama SiO₂ contra K.

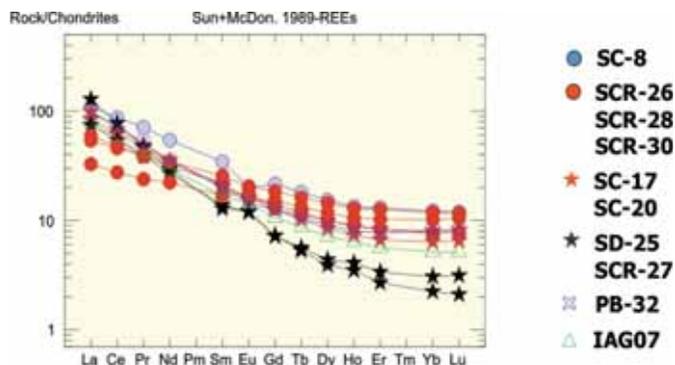


Figura 46.- Diagrama de elementos traza

Como se ha mencionado en otros apartados del trabajo estos análisis solamente se utilizan de apoyo al resto de datos ya que no entran dentro de los objetivos principales de la tesis.

IV.1.2 Basamento Continental de Naturaleza Volcánica

Este tipo de basamento se encuentra situado entre el basamento plutónico y la corteza oceánica de "nueva creación". La naturaleza volcánica del área se ha definido a partir de una muestra de esta composición, dragada en el Macizo Farallón-Sur.

Se ha incluido esta clase de basamento en la tesis, porque dentro del bloque interpretado como corteza continental aparecen áreas que no siguen las características sísmicas definidas para el basamento plutónico. Esto se ha hecho conociendo las limitaciones del método de sísmica de reflexión y relacionando las zonas donde existen muestras previas con una cierta firma en las secciones sísmicas. Es necesario tener en cuenta las limitaciones de este análisis, por lo que se considera que estos criterios son válidos únicamente para este trabajo.

IV.1.2.1 Características

IV.1.2.1.1 Características Batimétricas

Se encuentra situado en las orillas de la cuenca Farallón, y limita con el escarpe de la falla San Martín. Su profundidad es intermedia entre el basamento plutónico y la corteza oceánica. En la Figura 4 se puede ver que coincide aproximadamente con los colores verdes.

IV.1.2.1.2 Características Sísmicas

En las secciones sísmicas se observa un horizonte de gran amplitud, por debajo del paquete sedimentario, formado por pequeños tramos discontinuos (Figura 47). Ocasionalmente, podría llegar a confundirse con corteza oceánica si la sección se encontrara sobremigrada. Existen áreas en las que se observa cierta estratificación por debajo del mismo, debido a que la señal consigue reflejarse por debajo de la interfase (Perfil 13_3).

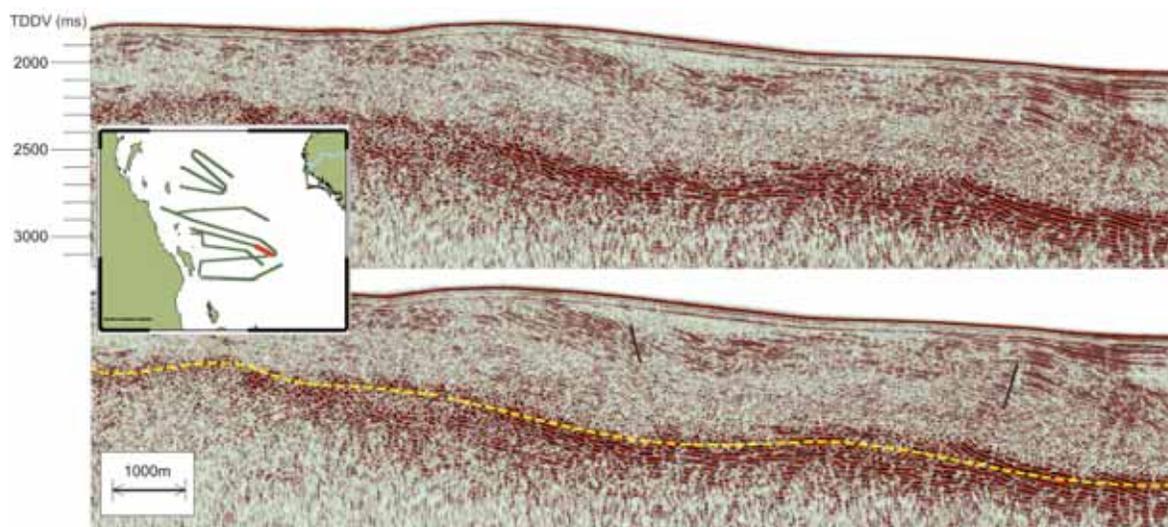


Figura 47.- Ejemplo de basamento acústico identificado como de naturaleza volcánica (Este fragmento pertenece al perfil 13_3. Ver apéndice para una vista más general)

El Macizo Farallón-Sur (Perfiles 13_3 y 14_1_2) ha sido el que ha dado las directrices para definir este tipo de basamento. Una muestra de la parte norte del macizo norte, obtenida por dragado, lo define como un complejo volcánico de composición silícea (Peter Lonsdale, comunicación personal).

IV.1.2.1.3 Cuencas y Estructuras Principales en el Área

El Macizo Farallón-Sur (Perfiles 13_3 y 14) delimita la cuenca Farallón en su parte oeste. Es un complejo volcánico silíceo, dividido en dos montículos principales (Figura 4) con pequeños centros eruptivos en la parte superior. La falla San Cosme separa ambos montículos, es una falla normal con vergencia hacia el noroeste que se puede seguir tanto en el perfil 14_1_2 como en el perfil 13_3. Por encima del basamento acústico aparece un paquete sedimentario de aproximadamente 600 m de espesor (Perfil 14_1_2), que aumenta su potencia hacia el Sur (Perfil 13_3). Tanto el paquete sedimentario como el basamento siguen la misma estructura de deformación, lo que podría indicar una deformación posterior a la depositación de los sedimentos que afectó a todo el conjunto (Figura 47). Se infiere la existencia de gas por encima del basamento debido a la ruptura de la estructura sedimentaria. En su límite Noroeste se encuentra la zona de falla San Telmo, que lo separa de la cuenca Farallón, se trata de una serie de fallas inactivas con dirección paralela a la dorsal y buzamiento hacia el noroeste.

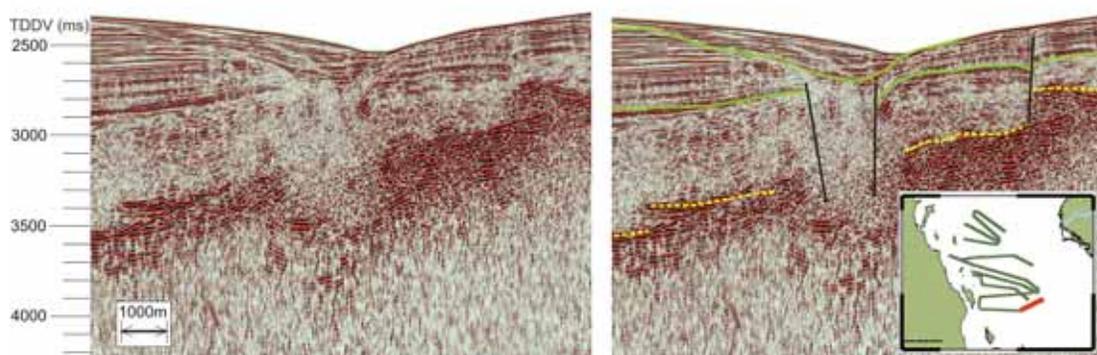


Figura 48.- Falla transforme abandonada de Pescadero Norte (Perfil 8_1).

En el área también se localiza la falla transforme abandonada Pescadero Norte (Figura 48), que también se reconoce en la línea 8. Es una zona de fractura abandonada de aproximadamente 1.5 km, que afecta solamente a la unidad sismoestratigráfica inferior de la cuenca Pescadero. Por encima de esta unidad sismoestratigráfica los sedimentos se depositaron en el espacio generado por la falla. No se observan señales de deformación en el paquete sedimentario.

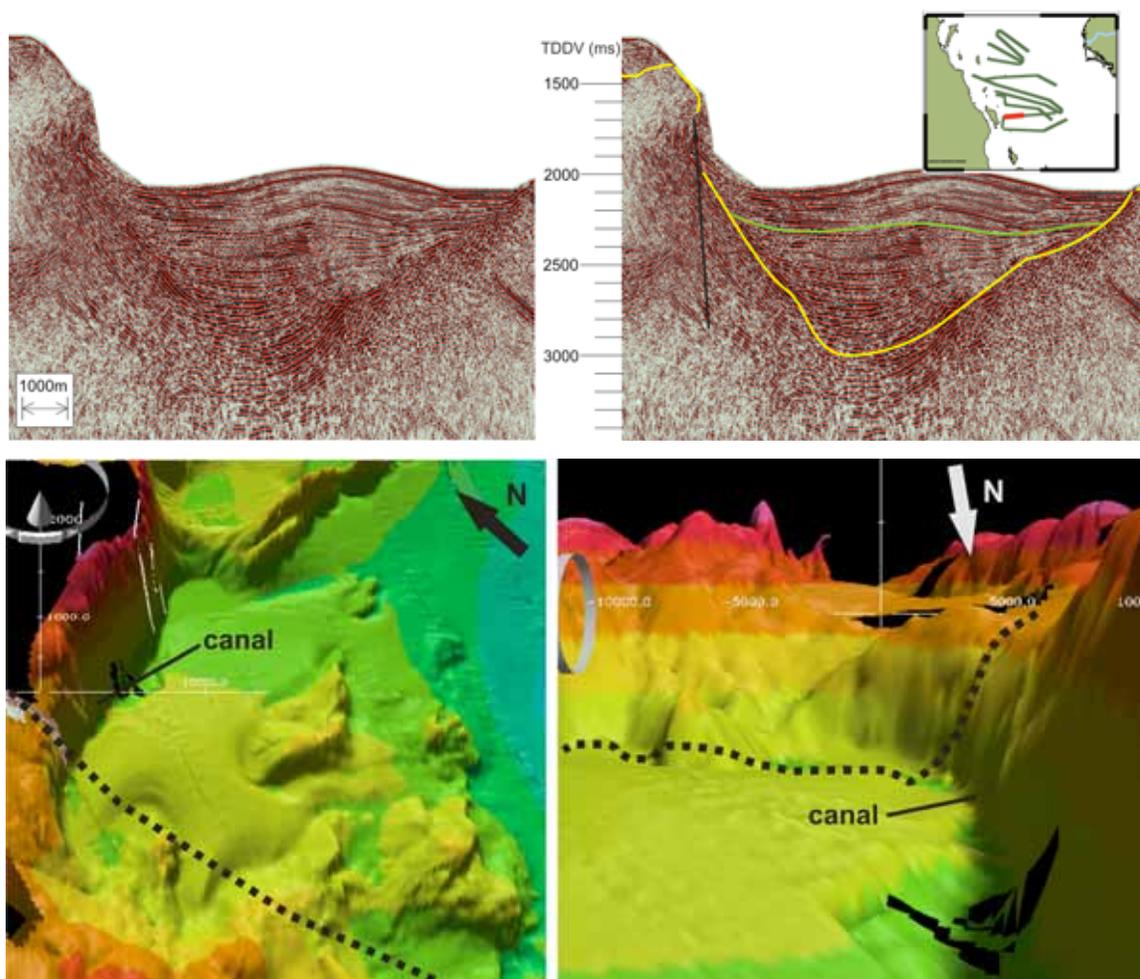


Figura 49.- Ejemplo de como afectan las corrientes marinas a la sedimentación en esta zona del Golfo de California (Amplición del Perfil 10_2). En la parte superior se observa el canal en la sección sísmica, mientras que en la parte inferior de la imagen la representación es a partir de datos batimétricos de ecosondas multihaz (la línea punteada marca la trayectoria del perfil 10_2).

También se observan, en el límite con algunas zonas de escarpe, pequeños canales formados por el fuerte poder de las mareas que actúan en el Golfo. Estos canales son zonas favorables para el paso de las corrientes e impiden que se produzca la sedimentación del material. Este es el caso que se muestra en la figura 49 (Perfil 10_2) donde se observa que en las zonas cercanas a los escarpes apenas aparece sedimentación, concentrándose esta en la región central, que no está afectada por las corrientes.

IV.1.2.1.4 Reflector Simulador de Fondo

Los reflectores sísmicos que cortan estructuras sedimentarias se relacionan generalmente con procesos geológicos que ocurren tras la deposición de los sedimentos. Una subclase de estos reflectores es el reflector simulador de fondo (en inglés *Bottom Simulating Reflector*, BSR). Estos reflectores se forman por procesos que dependen de la profundidad, con influencias de presión y temperatura en los sedimentos; y puede tratarse tanto de BSR formados por hidratos de gas, como BSR formados por diagénesis de ópalo A (amorfo) a ópalo CT (cristalino) (Berndt et al, 2004). En el Capítulo V se aporta más información sobre este tema.

En los perfiles de sísmica de reflexión el BSR es un reflector de gran amplitud, paralelo al fondo del mar que corta las estructuras sedimentarias anteriores, su polaridad puede ser igual o contraria a la del fondo, dependiendo del tipo de BSR que se esté viendo (Bangs et al., 1993, Berndt et al, 2004).

Se infiere la existencia de un reflector de esta naturaleza en la parte superior del Macizo Farallón-Sur en los perfiles 13_3 y 14_1_2 (Figura 50). Aunque existen dudas acerca de su origen, se intentarán aclarar en el momento de realizar la Discusión de los resultados.

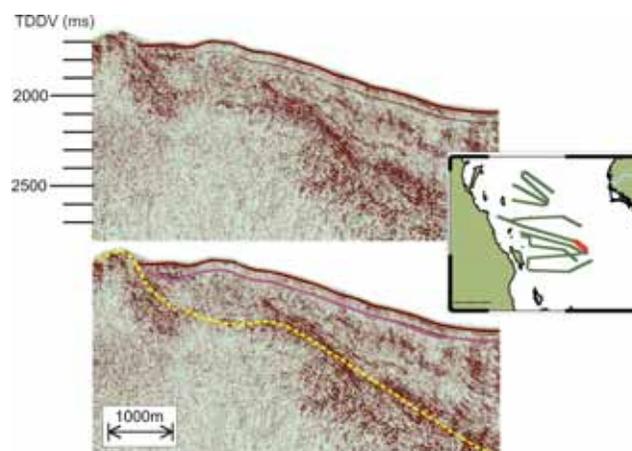


Figura 50.- Reflector Simulador de Fondo (línea morada) en el Macizo Farallón-Sur.

IV.1.3 Basamento Oceánico (Corteza Oceánica de Nueva Creación)

Está situado en la zona central de cuenca Farallón, en la áreas próximas a la dorsal.

IV.1.3.1 Características

IV.1.3.1.1 Características Batimétricas

Se encuentra ocupando las partes más profundas de la cuenca Farallón y rodea tanto a la dorsal activa como a la abandonada. Se vincula con los colores azules y morados en la figura 4.

IV.1.3.1.2 Características Sísmicas

El basamento oceánico es identificado como un reflector de gran amplitud, no continuo, que se sitúa alternativamente a varios niveles de profundidad, que se interpretan como sills

(Figura 51a). En ocasiones se pueden diferenciar aspectos característicos de los mismos, como reflectores cóncavos hacia arriba (Rocchi et al., 2007; Hansen et al., 2005) que suelen afectar durante su emplazamiento a los estratos que se encuentran por encima haciendo que estos se deformen (Hansen y Cartwright, 2006) (Figura 50b). Normalmente, debido al gran contraste de impedancias entre el sill y la roca encajonante, éste suele reflejar gran cantidad de energía (Trude et al., 2003), por lo que bajo estas estructuras aparecen zonas poco iluminadas (Rocchi et al, 2007; Smallwood y Maresh, 2002).

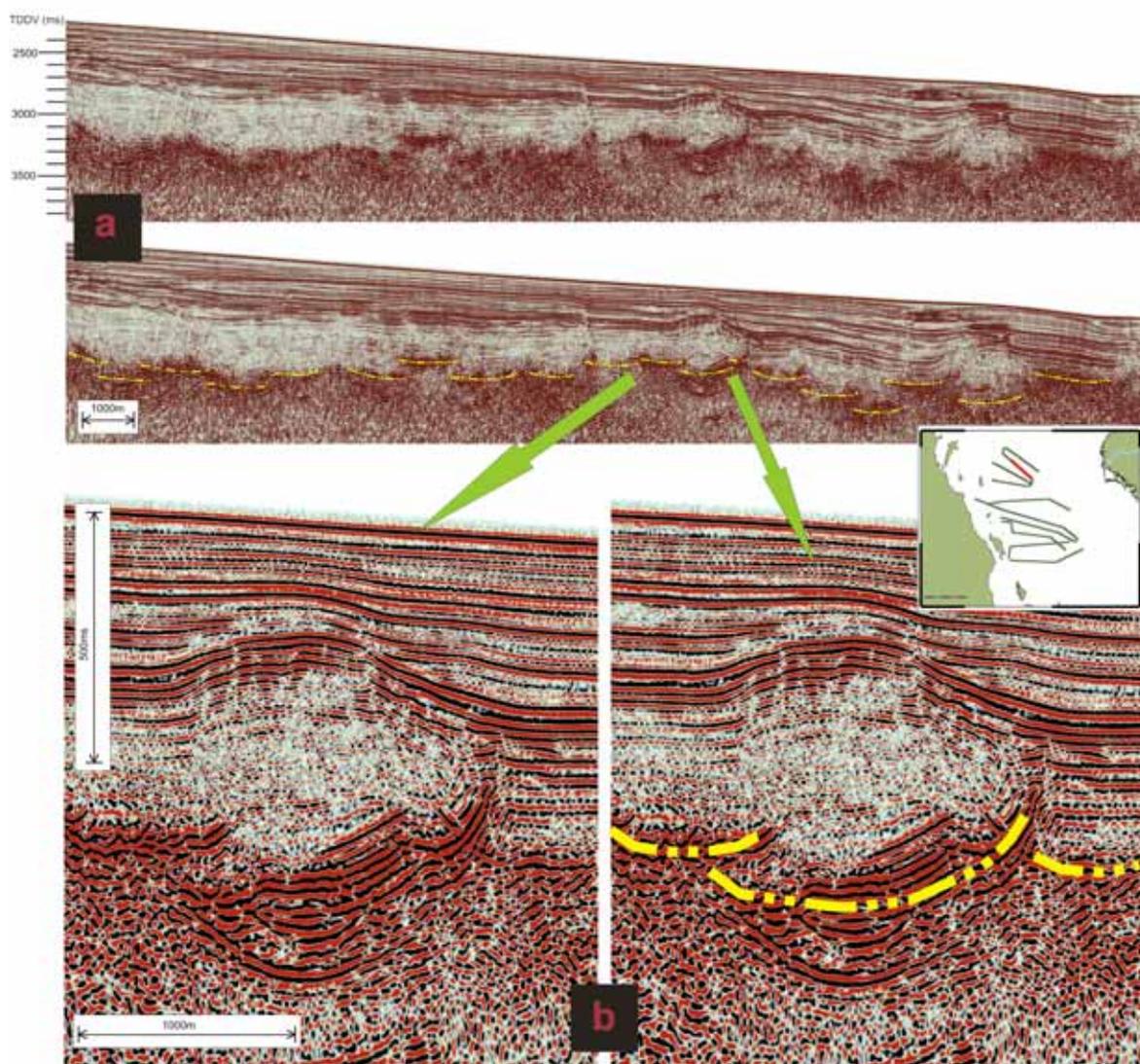


Figura 51.- (a) Corteza oceánica de "nueva creación", el basamento acústico se marca con una línea amarilla. (b) Sill afectando a los elementos superiores. Estas figuras son una ampliación del Perfil 21_2.

IV.1.3.1.3 Cuencas y Estructuras Principales en el Área

Hacia el Este de la sección sísmica 15_3 se encuentra la dorsal de Farallón (Figura 52), que es la estructura principal de esta zona. Está limitada por escarpes tanto en la parte NW como en la SE, y tiene una dirección aproximada de 033°. No se va a profundizar más en sus características ya que no entra dentro de los objetivos de la tesis.

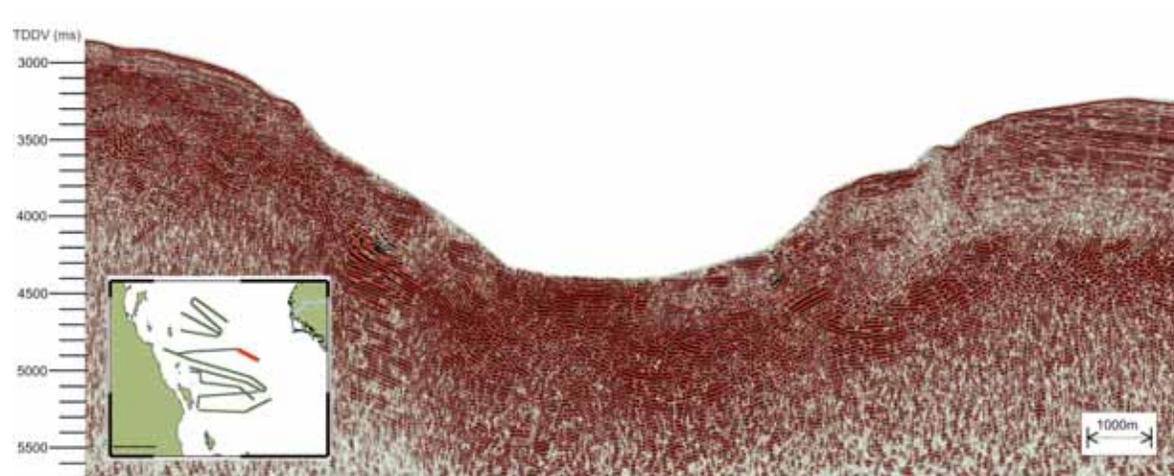


Figura 52.- Dorsal de Farallón (Sección 15_3)

La cuenca Farallón, es la mayor de la región de estudio. Se divide en dos unidades sismoestratigráficas. La inferior está afectada por fallas normales secundarias y presenta un alto contenido en gas (la interpretación de existencia de gas en secciones sísmicas se expone en el apartado IV.2.3), mientras que, como sucede en el resto de cuencas, la unidad sismoestratigráfica superior no se encuentra afectada por esta deformación. Llega a alcanzar espesores de sedimentos de aproximadamente 2000 m, en el depocentro de la cuenca, situado donde se infiere que se encuentra la antigua zona de dorsal (Perfil 14_3), al SW de la actual.

IV.2 Otros Resultados

IV.2.1 Identificación y Correlación de Fallas

Las fallas que se describen en este apartado se han clasificado, como ya se mencionó en apartados anteriores, en principales y secundarias. Las fallas principales son las que afectan al basamento, ya sean inactivas o activas, y son las que se reportan en las figuras. Las fallas secundarias son las que afectan solamente al paquete sedimentario.

Los criterios utilizados para inferir el movimiento en dirección de las fallas, ya que éste no se observa directamente en las líneas sísmicas, han sido la variación de espesores o la desaparición de sedimentos en alguno de los de lados de la falla (Figura 53), y la morfología de la estructura en relación con la estructura general del Golfo, en esa zona.

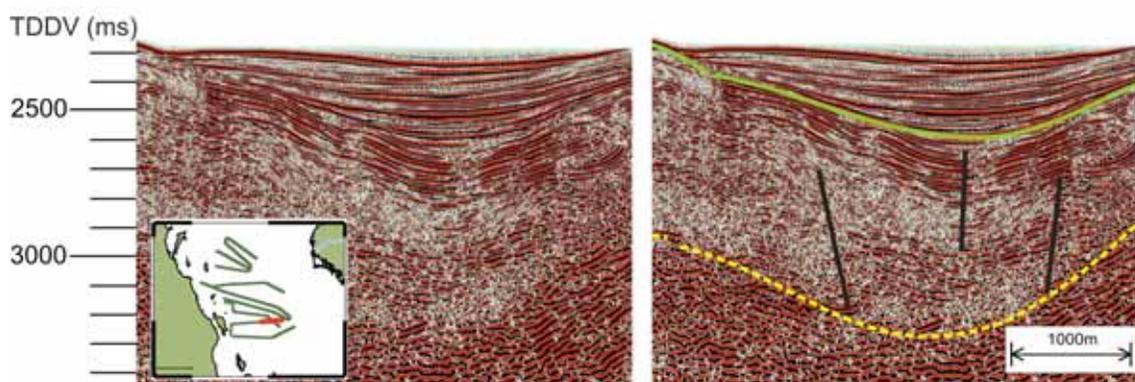


Figura 53.- Imagen de una falla transforme identificada con sísmica de reflexión (ampliación del Perfil 10_2)

En la figura 54 se muestran las fallas principales identificadas en las líneas sísmicas, se han inferido pequeños tramos basándose en la batimetría en las zonas en donde la existencia de la falla era evidente.

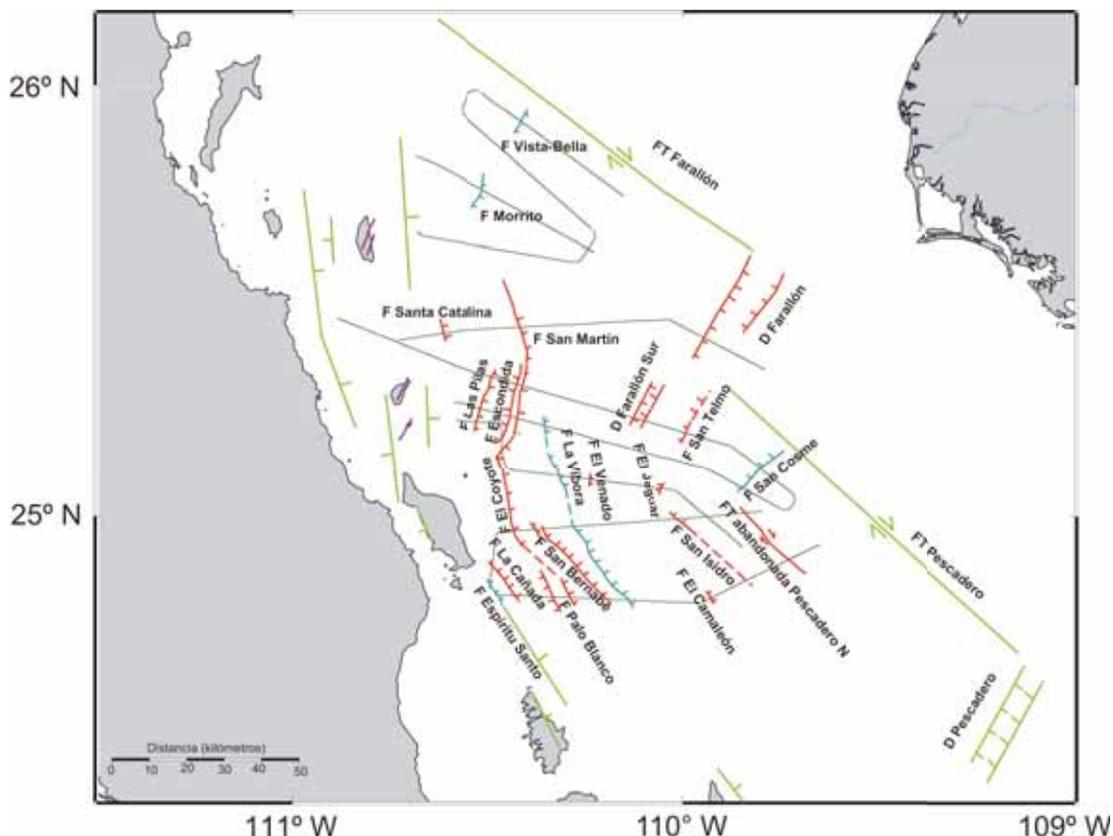


Figura 54.- Fallas identificadas en los perfiles sísmicos (rojo para inactivas, azul para las que se suponen activas). Con línea punteada se señalan las partes que han sido inferidas por batimetría. En morado se encuentran los lineamientos observados en las islas en imágenes aéreas y satelitales, y en verde se marcan fallas señaladas en otros trabajos (Lonsdale, 1989, Umhoefer et al., 2002 y Fletcher et al., 2003).

Para la correlación de fallas se utilizaron criterios estructurales, es decir, se buscaron similitudes contextuales en las características de las fallas, buscando que su comportamiento fuera similar al contexto geológico en el que se encuentran.

Las fallas identificadas teniendo en cuenta los perfiles sísmicos, antes sólo estaban inferidas a partir de datos batimétricos (Fenby y Gastil, 1991), debido a la ausencia de datos sísmicos. Los resultados se presentan en la figura 55, donde se puede observar que la interpretación realizada por Fenby y Gastil coincide con la que se realizó a partir de los datos sísmicos solamente en el caso de grandes lineamientos. El otro problema de

interpretación a partir de batimetría aparece a la hora de correlacionar las fallas, que es errónea en varios casos. Con la sísmica dicha correlación es menos complicada ya que se pueden comparar las características de las fallas.

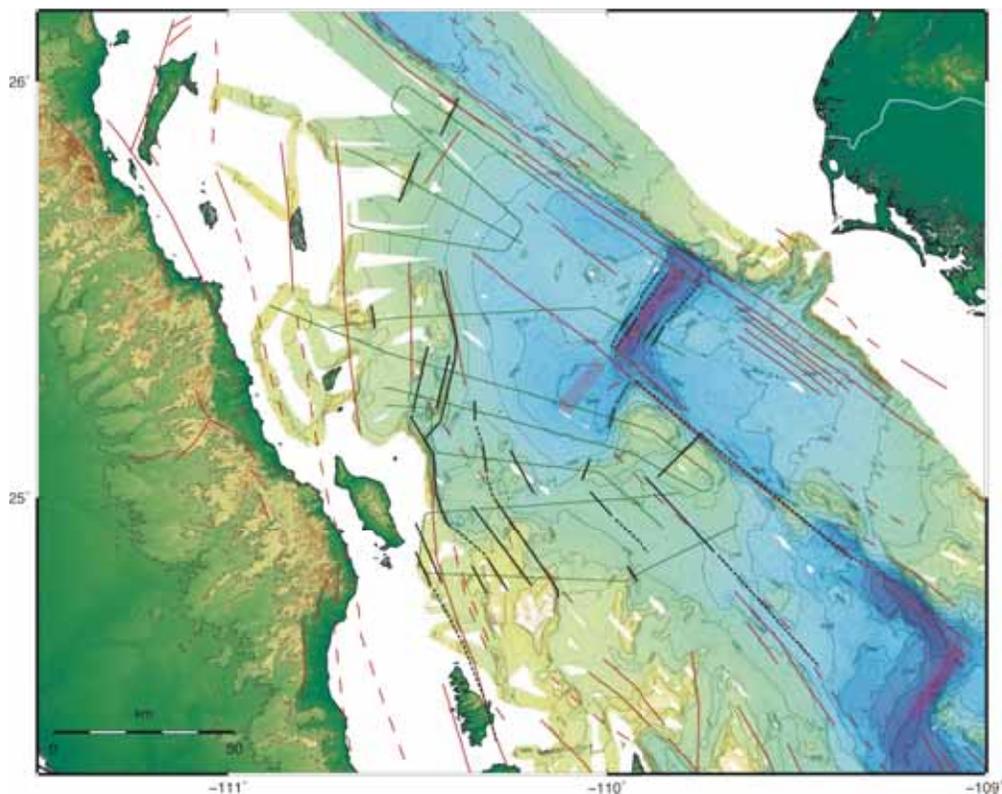


Figura 55.- Comparación entre las fallas identificadas en este trabajo (negro) con las inferidas por Fenby y Gastil (1991) a partir de datos batimétricos (rojo).

IV.2.2 Profundidad de Basamento y Espesor de Sedimentos

El basamento que se encuentra a mayor profundidad en la región (Figura 56) está situado en la cuenca Farallón, tanto en la zona que ocupa la dorsal actual como en la que ocupaba la antigua dorsal. Al analizar el mapa de profundidades hay que tener en cuenta que existen artificios, provocados por el programa de graficado, en lugares en los que no se cuenta con datos.

Para este trabajo también se graficó un mapa de isopacas de sedimentos (Figura 57) para comprobar si existía correlación entre los espesores de sedimentos encontrados y la profundidad del basamento acústico, observándose dicha correlación en la mayoría de los casos, por lo que a mayor profundidad de basamento se encuentra mayor espesor de sedimentos.

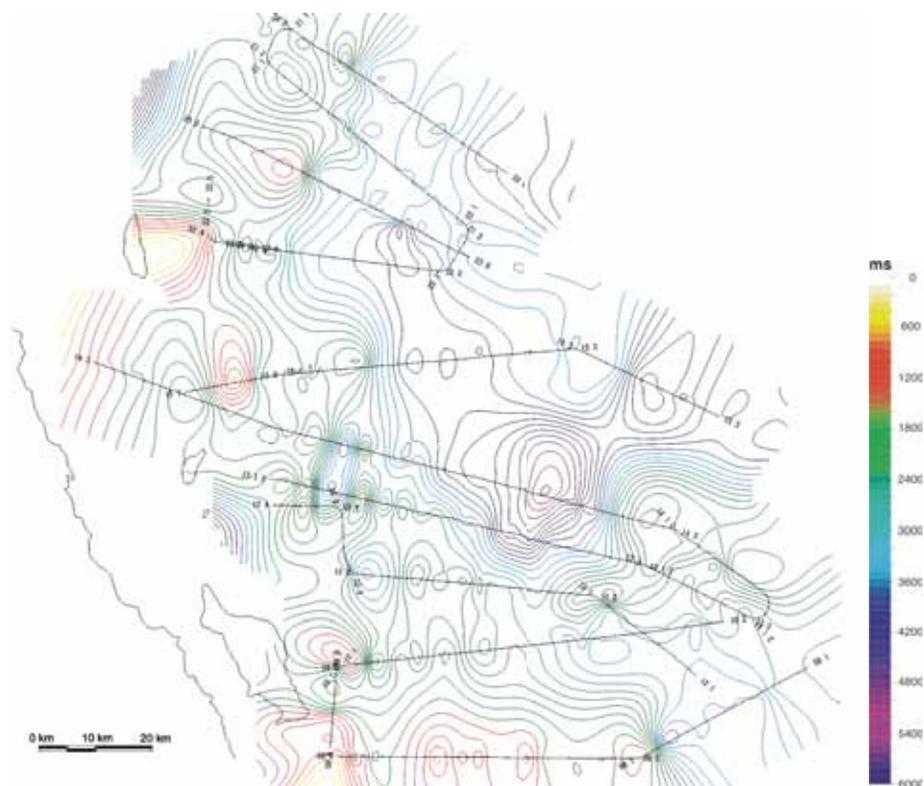


Figura 56.- Mapa de profundidad de basamento. La escala utilizada se refiere a tiempo doble de viaje (TDDV).

Se ha comprobado que la profundidad a la que se encuentra el basamento y el espesor de sedimentos está relacionado de forma directa, siendo mayor el espesor del paquete sedimentario en áreas donde la profundidad del basamento es mayor. Excluyendo la cuenca Las Ánimas, donde el espesor de sedimentos es mayor que el esperado. En ella existen ~1800 ms en TDDV de sedimentos (Hay ~2000 ms en la cuenca Farallón), encontrándose su basamento a una profundidad de 3600 ms, mientras que en la cuenca Farallón comienza

a los 5400 ms. Esta anomalía se debe al confinamiento de los sedimentos provenientes de la cuenca Santa Cruz y, por consiguiente, de la península, debido al levantamiento de los bloques que rodean a la cuenca Las Ánimas. Los sedimentos alcanzan la cuenca Las Ánimas a través de un canal existente al W de la cuenca (Figura 58).

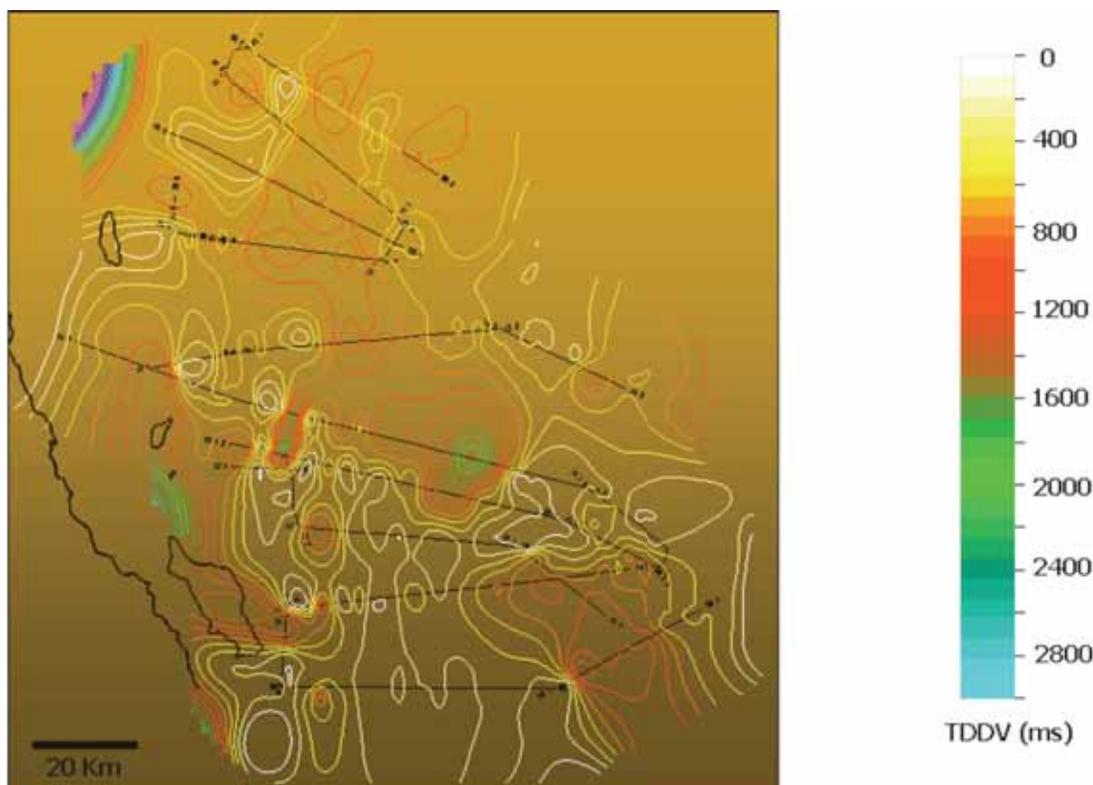


Figura 57.- Mapa de isopacas de sedimentos.

Al suroeste de la cuenca Farallón aparece una zona en que hay sedimentos que se encuentran rellenando un paleorelieve, por lo que la sedimentación fue posterior al levantamiento del bloque. La acumulación de sedimentos en la parte central de esta zona se puede deber a los escarpes que forman el cierre de la cuenca y a las corrientes que erosionan o impiden la deposición de los sedimentos cerca de los bordes. Esto se puede observar por batimetría (Figura 49).

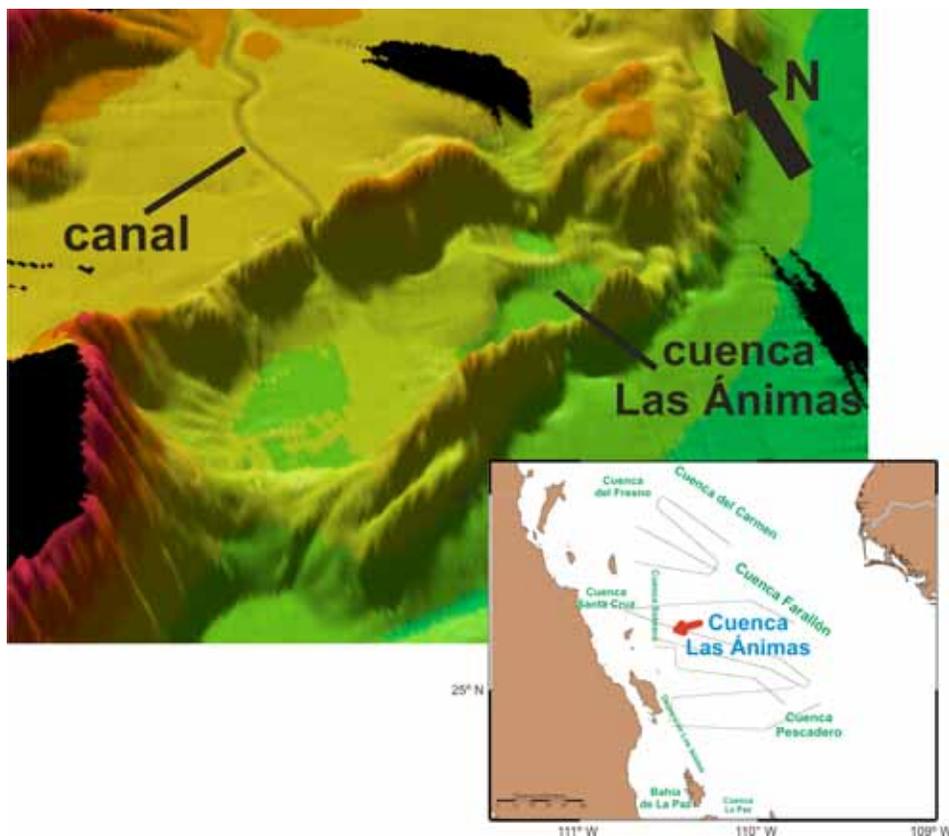


Figura 58.- Arroyo que permite el aporte de sedimentos a la cuenca Las Ánimas.

IV.2.3 Presencia de gas

La formación de gas es posterior a la deposición de los sedimentos, rompe la estructura sedimentaria y aprovecha las zonas de fractura para ascender. Estas características son las que se aprovechan en sismica para inferir su presencia. La presencia de gas también produce una dispersión de la señal lo que se refleja en un blanqueamiento en el perfil.

Se infiere la presencia de gas en la mayoría de cuencas del área, sobre todo en el estrato inferior (Figura 59).

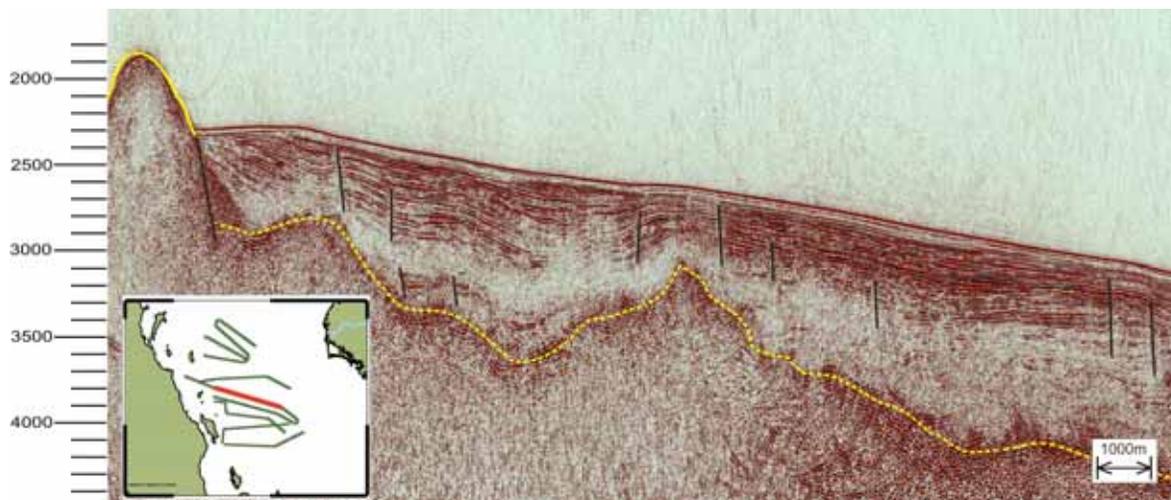


Figura 59.- Presencia de gas en las cuencas de la región. Esta presencia se infiere las zonas blanqueadas (Ampliación del Perfil 14_3).

IV.3 Síntesis de los Resultados

- Se han identificado y definido los límites de tres tipos de basamento en el área: Corteza oceánica de "nueva generación", corteza continental adelgazada de naturaleza plutónica y basamento continental volcánico.
- El basamento plutónico se emplazó en dos momentos diferentes, en el Cretácico Superior y en el Mioceno Temprano, siendo esta última edad la primera vez que se reporta para la Península de Baja California.
- Las estructuras de la región siguen dos direcciones principales, paralelas a la falla transforme abandonada de Pescadero Norte en el Sur de la región y paralelas a la dorsal al Norte (30°).
- Presencia de un posible BSR del que se desconoce la naturaleza.

Capítulo V

Discusión y Conclusiones

V.1 Tipos de Basamento

En el apartado anterior se justificaron las directrices utilizadas para distinguir la corteza oceánica de la corteza continental en el ámbito de la cuenca Farallón. La corteza continental se divide, a su vez, en dos grupos, la constituida por basamento de naturaleza plutónica y la constituida por basamento de naturaleza volcánica.

El espesor de la corteza no se ha estudiado en este trabajo porque los datos de sismica alcanzan como máximo los 6 km de profundidad. A partir de otros trabajos como Sedlock (2003) y Ferrari et al. (2007), se sabe que la corteza alcanza aproximadamente los 55 km de espesor en la Sierra Madre Occidental, adelgazándose hasta los 25 km cerca de la costa, mientras que en áreas del Golfo presenta un espesor menor a los 10 km, por lo que se trata de corteza adelgazada siendo aún más delgada en áreas cercanas a la Península de Baja California. Róbles-Vázquez (2005) en sus estudios de sismica de refracción estima una profundidad de 15 km para la cuenca Farallón.

El basamento plutónico está compuesto mayoritariamente por rocas ígneas intrusivas emplazadas durante el Cretácico en el margen Oeste del cratón mexicano (Ferrari et al, 2007). Del Cretácico Superior al Cenozoico Medio el emplazamiento plutónico y, por tanto el eje magmático, comenzó a migrar progresivamente hacia el NE, en tanto que los batolitos más antiguos eran exhumados y erosionados (Gastil et al, 1980; Lonsdale, 1985). Plutones de esta edad se han localizado en las islas Santa Catalina, Santa Cruz, San Diego y

en Punta Botella. Durante el Mioceno Temprano, el arco volcánico regresó al NO, lo que dió como resultado otro cinturón batolítico (Lonsdale, 1989), localizado en el sur de la Isla Santa Catalina.

El basamento volcánico, del que no se han obtenido edades para este trabajo, es el representante extrusivo de los plutones que mencionamos en el párrafo anterior. Tiene como mayor manifestación en el área al Macizo Farallón-Sur, que es un complejo volcánico silícico que se supone relacionado con las rocas volcánicas que encontramos a ambos lados del Golfo.

Mientras, la corteza oceánica que se identifica en este trabajo no es la corteza oceánica típica, formada por gabros en su parte inferior, y un enjambre de diques y lavas basálticas superpuestos por una capa de sedimentos que se engruesa gradualmente con la edad (Lonsdale, 1989). Lo que aquí encontramos es una corteza oceánica de "nueva creación", formada durante la apertura del Golfo, en la que el aporte de sedimentos clásticos fue lo suficientemente grande como para suprimir el vulcanismo extrusivo en los centros de expansión, solidificando el magma en forma de sills (Lonsdale, 1989; Einsele, 1985). Al final resulta un complejo de diques y sills con sedimentos intercalados, que en las líneas sísmicas se reconoce como un basamento acústico situado a diferentes niveles de profundidad; pudiéndose observar, en ocasiones, estructuras cóncavas hacia arriba identificadas como sills (Rocchi et al., 2007). Este tipo de basamento se emplazó a partir de los 3.5 Ma y, según estudios de refracción, puede tener un espesor de aproximadamente 8 km (Lonsdale, 1989; Sedlock, 2003). Corteza oceánica típica, definida por anomalías magnéticas, sólo se localiza en el Golfo de California en la cuenca de Alarcón (Lonsdale, 1989).

La idea de corteza de "nueva generación" o "intermedia" comenzó a aparecer durante la década de los 60s siendo una de las primeras teorías, aunque no corresponde con la actual, la formulada por Moore (1973). En ella se menciona que este tipo de corteza no presenta características ni de corteza oceánica ni de corteza continental. Además expone que la

aparición o no de material mantélico en superficie se debe a 'compensación clásica', manifestando que el crecimiento de la corteza está controlado por el balance entre la separación y el flujo de sedimentos en los huecos, alcanzando las rocas mantélicas la superficie cuando su influencia es mayor que la de los sedimentos.

V.2 Emplazamiento del Basamento Plutónico (Cretácico Superior y Mioceno Temprano)

Tanto el Batolito Peninsular como la Sierra Madre Occidental y el Grupo Comondú son el resultado de los emplazamientos plutónicos y del magmatismo ocurrido en el Cretácico y el Cenozoico, y de los episodios tectónicos relacionados con la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Norteamérica y la posterior apertura del Golfo de California (Ferrari et al., 2007; Seldock, 2003; Atwatter, 1970).

En el área de trabajo se cuenta con dos períodos distintos de emplazamiento de cuerpos plutónicos, el Cretácico Superior y el Mioceno Temprano. El emplazamiento de ambos se debe a diferentes momentos en la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Pacífico.

El batolito emplazado en el Cretácico Superior, tiene una composición principalmente granodiorítica, aunque también aparecen afloramientos que varían desde las tonalitas a las dioritas (Ferrari et al., 2007). Su emplazamiento se produjo en el límite oeste del cratón mexicano por lo que ahora se encuentran afloramientos tanto la Península de Baja California como en las islas, el Mar de Cortés, y el margen continental, produciéndose la erupción de rocas volcánicas durante su emplazamiento. La exhumación de este plutón se desencadenó cuando el arco volcánico comenzó a migrar hacia el NE debido a una disminución en el ángulo de subducción de la placa Farallón (Gastil et al., 1980). Las muestras colectadas en las islas, así como DANA23a y las ROCA23J (Figura 44 y Apéndice II) pertenecen a esta época ya que coinciden en composición y sus edades varían

entre 90 y 100 Ma, aproximadamente. El afloramiento perteneciente a Punta Botella se separa de las anteriores en composición, ya que se trata de una cuarzo-monzonita, pero debido a su antigüedad, aproximadamente 99 Ma se considera que pertenece a la misma etapa.

En la carta geológico-minera que el COREMI publicó para el área en 1999 el basamento se define compuesto por rocas félsicas cristalinas de composición granodiorítica y granítica. Identifican la composición de las islas como granodiorita de biotita. Estos resultados no coinciden con lo que nosotros hemos encontrado ya que exceptuado la isla San Diego y la muestra DANA23a, todas las demás presentan como minerales máficos tanto biotita como hornblenda.

En las proximidades de Loreto se han identificado areniscas del grupo pre-comondú y de la unidad clástica inferior del Grupo Comondú (30-19 Ma) apoyadas contra la paleogeografía formada en la superficie erosional de las rocas del Cretácico (Umhoefer et al., 2001). Lo que indica la existencia de un largo período erosional del Cretácico Superior al Oligoceno. El Grupo Comondú está formado por rocas volcánicas y volcanoclásticas de entre ~30 y ~12 Ma de antigüedad (Umhoefer et al., 2001) que se encuentran situadas en Baja California Sur.

La erosión mencionada en el párrafo anterior se debe al desplazamiento del eje del batolito hacia el E durante el Cretácico Superior y hasta finales del Oligoceno (Gastil et al., 1980).

Durante el Mioceno temprano y hasta los 12 Ma, el arco volcánico regresa al suroeste hasta quedar situado en el lugar que ocupa en la actualidad el Golfo de California. Pero, según Umhoefer et al. (2001) esta progradación sólo fue gradual de 30 a 19 Ma, momento en que el arco migra abruptamente 15 km al Oeste, hasta la posición de la actual isla del Carmen. Produciéndose un nuevo salto a los 12 Ma, quedando el arco situado en la costa cercana a Loreto. Estos desplazamientos estuvieron acompañados por diferentes pulsos de actividad magmática, y por cambios en la elevación de la zona (Fenby y Gastil, 1991). Cesando todo

el volcanismo relacionado con la subducción a los 8 Ma (Gastil et al., 1980). En la región de Loreto este cese se produjo aproximadamente a los 12 Ma (Umhoefer et al., 2001).

El afloramiento identificado en la parte sur de la isla Santa Catalina, con una antigüedad aproximada de 18 Ma, corresponde a la época final en que la progradación del arco magmático fue gradual por lo que, según Umhoefer et al. (2001) el plutón debería estar situado entre 10 y 20 km al E de su posición actual.

Al final, se ha podido observar que en la isla Santa Catalina se encuentran en contacto dos plutones correspondientes a dos fases distintas de la subducción de la placa Farallón. Las relaciones entre los mismos no fueron estudiadas en campo.

V.3 Relación con Otros Afloramientos

En este apartado se han establecido dos tipos de relaciones, la primera vinculando las muestras colectadas con muestras de la misma naturaleza y edad localizadas tanto en la península como en el margen continental y en el interior del Golfo; y la segunda asociando cada uno de los plutones encontrados, con sus correspondientes representaciones extrusivas, haciendo la asociación a partir de su antigüedad y posición de emplazamiento. Las muestras que se mencionan están reflejadas en la figura 60.

La mayoría de las rocas plutónicas de Baja California Sur se emplazaron de los 120 a los 90 Ma (Fletcher et al., 2003). Los afloramientos de granodioritas de edad Cretácico Superior localizados en isla Santa Catalina, Isla Santa Cruz, isla San Diego y Punta Botella (90-100 Ma) tienen la misma edad que los pertenecientes al bloque Los Cabos, 115 Ma (Cretácico Inferior), y Sierra Trinidad (Fletcher et al, 2003, Fletcher et al., 2000), los afloramientos en las islas San José y Espíritu Santo (Drake, 2005), y los localizadas en todo el margen oeste de Sinaloa y Sonora (Ferrari et al., 2007), así como en la Sección Oriental del Batolito Peninsular, conformado las rocas plutónicas del Grupo La Posta (93-101 Ma) (Seldock,

2003; Symons et al., 2003). En el interior del Golfo se cuenta con la granodiorita DANA23a, colectada en el Monte Sobrero, que tiene una edad de 93.4 ± 0.3 Ma (Peter Lonsdale, comunicacion personal). Estas rocas plutónicas también se correlacionan con las ignimbritas de esta edad que aparecen en el margen oeste de Sonora y Sinaloa (Ferrari et al., 2007). Al sur de Cabo San Lucas (Saunders et al., 1982), también se muestrearon en pozos rocas graníticas, pero con una edad un poco más joven (86 Ma) que los afloramientos que nos competen.

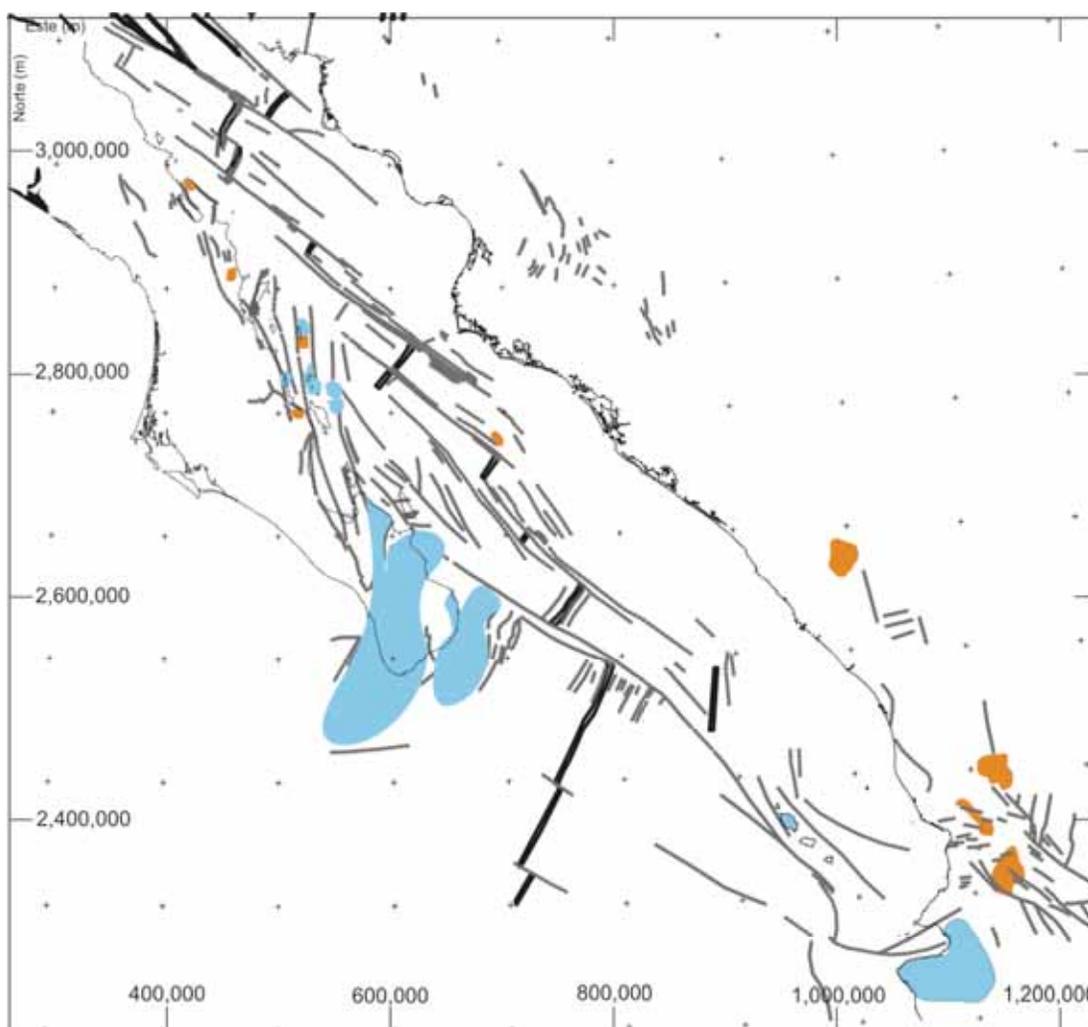


Figura 60.- Muestras de rocas plutónicas localizadas en la parte sur de Baja California y en el margen continental. En azul se presentan las muestras del Cretácico, mientras que las muestras del Mioceno Temprano aparecen en naranja. Los afloramientos del área de estudio se encuentran exagerados para poder ser representados en la figura.

La cuarzo-monzodiorita localizada al S de la isla Santa Catalina y que pertenece al Mioceno Tardío (19 Ma), coincide en edad con una tonalita de 20 Ma datada por McFall en Bahía Concepción, de la que posteriormente no se cuenta con mayor información, y plutones datados en el centro y oeste de México (Gastil et al., 1980; Ferrari et al., 2007). Al norte de Culiacán Iriondo fechó en el 2004 hornblenda de un plutón granodiorítico subvolcánico por el método de ^{40}Ar - ^{39}Ar , obteniendo una edad de 23.2 ± 0.15 Ma. Otras señales de actividad Miocena en la región aparecen en el cerro el Pilon de Las Parras, al noroeste de Loreto y en un cerro cercano a Los Burros, frente al norte de la isla San José en la Península, en los que aparece un afloramiento de un pórfido andesítico con una edad aproximada de 19.4 ± 0.9 Ma (Álvarez-Arellano et al., 1999; Umhoefer et al., 2001). También se han encontrado muestras de esta edad en el interior del Golfo, la muestra DANA71b es una granodiorita de la que se cuenta tanto con la edad U-Pb (19.1 ± 0.3 Ma), como con la edad ^{40}Ar - ^{39}Ar (18.6 ± 1.0 Ma). Este afloramiento, localizado en la parte meridional de Santa Catalina, se ha convertido en un buen candidato para la correlación de márgenes, debido a la escasa representación de intrusivos miocénicos en la península se sugiere compararlo con la tonalita situada al norte de la Península de Concepción, fechada en 20 ± 0.2 Ma por K-Ar (McFall, 1968) (Figura 59).

Las rocas volcánicas con edades comprendidas entre los 23.5 y los 18 Ma que se encontraban encima de este estrecho cinturón de rocas plutónicas estarían formadas por parte del Grupo Comondú en el lado de la Península, y por el Complejo Volcánico Superior en el lado continental, que representa uno de los episodios de vulcanismo en el continente (Ferrari et al., 2002; Ferrari et al., 1999).

Mientras, el Macizo Farallón-Sur podría formar parte del Complejo Volcánico Superior (20-32 Ma), relacionándose con las ignimbritas de composición silícea que se localizan en el margen continental (Ferrari et al., 2007), porque coincide con la situación del arco volcánico en esa época y con la composición de las ignimbritas ya que se trata de macizo volcánico silíceo.

V.4 Direcciones Estructurales Principales

El sistema estructural que ahora domina la región está íntimamente ligado a la historia geológica del margen occidental mexicano y se encuentra gobernado por un régimen de extensión que se inició hace aproximadamente 30 Ma en la parte E de la Sierra Madre Occidental, formándose la Provincia de Sierras y Cuencas. Pero no fue hasta el Mioceno Medio-Temprano cuando la extensión comenzó a migrar hacia el Oeste, creándose la Provincia Extensional del Golfo (12-9 Ma) y provocando la apertura del Golfo de California. La deformación extensional ocurrió mayoritariamente antes de la transferencia de Baja California a la placa Pacífico, hace aproximadamente 6 Ma (Ferrari et al., 2002; Fletcher et al., 2002).

En el área de estudio se pueden diferenciar dos direcciones estructurales principales. Ambas están conformadas principalmente por fallas normales que se suponen abandonadas en la actualidad. En la parte Sur de la región la dirección predominante es NO-SE (142°), paralela a la transforme abandonada de Pescadero N (139°); la transforme de Pescadero actual tiene una dirección de 126° , al igual que la Transforme de Farallón. Y en la parte norte predomina la dirección NE-SO (028° a 034°), paralela a la dorsal (035°). En el centro se encuentra una dirección aproximada N-S. Estas fallas las encontramos a nivel de basamento en el área formada por basamento plutónico. Los lineamientos identificados en las islas a partir de fotografía aérea e imágenes Landsat siguen la dirección NE-SO.

Para la región Ferrari et al. (2007), Umhoefer et al. (2002) y COREMI (1999) definen una familia de fallas normales paralelas a la dirección de apertura del Golfo de California, con direcciones que van de los 120° a los 150° con buzamientos de 78° - 85° hacia el NE y SE. Estas fallas se interpretan como del Mioceno Tardío y se formaron a la vez que la Provincia Extensional del Golfo, quedando reflejadas en el escarpe del Golfo, donde se ha visto que cortan estructuras de edad Mioceno y Oligoceno. Esta familia de fallas concuerda con las identificadas en el sur de la región. Además, según Seldock (2003) y Fletcher et al. (2000) la dirección de movimiento relativo de las placas Pacífico y Norteamérica cambia hace 8

Ma, de aproximadamente 120° a 143°, por lo que las direcciones que nosotros encontramos (142°) se confirmarían como posteriores a los 8 Ma, lo que concuerda con la dirección de extensión de 065° que Seldock (2003) propone para Loreto durante el Mioceno Tardío.

La otra familia de fallas propuesta en la región por Umhoefer et al. (2002) y COREMI (1999) está constituida por fallas normales y en dirección de edad conocida Plioceno y Cuaternario, con direcciones que varían de 010° a 040°. Una de ellas es la existente en la isla San José, con una dirección de 039°. Estas fallas graban el cambio en la dirección de extensión de aproximadamente 035° (Umhoefer y Dorsey, 1997), compatible con lo que algunos autores denominan el *rifting* oblicuo de Baja California (Umhoefer et al., 2002; Lonsdale, 1989) o, según Fletcher et al. (2000) con el comienzo de la transferencia de la Placa de Baja California a la Placa Pacífico. En este momento las fallas tienen una dirección coherente con el movimiento de la Placa Pacífico en la latitud de La Paz ($309 \pm 2.1^\circ$). Umhoefer et al. (2002) propone que debido a este cambio la isla del Carmen sufrió una rotación de 033° hacia el Sur. Nosotros proponemos que esta rotación también pudo haberse sufrido por la isla Santa Cruz y la isla San Diego, ya que geográficamente se encuentran alineadas según una dirección de 028° a 034°, al contrario de lo que ocurre con la isla Santa Catalina cuya dirección es aproximadamente N-S. De 6 a 3.5 Ma el Golfo estaba formado por un sistema de fallas de desplazamiento lateral y sus cuencas pull-apart relacionadas con orientación paralela a la dirección del Golfo (Dorsey, 2001). A los 3.6 Ma comienza la apertura del piso oceánico (Fletcher et al., 2000), formándose centros de expansión que, en su mayoría, se sitúan de forma ortogonal a las fallas en dirección existentes en el Golfo, como es el caso de la cuenca Farallón.

Además de deformación frágil, en las granodioritas y dioritas pertenecientes al norte de la isla Santa Catalina y a la isla Santa Cruz, se han identificado deformaciones que pueden deberse a su emplazamiento pre- o sin-deformación, estas deformaciones las vemos reflejadas en la orientación de los minerales y texturas que se presentan tanto en lámina delgada como en afloramiento. Algunos autores han considerado estas estructuras como metamórficas (COREMI, 1999), nosotros preferimos considerar que son debidas al

emplazamiento. La deformación causante de estas rocas pudo ser producida por la Orogenia Laramide, que se sabe que sí afecta a la parte Este de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 2007).

V.5 Coincidencia de las Fallas Interpretadas con las Identificadas por Fenby y Gastil (1991)

Se compararon las fallas que se identificaron en las líneas sísmicas con las que Fenby y Gastil (1991) habían inferido por medio de batimetría, observándose una correlación entre las mismas sólo en las estructuras de mayor tamaño, esto puede deberse tanto a la imposibilidad de definir lineamientos que no estén representados por cambios bruscos de pendientes o definidos por relieves como a la menor precisión de los datos batimétricos con que contaban Fenby y Gastil a la hora de realizar la interpretación. Por lo tanto, se considera que en la región de estudio se pueden definir a partir de batimetría los lineamientos principales, necesitando recurrir a otros métodos para la identificación de estructuras menores o secundarias y, en todo caso, para realizar una correlación precisa.

V.6 Apertura de la Cuenca Farallón

La apertura de la cuenca Farallón está relacionada, por un lado, con la apertura de las cuencas del centro del Golfo, como son la cuenca del Carmen y Guaymas. Su apertura comenzó como una cuenca pull-apart durante la extensión que se produjo a los 6 Ma. Con el aumento de la velocidad de apertura de las placas a 5.4 cm/año, a los 3.5 Ma, las cuencas pull-apart se abrieron convirtiéndose en auténticos centros de expansión. Al igual que la cuenca Guaymas, la cuenca Farallón comenzó a abrirse a partir de dos dorsales (Lonsdale, 1989), siendo abandonada posteriormente la dorsal sur. Esta evolución queda reflejada en

la estructura de la cuenca, donde se observa que la parte sur sufrió apertura hasta quedar abandonada, concentrándose en la actualidad la acreción de corteza en la dorsal norte.

Su apertura también se relaciona, según Lizarralde et al. (2007), con las cuencas Pescadero y Alarcón, que se encuentran más al sur. Ya que durante el Mioceno Temprano (entre 23 y 15 Ma, aproximadamente) presentaron un vulcanismo muy intenso, que depositó 1-2 km de espesor de ignimbritas y lavas.

V.7 El Reflector Simulador de Fondo

Como se mencionó en el Capítulo IV, el BSR es un reflector paralelo al fondo marino, que corta la estructura sedimentaria existente anterior a su formación. Estas dos condiciones se cumplen en la reflexiones señaladas en los perfiles sísmicos con una línea morada (Perfiles 13_3 Y 14_1_2). Los BSR se forman por procesos que dependen de la profundidad, con influencias de presión y temperatura en los sedimentos.

Existen dos tipos principales de BSR, el formado por hidratos de gas, y el formado a partir de la transformación de Ópalo A en Ópalo CT.

Los hidratos de gas son sólidos parecidos al hielo formados principalmente por agua, que contienen altas concentraciones de gas, principalmente metano (Rodrigo-Ramírez, 2007). Este tipo de BSR se desarrolla en depósitos de flujos de derrubio de origen glacial o en sedimentos de grano muy fino (Berndt, 2004), formándose a partir de la acumulación de gas libre en la base de la zona de estabilidad de presión y temperatura de los hidratos de gas (Berndt, 2004; Lonsdale, 1985). Cuando la profundidad de la cuenca aumenta, la distancia entre el reflector y el fondo marino también aumenta (Lonsdale, 1985; Berndt, 2004). Este reflector tiene como característica distintiva que su polaridad es opuesta a la del reflector del fondo marino, aunque esta característica es difícil de identificar por métodos visuales, sobre todo en sedimentos con estratificación paralela, donde el ángulo de corte con el BSR es pequeño (Berndt, 2004).

Se han reconocido BSR de hidratos de gas en la cuenca Guaymas, donde este horizonte se encuentra relacionado con chimeneas y *pockmarks*, que permiten el ascenso de gas al exterior (Lonsdale, 1985). Las *pockmarks*, son depresiones de forma elíptica o circular que suelen aparecer en el fondo marino en sedimentos inconsolidados de grano fino que se forman por el exceso de presión de fluido en los poros, en las acumulaciones de gas libre que hay bajo el BSR (Gay et al., 2006).

El segundo tipo de BSR se forma por la transición de Ópalo A a Ópalo CT. El Ópalo A es el ópalo común, amorfo, mientras que el Ópalo CT es el ópalo noble, pudiéndose considerar como gema, algunas de sus variedades. Se forma solamente por diagénesis de sedimentos silíceos (Lonsdale, 1989; Berndt, 2004). Suele mantenerse a una profundidad constante bajo el fondo marino, aunque a veces también representa un aumento de la profundidad con la profundización de la cuenca, debido transiciones más tempranas del ópalo a mayores presiones. Tiene la misma polaridad que la reflexión del fondo (Berndt, 2004).

Es muy probable que este tipo de BSR aparezca en la parte central del Golfo ya que, al ser aguas muy productivas, existen grandes poblaciones de placton, generándose grandes cantidades de fragmentos de diatomeas cuyos caparazones están constituidos por sílice, que se acumulan en el fondo de las cuencas. Esto se puede observar en las cuencas Guaymas, del Carmen y Pescadero donde en los sedimentos predomina el ópalo sobre la calcita y los detríticos (Einsele, 1985; Herguera, comunicación personal).

Para establecer la naturaleza del BSR no se puede utilizar como indicador la variación de amplitud asociada a cada tipo ya que sus características son muy similares (Berndt, 2004). Debiéndose recurrir preferiblemente a la obtención de datos de flujo de calor, ya que el horizonte diagenético suele estar a mayor profundidad que el BSR de hidratos de gas porque se desarrolla a mayores temperaturas (35-50° C frente a 23° C para los hidratos) (Berndt, 2004). Nosotros no contamos con estos datos para la cuenca Farallón.

Teniendo en cuenta lo descrito en los párrafos anteriores, se considera el BSR identificado en las líneas sísmicas como de origen diagenético. En nuestro caso aunque el reflector está situado en la posición adecuada según la profundidad del fondo marino para constituir la base de los hidratos de gas (Lonsdale, 1985), ya que aparece a una distancia de aproximadamente 60-70 m, entre los 1700-1800 m de profundidad; no se encuentra asociado a la existencia de chimeneas y *pockmarks*, como ocurre en el caso de Guaymas; ni tampoco aumenta su profundidad con la profundización del fondo marino. Sin embargo, se conoce la existencia de grandes espesores de sedimentos ricos en diatomeas tanto al norte como al sur de la cuenca (DSDP, 1978).

V.8 Conclusiones

En el área se ha delimitado la existencia de dos tipos de corteza, corteza continental y corteza oceánica de “nueva creación”. La corteza continental se divide en corteza de naturaleza plutónica, que limita la cuenca Farallón en su margen oeste, y corteza de naturaleza volcánica, que tiene su mayor representante en el Macizo Farallón-Sur. La corteza oceánica de “nueva creación” se localiza en el centro de la cuenca Farallón y se caracteriza por el emplazamiento de material mantélico en forma de sills.

El basamento plutónico localizado pertenece a dos momentos distintos en la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Norteamérica. El Cretácico Tardío, identificado en todas las islas y el monte San Blas, se emplazó en el momento en que el arco volcánico comenzaba su migración hacia el este. Mientras que los afloramientos pertenecientes al Mioceno Temprano, localizados al sur de la isla Santa Catalina, se produjeron durante la progradación del arco hacia el oeste. Estos granitoides se relacionan con las rocas volcánicas de su antigüedad existentes tanto en el margen continental como en la Península de Baja California, ya que a partir de análisis químicos se ha corroborado que las muestras estudiadas pertenecen al arco formado durante la subducción.

Las granodioritas y tonalitas del Cretácico Superior pertenecen a la misma época de emplazamiento que los granitoides situados en el margen oeste del continente, el bloque Los Cabos, y algunas muestras situadas en el interior del Golfo de California. Los afloramientos de granitoides Miocenos son más escasos en la península, habiendo sólo un registro en Bahía Concepción, y el que nosotros identificamos en la isla Santa Catalina, por lo que se sugiere que puede tratarse de un buen candidato para la correlación de márgenes ya que equivale en edad a una muestra identificada en la cuenca Pescadero y a un afloramiento del centro de Sinaloa.

El área se encuentra afectada por dos familias distintas de estructuras. Una familia de fallas con dirección NO-SE, formada principalmente por fallas normales inactivas en la actualidad, que afectó a la zona en el Mioceno Tardío y que se relaciona con la formación de la Provincia Extensional del Golfo. Estas fallas son paralelas a las fallas transformes de la zona. La segunda familia de fallas (NE-SO) está formada por un sistema de fallas normales y en dirección, de edad Plioceno y Cuaternario, relacionadas con el cambio de dirección de apertura del Golfo en el momento de inicio de la transferencia de la placa de Baja California a la placa Pacífico. Estas fallas son paralelas a la dorsal de Farallón.

La mayor parte de las fallas identificadas en este trabajo no fueron inferidas por Fenby y Gastil (1991) a partir de batimetría, aunque coinciden algunas de las estructuras mayores en lugares donde el cambio de pendiente es brusco o los relieves se encuentran alineados.

Para finalizar, se infiere la presencia de un reflector simulador de fondo de origen posiblemente diagenético. En el Macizo Farallón-Sur se identifica la presencia de un reflector paralelo al fondo marino, a una distancia aproximada de 60 m bajo el mismo, que corta la estructura sedimentaria anterior. Su formación pudo deberse a la transformación de ópalo A en ópalo CT de las grandes cantidades de caparazones silíceos de diatomeas que se acumulan en la cuenca.

Bibliografía

Álvarez-Arellano, Rojas-Soriano, H., A., Schwennicke, T., Prieto-Mendoza, J., Sevilla-Unda, V. 1999, Informe de la carta geológico-minera Villa-Constitución G12-7-8, escala 1:250000, Estado de Baja California Sur, convenio COREMI/UABCS, Consejo de Recursos Minerales.

Aragón-Arreola, M. 2006. Structural Evolution of Basins in the northern and central Gulf of California. Implications for rift kinematics and strain accommodation. Tesis de Doctorado. CICESE. 119 p.

Atwater, T. 1970. Implications of plate tectonics for the cenozoic tectonic evolution of western North America. Geological Society of America Bulletin. 81: 3513-3536 p.

Bangs, N.L.B., Sawyer, D.S. y Golovchenko, X. 1993. Free gas at the base of the gas hydrate zone in the vicinity of the Chile triple junction. Geology. 21: 905-908 p.

Berndt, C., Bunz, S., Clayton, T., Mienert, J. y Saunders, M. 2004. Seismic character of bottom simulating reflectors: examples from the mid-Norwegian margin. Marine and Petroleum Geology. 21: 723-733 p.

Bottomley R. (1975): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of basalts from the Columbia River plateau. Tesis de Maestría. University of Toronto. 77 p.

Chopra, S., Castagna, J. y Portniaguine, O. 2006. CSEG Recorder. 20-25 p.

Cohen, J. K. y Stockwell, Jr. J.W. 2003. SWP/SU: Seismic Unix Release 37: a free package for seismic research and processing. Centre for Wave Phenomena. Colorado School of Mines. En: <http://www.cwp.miles.edu/cwpcodes/>. Consultado el 15 de Febrero de 2007.

Cox, A. y Hart, R.B. 1997. Plate Tectonics. How it works. Blackwell Science. Primera edición. New York. 389 p.

Dallmeyer, R.D. 1974. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ incremental release ages of biotite and hornblende from pre-Kenoran gneisses between the Matagami-Chibougamau and Frotet-Troilus greenstone belts, Quebec. Can. J. Earth Sci. 11: 1586-1593 p.

Dalrymple, G.B. y Lanphere, M.A. 1974. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of some undisturbed terrestrial samples. Geochim. Cosmochim. 38: 715-738 p.

Dalrymple, G.B. y Lanphere, M.A. 1971. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ technique of K/Ar dating: a comparison with the conventional techniques. Earth Planet. Sci. Lett. 12: 300 p.

De Basabe-Delgado, J. 2002. Regresión lineal con incertidumbre en todas las variables: aplicaciones en geocronología al cálculo de isocronas. Tesis de Maestría. CICESE. 86 p.

Deep Sea Drilling Project, Initial Reports, 1978-1979, v. LXIV, part 2. 1313 p.

DeMets, C. 1995. A reappraisal of seafloor spreading lineations in the Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to the Pacific plate and estimates of Pacific-North America motion. *Geophysics Research Letters*. 22(24): 3545-3548 p.

Dorsey, R., Umhoefer, P., Ingle, J. y Mayer, L. 2001. Late Miocene to Pliocene stratigraphic evolution of northeast Carmen Island, Gulf of California: implications for oblique-rifting tectonics. *Sedimentary Geology*. 144(1-2): 97-123 p.

Drake, W. 2005. Structural Análisis, stratigraphy, and geochronology of the San José island accommodation zone, Baja California Sur. Tesis de Maestría. Northern Arizona University. 231 p.

Einsele, G. 1985. Basaltic sill-sediment complexes in young spreading centers: Genesis and significance. *Geology*. 13: 249-252 p.

Faure, G. 1986. Principles of isotope geology. Wiley. Segunda edición. New York. 589 p.

Fenby, S.S. y Gastil, R.G. 1991. Geologic-Tectonic Map of the Gulf of California and surrounding Areas. En: Duphin, J.P., and Simoneit, B.R.T. (eds.). *The Gulf Peninsular Provinces of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, Tulsa, Oklahoma, 371-376 p.

Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. y Carrasco-Núñez, G. 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: From the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*. 27(4): 303-306 p.

Ferrari, L., López-Martínez, M. y Rosas-Elguera, J. 2002. Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduccion history of the Farallon plate. *Tectonics*. 21(4): 1-22 p.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M. y Bryan, S. 2007. Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America. *Geological Society of America Special Paper* 442: 1-39 p.

Fletcher, J., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O. y Gehrels, E. 2007. Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena Shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena Fan and adjacent areas. *Geological Society of America Bulletin*. 119(11/12): 1313-1336 p.

Fletcher, J., Kohn, B., Foster, D. y Gleadow, A.J. 2000. Heterogeneous neogene cooling and exhumation of the Los Cabos block, southern Baja California: Evidence from fission-track thermochronology. *Geology*. 28(2): 107-110 p.

Fletcher, J., Miller, J., Martín, N., Boettcher, S., Glazner, A. y Bartley, J. 2002. Cretaceous arc tectonism in the Mojave block: Profound crustal modification that controlled subsequent tectonic regimes. *Geological Society of America. Memoir* 195: 135-149 p.

Fletcher, J. y Munguía, L. 2000. Active continental rifting in southern Baja California, Mexico: Implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the Gulf of California. *Tectonics*. 19(6): 1107-1123 p.

Fletcher, J., Pérez-Venzor, J., González-Barba, G. y Aranda-Gómez, J. 2003. Ridge-trench interactions and the ongoing capture of the Baja California microplate—new insights from the southern Gulf Extensional Province: Geologic transects across cordilleran Mexico. En: *Guidebook for field trips of the 99th annual meeting of the Cordilleran Section of the Geological Society of America*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, México D.F., 13-31 p.

Gans, P.B. 1997. Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico. *Tectonics*. 16(3): 388-408 p.

Gastil, R.G., Morgan, G.J., y Krummenacher, D. 1980. Tectonic History of Peninsular California and Adjacent Mexico. En: Gary Ernst (eds.). *The Tectonic Development of California*. Freeman Press, San Francisco, 284-306 p.

Gastil, R.G., y Ortlieb L. 1981. Geology of Coastal sonora between Puerto Lobos and Bahia Kino, Field Guide for Field Trip, No. 2, Geol. Soc. America Cordilleran Section Meeting, Hermosillo, 59-72 p.

Gay, A., Lopez, M., Cochonat, P., Seranne, M., Levaché, D. Y Sermondadaz, G. 2006. Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic paleochannels in the Lower Congo Basin. *Marine Geology*. 226: 25-40 p.

González-Fernández, A., Dañobeitia, J.J., Delgado-Argote, L.A., Michaud, L., Córdoba, D. y Bartolomé, R. 2005. Mode of extension and rifting history of upper Tiburón and upper Delfín basins, northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 110: 1-17 p.

Hansen, D. y Cartwright, J. 2006. The three-dimensional geometry and growth of forced folds above saucer-shaped igneous sills. *Journal of Structural Geology*. 28: 1520-1535 p.

Hansen, D., Cartwright, J. y Thomas, D. 2004. 3D seismic analysis of the geometry of igneous sills and sill junction relationships. *Geological Society of London, Memoirs*. 29: 199-208 p.

Hausback. 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. En: V.A. Frizzell (eds.). *Geology of the Baja California Peninsula*. Society of Economic Paleontologist and Mineralogist Pacific Section Publication, Los Angeles, 39: 219-236 p.

Helenes, J. y Carreño, A.L. 1999. Neogene Sedimentary Evolution of Baja California in relation to Regional Tectonics. En: Lomnitz, C. (eds.). *Earth Sciences in Mexico: Some recent perspectives*. *Journal of South American Sciences*. Special Issue. 12(6): 589-605p.

Iriondo, A., Kunk, M.J., Winick, J.A. y CRM. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating Studies of Minerals and Rocks in various areas in Mexico. USGS/CRM Scientific Collaboration. U.S. Geological Survey. Open-File report 03-020: 125 p.

Liner, C.L. 2004. *Elements of 3D seismology*. Penwell Co. Segunda Edición. Tulsa, Oklahoma. 608 p.

Lizarralde, D., Axen, G., Brown, H., Fletcher, J., González-Fernández, A., Harding, A., Holbrook, W., Kent, G., Paramo, P., Sutherland, F. y Umhoefer, P. 2007. Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*. 448: 466-469 p.

Lizarralde, D., Axen, G., Fletcher, J., González-Fernández, A., Kent, G., Harding, A., Holbrook, W. y Umhoefer, P. 2001. A Seismic and Geologic Study of Gulf of California Rifting and Magmatism. *Margins*. Newsletter. 7: 1-5 p.

Lonsdale, P. 1991. Structural patterns of the Pacific floor offshore of Peninsular California, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.T., eds., *Gulf and Peninsula Province of the Californias*: American Association of Petroleum Geologists Memoir 47: 87-125 p.

Lonsdale, P. 1989. Geology and Tectonic history of the Gulf of California. En: Winterer, E.L., Hussong, D.M., and Decker, R.W. (eds.). *The Geology of North America. The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*. Geological Society of America, Boulder, Colorado. 499-521 p.

Lonsdale, P. 1985. A Transform Margin Rich in Hydrocarbons, Gulf of California. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*. 69(7): 1160-1180 p.

McDougall, I., Harrison, M. 1999. *Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method*: Oxford University Press. 269 p.

McFall, C.C. 1968. Reconnaissance geology of the Concepcion Bay area, Baja California, Mexico. *Geological Sciences*. X(5):1-15 p.

McQuillin, R., Bacon, M. y Barclay, W. 1979. *An introduction to seismic interpretation*. Gulf Publishing Company. Houston. 199 p.

Michaud, F., Sosson, M., Royer, J.Y., Chabert, A., Bourgois, J., Calmus, T., Mortera, C., Bigot-Cormier, F., Bandy, W., Dymont, J., Pontoise, B. y Sichler, B. 2004. Motion partitioning between the Pacific plate, Baja California and the North America plate: The Tosco-Abrejos fault revisited. *Geophysical Research Letters*. 31: 1-4 p.

Minster, J.B., y Jordan, T.H. 1978. Present-day plate motions. *Journal of Geophysical Research*. 83: 5331-5354 p.

Moore, D. 1973. Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California Structural Province. *Geological Society of America Bulletin*. 84: 1883-1906 p.

Oskin, M. y Stock, J. 2003. Marine incursion synchronous with plate boundary localization in the Gulf of California. *Geology*. 31(1): 23-26 p.

Oskin, M., Stock, J. y Martín-Barajas, A. 2001. Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*. 29(5): 459-462 p.

Pérez-Tinajero, C. 2007. Sismología de reflexión en el desierto de Altar, Sonora. Tesis de Maestría. CICESE. 120 p.

Persaud, P., Stock, J.M., Steckler, M.S., Martín-Barajas, A., Diebold, J.B., González-Fernández, A. y Mountain, G.S. 2003. Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag, and Delfin Basins, northern Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 108(B7): 1-4 p.

Phillips, R.P., 1964. Seismic refraction studies in Gulf of California. In van Andel, Tj. H., and Shor, G. G., Jr., eds., *Marine Geology of the Gulf of California –A Symposium*: Am. Assoc. Petroleum Geologists Mem. 3: 90-121 p.

Requena-González, N.A. 2006. Estructura cortical en el margen Pacífico de Baja California Sur, empleando sísmica de reflexión 2D multicanal profunda. Tesis de Maestría. CICESE. 165 p.

Robles-Vázquez, L.N. 2005. Estructura sísmica de la litosfera de Baja California Sur desde la Placa Magdalena hasta la Cuenca Farallón. Tesis de Maestría. CICESE. 99 p.

Rocchi, S., Mazzotti, A., Marroni, M., Pandolfi, L., Constantini, P., Bertozzi, G., di Biase, D., Federici, F. y Goumbo Lo, P. 2007. Detection of Miocene sauced-shaped sills (offshore Senegal) via integrated of seismic, magnetic and gravity data. *Terra Nova*. 19: 232-239 p.

Rodrigo-Ramírez, C.R. 2007. Variabilidad del reflector simulador de fondo (BSR) y su relación con las estructuras tectónicas en el margen convergente de Chile entre los 37° y 40° S. Tesis de Doctorado. CICESE. 147 p.

Saunders, A.D., Fornari, D.J. y Morrison M.A. 1982. The composition and emplacement of basaltic magmas produced during the development of continental margin basins: The Gulf of California, Mexico. *J. Geol. Soc. London*. 139: 335-346 p.

Scholz, C.H. and Contreras, J.C. 1998. Mechanics of continental rift architecture. *Geology*. 26(11): 967-970 p.

Sedlock, R. 2003. Geology and tectonics of the Baja California peninsula and adjacent areas. En: Johnson, S.E., Paterson, S.R., Fletcher, J.M., Girty, G.H., Kimbrough, D.L. y Martín-Barajas, A. (eds.). *Tectonic evolution of northwestern México and the southwestern USA*. Geological Society of America Special Paper 374, Boulder, Colorado. 1-42 p.

Sheriff, R.E. y Geldart, L.P. 1995. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press. Segunda Edición. New York. 592 p.

Sheriff, R.E. y Geldart, L.P. 1991. *Exploración Sismológica*. Editorial Limusa. Primera edición. México D.F. 309 p.

Smallwood, J. y Maresh, J. 2002. The properties, morphology and distribution of igneous sills: modeling, borehole data and 3D seismic from the Faroe-Shetland area. En Jolley, D.W. y Bell B.R. (eds.). *The North Atlantic Igneous Province: Stratigraphy, tectonic, volcanic and magmatic processes*. Geological Society, London, Special Publications. 197: 271-306 p.

Spencer, J.E. y Normak, W.R. 1979. Tosco-Abreojos fault zone: A neogene transform plate boundary within the Pacific margin of southern Baja California, México. *Geology*. 7: 554-557 p.

Stock, J.M. and Hodges, K.V., 1989, Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate. *Tectonics*. 8: 99-115 p.

Symons, D.T.A., Walawender, M.J., Smith, T.E., Molnar, S.E., Harris, M.J. y Blackburn, W.H.. 2003. Paleomagnetism and geobarometry of the La Posta pluton, California. En: Johnson, S.E., Paterson, S.R., Fletcher, J.M., Girty, G.H., Kimbrough, D.L. y Martín-Barajas, A. (eds.). *Tectonic evolution of northwestern México and the southwestern USA*. Geological Society of America Special Paper 374, Boulder, Colorado. 135-155 p.

Trude, J., Cartwright, J., Davies, R. y Smallwood, J. 2003. New technique for dating igneous sills. *Geology*. 31(9): 813-816 p.

Umhoefer, P., Dorsey, R., Willsey, S., Mayer, L. y Renne, P. 2001. Stratigraphy and geochronology of the Comondú Group near Loreto, Baja California sur, Mexico. *Sedimentary Geology*. 144: 125-147 p.

Umhoefer, P. y Dorsey, R. 1997. Traslacion of terranes: Lessons from central Baja California, México. *Geology*. 25(11): 1007-1010 p.

Umhoefer, P., Mayer, L. y Dorsey, R. 2002. Evolution of the margin of the Gulf of California near Loreto, Baja California Peninsula, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*. 114(7): 000-000 p.

Widess, M.B. 1973. How thin is a thin bed. *Geophysics* 38: 1176-1180 p.

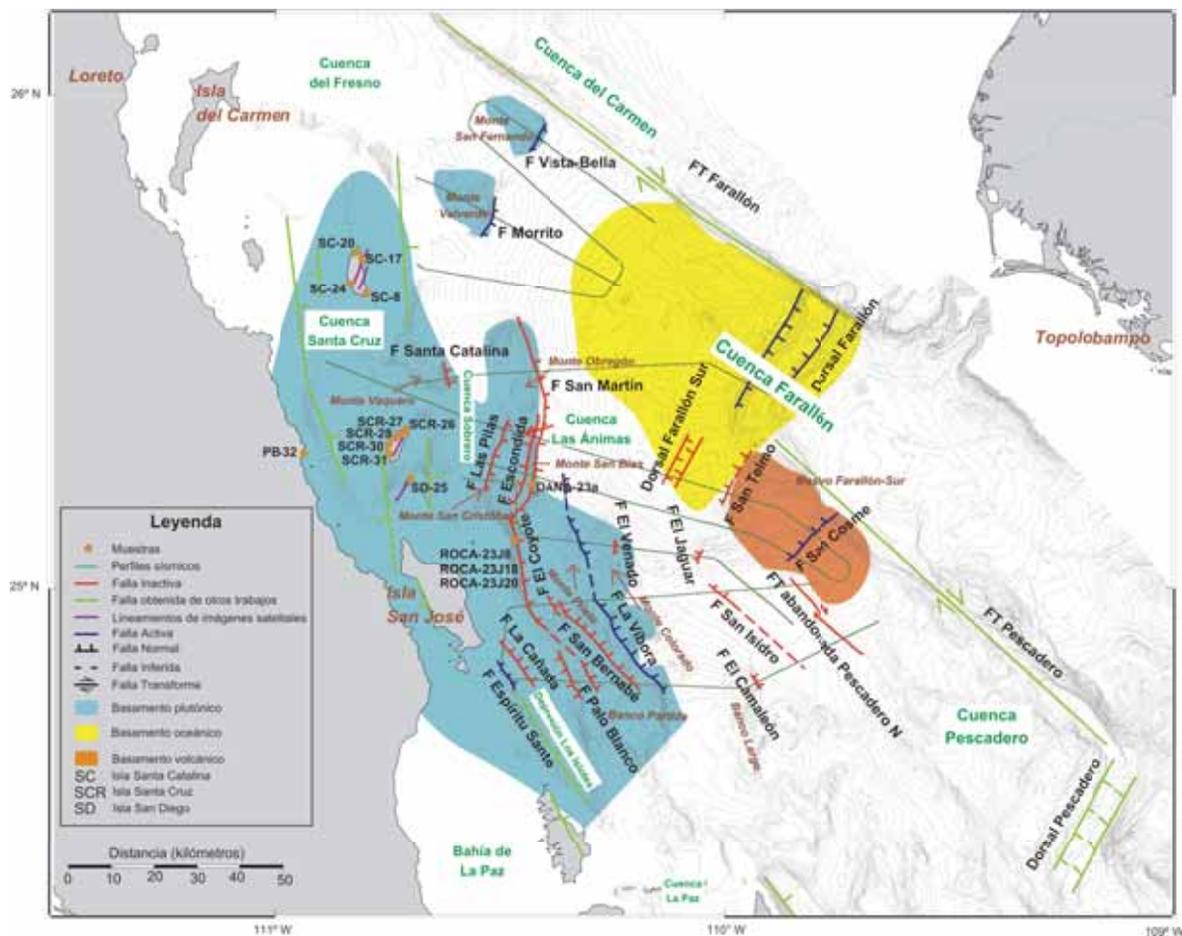
Yilmaz, O. 2001. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of Exploration Geophysicists. Segunda edición. Tulsa, Oklahoma. 2027 p.

Yilmaz, O. 1987. *Seismic data processing*. Society of Exploration Geophysicists. Primera edición. Tulsa, Oklahoma. 526 p.

York, D., Evensen, N.M., López-Martínez, M. y De Basabe-Delgado, J. 2004. Unified equations for the slope, intercept, and standard errors of the best straight line. *American Journal of Physics*. 72(3): 367-375 p.

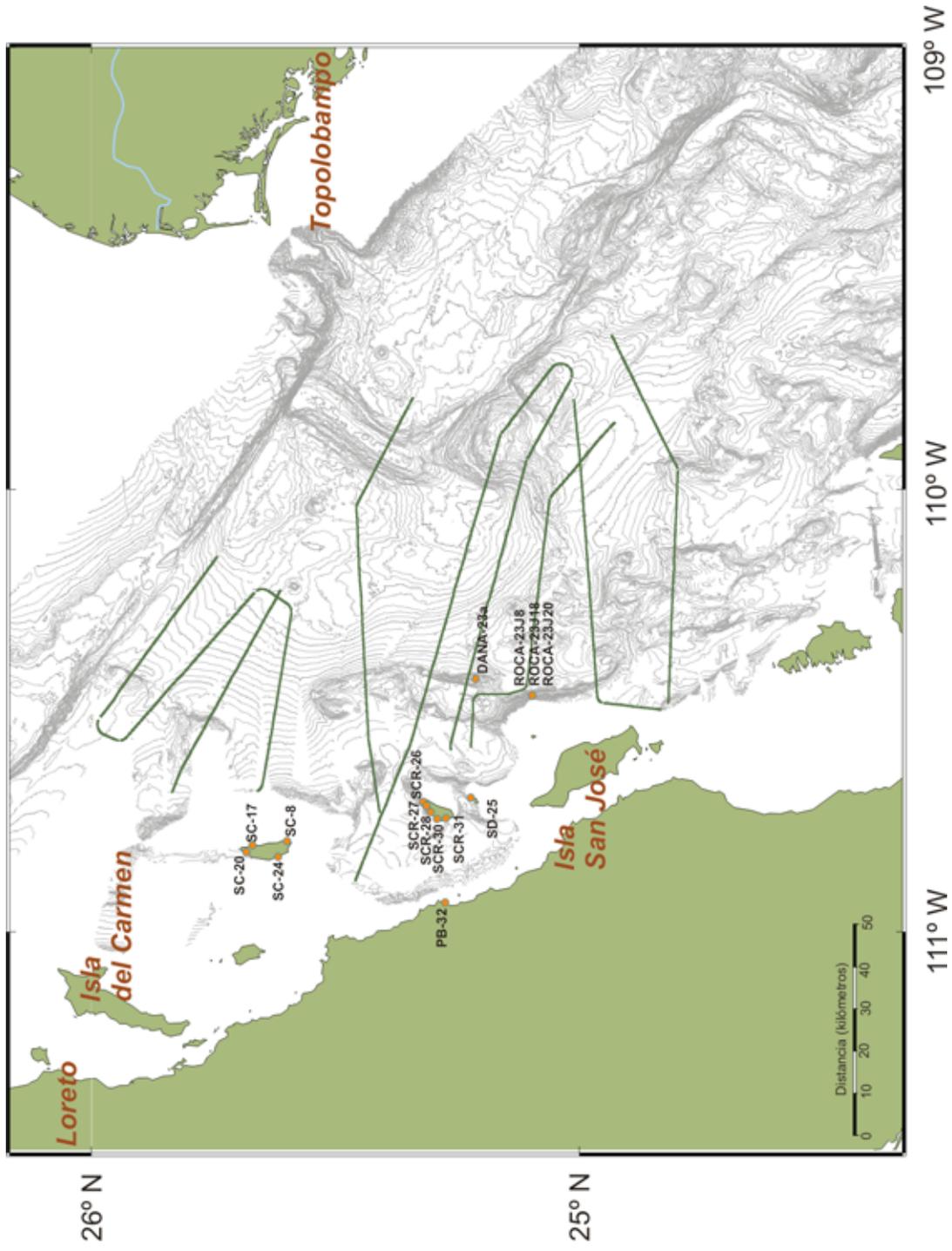
Apéndice I

Mapa General de Resultados



Apéndice II

Localización de las Muestras



Apéndice III

Descripción Petrológica de las Láminas Delgadas

SC-7

CLASIFICACIÓN: Qz-Monzodiorita de Bt y Hb de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
20	11	49		18	1
3	22	62	10	3	
23	7	65		4	1



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg, Bt y Hb

Min. Secundarios: Clorita, sericita, epidota, esfena

Min. Accesorios: Ms, op, ap, ox, hematita, zr

ALTERACIONES:

Cloritización moderada en Bt en planos c o en los bordes minerales.

Sericitización intensa en plagioclasas, a veces sólo en el centro mineral.

Albitización moderada, en los bordes de las plagioclasas.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Cuarzo: Intergranular, anhedral. Con textura subofítica.

Plagioclasa: Oligoclasas subhedrales, macla polisintética y macla Carlsbad. La mayoría tienen zonado normal. En algunos casos se encuentran sericitizadas en el centro o por completo. Hay sobrecrecimiento. Los cristales de menor tamaño son los menos alterados.

Hornblenda: Alotriomorfa. Presenta asociaciones minerales con Op, Qz y Plg.

Biotita: Hay dos generaciones. Unas verdes están cloritizadas siguiendo planos c. Las de color café son más frescas, con cloritización escasa y solamente en los bordes. Se reportan inclusiones de Zr redondeados.

OBSERVACIONES:

Se reporta sinneusis en un cristal de grano grueso.

La roca ha sufrido alteración hidrotermal moderada.

SC-8

CLASIFICACIÓN: Qz-Monzodiorita de Bt y Hb de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
22	9	55	9	14	1
15	23	36	2	23	1
10	23	62		5	



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg, Bt y Hb

Min. Secundarios: Sericita, clorita, albita y epidota

Min. Accesorios: Ap, Zr

ALTERACIONES:

Sericitización intensa en las plagioclasas.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Plagioclasa: De grano fino a medio. Fragmentadas, con macla polisintética y macla Carlsbad. Algunas están zonadas, también suelen estar albitizadas.

Biotita: Subidiomorfa.

OBSERVACIONES:

Aparecen Plg con sinneusis.

SC-17

CLASIFICACIÓN: Granodiorita de Bt y Hb de grano grueso

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
60	12	17	9		2
		86		14	
32	24	19	8	7	



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg, Bt y Hb

Min. Secundarios: clorita, sericita, epidota

Min. Accesorios: Ox, Zr, Ap, titanita

ALTERACIONES:

Cloritización: Moderada en las Bt, en los bordes y a favor de los ejes c de los cristales.

Sericita: Alteración ligera en las Plg.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Hornblenda: Presenta segmentos desorientados.

Biotita: Extinción ondulatoria. Con inclusiones de epidota. Tiene un color muy rojizo por alto contenido en Ti, por lo que soportó T mayor a 500° C.

Cuarzo: Subhedral a anhedral. Extinción ondulatoria. Policristalino. Presenta dislocaciones, que indica una tasa de deformación ligera. Presenta migración de frontera de grano. Hay zonas de cuarzo recristalizado.

Plagioclasa: Subhedral. Presenta bulging, indica tasas de deformación ligera. Macla polisintética.

Sobrecrecimiento. Zonación que va de normal a oscilatoria. Dislocaciones. Fracturadas y sericitizadas.

Esfena: Primaria, porque su tamaño es muy grande y está muy bien formada.

OBSERVACIONES:

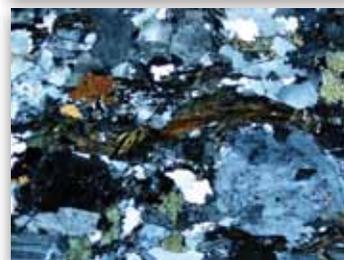
Deformación con recristalización dinámica, que ocurre durante la deformación.

Contiene mirmequitas, se forman por deformación por temperatura y migración de frontera de grano en el Qz.

SC-20

CLASIFICACIÓN: Granodiorita de Bt y Hb de grano grueso

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
14	19	66		1	
41	2	24		31	1
1	25	71		3	



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg, Bt, Hb

Min. Secundarios: clorita, sericita, epidota, albita

Min. Accesorios: Ox, Ap, Ms, Zr, esfena

ALTERACIONES:

Cloritización: De alto grado, a través de los planos c de las Bt.

Sericita: Moderada en plagioclasas.

Albitización: En Plg

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Hornblenda: Subidiomorfa. Secciones basales y tabulares con inclusiones de Ox, Qz, apatito y Bt cloritizada. Están muy fracturadas. El Qz cristaliza aprovechando las fracturas, al igual que las Bt.

Biotita: Intensamente cloritizada. Los cristales están orientados, pero su crecimiento es desordenado.

Cuarzo: Policristalino. Extinción ondulante. Bordes en sierra. Cristaliza en planos c de Bt y fracturas de Hb. Dislocación de los cristales.

Plagioclasa: Subhedral. Zonación normal. Sericitización moderada generalizada. Son oligoclasas.

OBSERVACIONES:

Se presentan texturas mirmequíticas.

SC-24

CLASIFICACIÓN: Monzogranito de Bt y Hb de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
33	8	76		4	
21	64	15		21	
40	15	53	4	9	



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg, Bt y Hb

Min. Secundarios: clorita, sericita, Ap, epidota, esfena

Min. Accesorios: Ox, Zr, Ms

ALTERACIONES:

Seriticización: Moderada a alta en Plg.

Cloritización: Moderada en los bordes de las Bt.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Hornblenda: Subhedral-anhedral. Muy fracturadas. Algunos aparecen como esqueletos.

Biotita: Aparecen Bt verdes cloritizadas en los bordes, y Bt color marrones con inclusiones de Zr, no presentan cloritización.

Cuarzo: Extinción ondulante.

Plagioclasa: Tabulares de subhedrales a anhedrales. Aparecen algunos esqueletos de Plg. Seriticización de moderada a alta. Bordes de reacción. Recrecimientos. Fracturadas.

Feldespato potásico: Alotriomorfos. Cristales grandes que engloban cristales de Plg y Bt. Extinción ondulante. Bandeado de perfitas en algunos cristales.

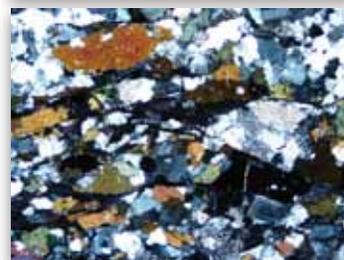
OBSERVACIONES:

Texturas mirmequíticas, no muy abundantes.

SCR-26

CLASIFICACIÓN: Qz-Diorita de Bt y Hb de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
18	3	70	9		
11	8	59	14	8	
13	4	27	37	18	1



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg, Hb y Bt

Min. Secundarios: clorita, sericita, albita, epidota, esfena

Min. Accesorios: Zr, Ox

ALTERACIONES:

Cloritización: Intensa en Bt

Seritización: Moderada en Plg, a través de fracturas. En algunas Plg la alteración es muy intensa y otras apenas están alteradas.

Albitización: En algunas Plg.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Hornblenda: Verde. Alotriomorfa. Corrosión en los bordes. Con inclusiones de Qz y Ox. Fracturadas.

Biotita: Muy alargadas, orientadas. Con bordes de corrosión, fracturadas. Intensamente cloritizadas. También presentan epidotización débil.

Plagioclasa: Alotriomorfa. Fracturadas. Algunas muy sericitizadas, otras moderadamente a través de fracturas. Algunas zonadas en parches.

Cuarzo: Policristalino. Estructura en puzzle. Extinción ondulatoria.

OBSERVACIONES:

Se observa orientación en lámina delgada.

Aparecen fracturas rellenas de calcita.

No se observan texturas de exolución.

SCR-27

CLASIFICACIÓN: Granodiorita de Bt y Hb de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
21	15	60		4	
22	23	55			
12	9	23	45	9	2



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg, Hb y Bt

Min. Secundarios: Clorita, sericita, albita y epidota

Min. Accesorios: Zr, Ox

ALTERACIONES:

Sericitización: Moderada. Se presenta principalmente en las fracturas de las Plg.

Albitización: En algunas Plg.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Hornblenda: Alotriomorfa. Grano medio.

Biotita: Subidiomorfas. Se observan dobladas, puede deberse a deformación plástica.

Plagioclasa: Intercrecidas. Presentan bordes de alteración.

Cuarzo: Policristalino, recristalizado. Extinción ondulatoria.

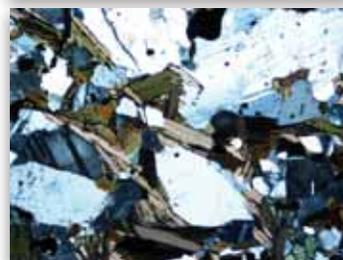
OBSERVACIONES:

La deformación se puede deber al emplazamiento, cuando la roca está casi solidificada.

SCR-28

CLASIFICACIÓN: Qz-Diorita de Bt y Hb de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
18		73		8	1
3		97			
27		59	7	7	



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Plg, hb y Bt

Min. Secundarios: Sericita, albita

Min. Accesorios: Zr, Ox

ALTERACIONES:

Sericitización: Selectiva. Muy intensa sólo en algunas plagioclasas.

Albitización: En algunas Plg.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Hornblenda: Alotriomorfa, grano medio. Muy fracturada.

Biotita: Abundante. Subidiomorfa. Fresca

Plagioclasa: Albitizadas y deformadas. Algunas muy sericitizadas.

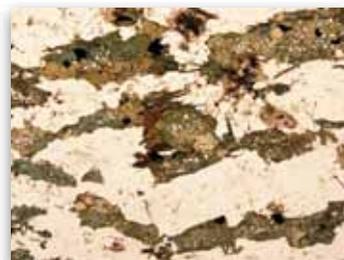
Cuarzo: Policristalino. Extinción ondulatoria. Recristalizado.

OBSERVACIONES:

SCR-30

CLASIFICACIÓN: Qz-Diorita de Bt y Hb de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
5			76	5	14
		87	13		
11		94			



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Plg, Hb y Bt

Min. Secundarios: Clorita, sericita, albita

Min. Accesorios: Zr, Ox

ALTERACIONES:

Sericitización: Selectiva, muy intensa sólo en algunas Plg.

Albitización: En algunas Plg.

Cloritización: Intensa en Bt

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Hornblenda: Alotriomorfa. Altamente fracturada.

Biotita: Escasa y muy cloritizada.

Plagioclasa: Presentan deformación.

Cuarzo: Policristalino. Extinción ondulatoria.

OBSERVACIONES:

La lámina está casi totalmente recrystalizada.

La deformación producida se debe a la presencia de fluidos.

SD-25

CLASIFICACIÓN: Granodiorita de Bt de grano grueso

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
98	6	15		2	
12	11	84		14	
32	13	74		2	



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg y Bt

Min. Secundarios: Clorita, sericita, epidota, albita y esfena

Min. Accesorios: Ox, Zr, Ms, Ap

ALTERACIONES:

Sericitización: Moderada, afecta a todas las Plg.

Albitización: Afecta a las Plg, llegando en muchos casos a anular la macla polisintética.

Cloritización: Generalmente afecta a los bordes minerales de las micas, pero también aparece en los planos c.

Epidota: Escasa, aparece en Bt puntuales, no está asociada a Ox.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Biotita: Dos tipos. Bt marrones, idiomorfas, con inclusiones de Ox. Cloritización en los bordes. Otras verdes, orientadas y cloritizadas.

Cuarzo: Policristalino, fracturado, extinción ondulante. Cristaliza en planos c en los bordes de las Bt.

Plagioclasa: Zonadas, albitizadas. Presentan coronas de reacción. Sericitización selectiva moderada-baja.

Inclusiones de Bt, Qz, Zr y Ap. Presentan fracturación.

Feldespatos Potásicos: Alotriomorfo. Pertitas en flamas. Extinción ondulante.

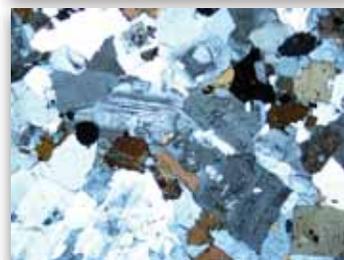
OBSERVACIONES:

Textura micrográfica y mirmequítica.

PB-32

CLASIFICACIÓN: Qz-Monzonita de Bt y Hb

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
8	27	31	11	23	
4	12	74		10	
12	44	14	19	10	1



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg, Hb y Bt

Min. Secundarios: Clorita, sericita, albita, epidota

Min. Accesorios: Ox, Zr, Ms, Ap

ALTERACIONES:

Sericitización: Escasa en algunas Plg. Sólo aparece en núcleos minerales, donde llega a hacerse más intensa.

Cloritización: Selectiva. Aparece sólo en algunas Bt, en las que avanza de los bordes minerales hacia el exterior.

Epidota: En bordes de Bt y Hb.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Biotita: Mayoritariamente idiomorfas. Inclusiones de Ox, Ap, Qz y Hb.

Hornblenda: Secciones basales y tabulares subidiomorfas. Muy fracturadas, con bordes de retrogradación.

Cuarzo: Extinción ondulante.

Plagioclasas: Alotriomorfas, aunque en algunos casos se diferencia su hábito tabular. Algunas albitizadas, zonadas. Se presentan recrecimientos.

Feldespatos Potásicos: Cristales pequeños, con bordes irregulares.

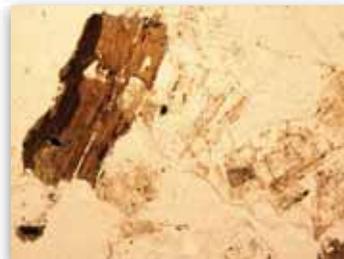
OBSERVACIONES:

No se observan evidencias de deformación.

DANA-23a

CLASIFICACIÓN: Granodiorita de Bt de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
87	4	7		2	
45	8	40			7
11	16	73			



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg y Bt

Min. Secundarios: Clorita, sericita

Min. Accesorios: Ap, Zr

ALTERACIONES:

Sericitización: En algunas Plg

Cloritización: En los bordes de las Bt

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Biotita: Cloritizadas en los bordes.

Plagioclasa: Muy fracturadas. Algunas sericitizadas.

Cuarzo: Policristalino.

Hornblenda: Cloritizada.

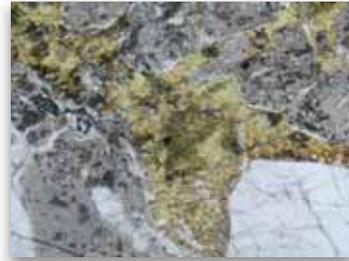
OBSERVACIONES:

La muestra proviene del fondo marino por lo que se encuentra muy alterada.

ROCA23J-8

CLASIFICACIÓN: Granodiorita de Bt y Hb de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
58		25	4	10	3
2	35	62		1	
1	40	47		8	4



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Plg, Hb y Bt

Min. Secundarios: Sericita

Min. Accesorios: Ms

ALTERACIONES:

Sericitización: Abundante en Plg.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Cuarzo: Polisintético. Extinción ondulante.

Plagioclasa: Subidiomorfos-alotriomorfo. Macla polisintética. Muy alteradas (sericitizadas). Forma aglomerados.

Biotita: Completamente cloritizada. Con bordes alterados a óxidos.

Hornblenda: Escasa. Intensamente fracturada y cloritizada,

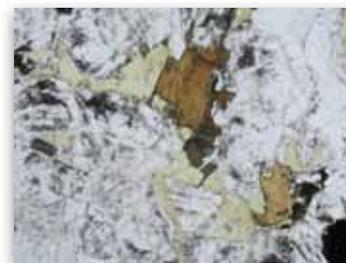
OBSERVACIONES:

La muestra es de origen marino por lo que se encuentra muy alterada.

ROCA23J-18

CLASIFICACIÓN: Granodiorita de Bt de grano medio

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
	20	79		1	
9	26	58		7	
32	13	32		23	



TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Fto K, Plg y Bt

Min. Secundarios: Sericita, clorita

Min. Accesorios: Zr, Ms

ALTERACIONES:

Sericitización: Intensa en Plg

Cloritización: Moderada en los bordes de las Bt.

TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Biotita: Algunas presentan cloritización en los bordes granulares, pero la alteración es escasa en el interior.

Cuarzo: Policristalino. Extinción ondulante. Alotriomorfo. Bordes en puzzle.

Plagioclasa: Alotriomorfas. Macla polisintética, zonadas. Bordes de corrosión. Sericitizadas. Levemente fracturadas.

OBSERVACIONES:

Se presentan texturas mirmequíticas.

ROCA23J-20

CLASIFICACIÓN: Tonalita de Hb de grano fino

Qz	Fto K	Plg	Hb	Bt	Op
8		54	38		
10		30	60		
26		58	16		

TEXTURA

MINERALOGÍA:

Min. Principales: Qz, Plg y Hb

Min. Secundarios: clorita, sericita

Min. Accesorios:

ALTERACIONES:

Cloritización: Intensa en algunas Hb.

Sericitización: Intensa en Plg.



TEXTURAS Y ESTRUCTURAS:

Hornblenda: Muy abundante y fracturada. Subidiomormas. Algunas muy cloritizadas.

Cuarzo: Polisintético. Extinción ondulante.

Plagioclasa: Totalmente sericitizadas.

OBSERVACIONES:

Apéndice IV

Datos Geoquímicos

Muestra	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ t (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
SC-8	58.36	0.79	17.06	6.94	0.12	2.99	5.72	3.87	2.45
SC-17	63.10	0.61	16.06	6.08	0.09	2.19	4.50	3.90	2.51
SC-20	63.12	0.62	16.83	6.09	0.09	2.10	4.77	4.01	1.89
SD-25	69.57	0.24	15.42	3.64	0.05	2.21	2.53	4.45	2.53
SCR-26	60.72	0.65	16.21	7.64	0.11	0.58	5.38	3.81	1.71
SCR-27	67.48	0.39	15.29	4.61	0.05	2.84	3.42	3.84	2.65
SCR-28	68.04	0.45	15.32	4.43	0.06	1.24	3.08	4.18	2.98
SCR-30	50.67	1.12	18.92	10.12	0.15	4.46	9.31	3.47	0.51
PB-32	52.79	0.92	18.95	9.45	0.15	3.37	7.56	3.76	1.86

Muestra	P2O5 (%)	Li (µg/g)	Be (µg/g)	B (µg/g)	P (µg/g)	Sc (µg/g)	V (µg/g)	Cr (µg/g)
SC-8	0.21	10.52	1.89	91.91	0.21	16.64	153.29	301
SC-17	0.15	17.46	1.75	27.37	0.15	9.06	89.81	337
SC-20	0.18	10.93	1.66	60.27	0.18	8.23	87.6	353
SD-25	0.08	30.63	2.01	31.23	0.07	2.87	25.95	409
SCR-26	0.15	12.99	1.31	34.79	0.15	12.69	116.77	270
SCR-27	0.11	13.80	1.35	59.22	0.11	5.67	56.92	442
SCR-28	0.13	11.54	1.26	18.30	0.28	19.77	197.39	193
SCR-30	0.22	12.08	0.87	20.52	0.22	27.39	286.62	223
PB-32	0.28	17.55	2.19	19.73	0.12	5.45	54.53	492

Muestras	Co (µg/g)	Ni (µg/g)	Cu (µg/g)	Zn (µg/g)	Ga (µg/g)	Rb (µg/g)	Sr (µg/g)	Y (µg/g)	Zr (µg/g)
SC-8	18.01	20.04	104.25	77.27	19.38	61.21	526	22.50	21.48
SC-17	12.99	65.73	36.45	65.06	17.90	65.84	383	14.30	14.94
SC-20	13.55	57.39	57.20	67.71	18.71	36.84	472	11.67	12.15
SD-25	4.25	108.54	16.77	47.96	19.56	62.60	543	4.64	16.24
SCR-26	17.74	148.56	45.37	71.95	17.42	40.16	400	17.67	14.24
SCR-27	8.83	80.29	40.11	43.82	16.02	57.45	467	5.42	13.41
SCR-28	24.76	27.34	94.28	88.18	20.43	51.02	479	20.94	15.95
SCR-30	29.30	18.83	94.43	88.78	20.44	10.33	554	13.85	16.20
PB-32	8.57	45.73	19.25	46.47	17.23	84.85	318	13.35	25.87

Muestra	Nb ($\mu\text{g/g}$)	Mo ($\mu\text{g/g}$)	Sn ($\mu\text{g/g}$)	Sb ($\mu\text{g/g}$)	Cs ($\mu\text{g/g}$)	Ba ($\mu\text{g/g}$)	La ($\mu\text{g/g}$)	Ce ($\mu\text{g/g}$)
SC-8	11.16	10.80	1.68	0.48	1.55	878	25.98	53.31
SC-17	9.99	24.71	2.12	0.31	1.89	826	19.84	37.66
SC-20	9.73	21.13	2.89	0.43	0.73	774	23.24	41.84
SD-25	6.25	38.84	1.54	0.22	2.01	1232	17.64	33.02
SCR-26	8.59	39.37	2.64	0.42	0.85	601	14.10	29.27
SCR-27	4.72	30.44	2.48	0.27	1.16	1176	30.39	47.32
SCR-28	6.51	8.19	2.59	0.22	1.27	559	12.73	28.11
SCR-30	3.92	5.55	1.01	0.11	0.32	254	7.78	16.86
PB-32	12.06	20.47	1.97	0.16	2.11	823	23.58	44.56

Muestra	Pr ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Eu ($\mu\text{g/g}$)	Tb ($\mu\text{g/g}$)	Gd ($\mu\text{g/g}$)	Dy ($\mu\text{g/g}$)	Ho ($\mu\text{g/g}$)	Er ($\mu\text{g/g}$)
SC-8	6.74	25.33	5.26	1.16	0.68	4.42	3.90	0.76	2.16
SC-17	4.41	16.20	3.31	0.91	0.44	2.87	2.53	0.50	1.37
SC-20	4.63	16.34	3.07	0.95	0.38	2.59	2.13	0.42	1.10
SD-25	3.69	12.63	2.11	0.69	0.19	1.47	0.99	0.19	0.44
SCR-26	3.65	14.68	3.27	0.91	0.50	3.13	2.98	0.59	1.69
SCR-27	4.50	13.62	1.96	0.71	0.21	1.49	1.11	0.23	0.56
SCR-28	3.78	16.11	3.91	1.18	0.60	3.80	3.64	0.72	2.07
SCR-30	2.27	10.40	2.57	1.04	0.42	2.67	2.53	0.51	1.37
PB-32	4.87	16.46	3.08	0.84	0.39	2.57	2.28	0.45	1.27

Muestra	Yb ($\mu\text{g/g}$)	Lu ($\mu\text{g/g}$)	Hf ($\mu\text{g/g}$)	Ta ($\mu\text{g/g}$)	W ($\mu\text{g/g}$)	Tl ($\mu\text{g/g}$)	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)
SC-8	2.08	0.30	0.82	0.67	0.70	0.26	10.92	7.29	2.20
SC-17	1.37	0.21	0.52	0.73	0.54	0.25	10.53	10.59	3.53
SC-20	1.08	0.16	0.37	0.78	0.59	0.14	11.25	8.33	1.73
SD-25	0.38	0.05	0.42	0.47	0.60	0.31	13.73	4.00	0.27
SCR-26	1.72	0.27	0.53	0.74	0.46	0.27	8.96	5.67	2.31
SCR-27	0.52	0.08	0.27	0.30	0.56	0.22	11.95	9.19	1.47
SCR-28	2.00	0.29	0.63	0.34	0.36	0.26	7.90	1.43	0.63
SCR-30	1.29	0.20	0.48	0.21	0.37	0.04	3.92	0.43	0.21
PB-32	1.35	0.20	0.99	1.05	0.96	0.28	10.51	9.31	1.97

Apéndice V

Edades U-Pb

SC-8 (Isla Santa Catalina)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
16.5 ± 1.2	9.4 ± 5.3	-	16.5 ± 1.2	232	0.7	AR-11-13
17.3 ± 0.9	13.5 ± 1.5	-	17.3 ± 0.9	794	8.7	AR-11-15
17.8 ± 1.0	9.6 ± 3.1	-	17.8 ± 1.0	345	0.9	AR-11-16
18.2 ± 0.8	10.5 ± 2.1	-	18.2 ± 0.8	433	0.5	AR-11-11
18.4 ± 0.5	12.9 ± 2.6	-	18.4 ± 0.5	270	0.7	AR-11-10
18.5 ± 1.0	13.4 ± 2.8	-	18.5 ± 1.0	350	0.7	AR-11-6
18.7 ± 0.7	19.0 ± 2.3	60.1 ± 273.9	18.7 ± 0.7	521	0.8	AR-11-1
18.9 ± 0.5	15.6 ± 2.9	-	18.9 ± 0.5	549	0.5	AR-11-12
18.9 ± 0.3	16.9 ± 2.7	-	18.9 ± 0.3	468	0.8	AR-11-2
19.0 ± 0.2	15.5 ± 2.2	-	19.0 ± 0.2	708	0.5	AR-11-14
19.1 ± 0.4	12.0 ± 1.9	-	19.1 ± 0.4	424	0.6	AR-11-9
19.3 ± 0.4	17.5 ± 2.5	-	19.3 ± 0.4	530	0.6	AR-11-7
19.3 ± 0.3	15.0 ± 2.8	-	19.3 ± 0.3	310	0.7	AR-11-4
19.7 ± 0.6	10.0 ± 6.5	-	19.7 ± 0.6	227	0.9	AR-11-3
20.0 ± 0.2	15.7 ± 1.3	-	20.0 ± 0.2	576	0.5	AR-11-8
20.1 ± 0.7	15.0 ± 3.2	-	20.1 ± 0.7	365	0.8	AR-11-5

SC-17 (Isla Santa Catalina)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
16.5 ± 1.2	9.4 ± 5.3	109.6 ± 69.3	89.6 ± 21.1	1679	3.7	AR-20-4
17.3 ± 0.9	13.5 ± 1.5	94.4 ± 49.7	90.6 ± 1.4	824	2.6	AR-20-13
17.8 ± 1.0	9.6 ± 3.1	-	92.2 ± 3.0	379	1.1	AR-20-16
18.2 ± 0.8	10.5 ± 2.1	-	93.6 ± 2.1	134	1.7	AR-20-3
18.4 ± 0.5	12.9 ± 2.6	-	94.0 ± 1.1	331	1.2	AR-20-12
18.5 ± 1.0	13.4 ± 2.8	-	94.6 ± 1.6	186	1.6	AR-20-1
18.7 ± 0.7	19.0 ± 2.3	47.9 ± 73.5	94.7 ± 0.9	539	1.1	AR-20-9
18.9 ± 0.5	15.6 ± 2.9	-	94.7 ± 1.5	209	1.7	AR-20-2
18.9 ± 0.3	16.9 ± 2.7	-	94.9 ± 0.9	333	1.2	AR-20-14
19.0 ± 0.2	15.5 ± 2.2	-	95.7 ± 1.9	191	1.3	AR-20-15
19.1 ± 0.4	12.0 ± 1.9	-	97.3 ± 1.0	203	1.6	AR-20-7
19.3 ± 0.4	17.5 ± 2.5	-	98.0 ± 2.0	239	1.7	AR-20-6
19.3 ± 0.3	15.0 ± 2.8	-	98.9 ± 1.0	179	1.6	AR-20-10
19.7 ± 0.6	10.0 ± 6.5	78.4 ± 55.1	100.0 ± 1.5	431	1.7	AR-20-11
20.0 ± 0.2	15.7 ± 1.3	53.9 ± 69.7	102.3 ± 1.0	421	1.7	AR-20-8
20.1 ± 0.7	15.0 ± 3.2	-	102.5 ± 1.3	347	2.2	AR-20-5

SC-20 (Isla Santa Catalina)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
88.7 ± 1.9	85.2 ± 2.5	-	88.7 ± 1.9	1114	0.8	AR-23-12
90.9 ± 1.7	87.4 ± 5.6	-	90.9 ± 1.7	304	1.9	AR-23-10
91.8 ± 1.1	99.4 ± 3.4	286.2 ± 76.6	91.8 ± 1.1	421	1.4	AR-23-9
92.4 ± 1.4	86.7 ± 3.0	-	92.4 ± 1.4	461	1.3	AR-23-11
92.6 ± 0.9	94.5 ± 7.2	141.5 ± 186.8	92.6 ± 0.9	454	1.2	AR-23-7
93.0 ± 1.8	91.3 ± 3.7	49.4 ± 89.5	93.0 ± 1.8	347	1.4	AR-23-3
93.0 ± 0.9	88.6 ± 3.5	-	93.0 ± 0.9	454	1.2	AR-23-8
93.7 ± 1.1	81.6 ± 5.7	-	93.7 ± 1.1	286	1.5	AR-23-1
93.7 ± 1.2	90.4 ± 4.7	4.6 ± 125.6	93.7 ± 1.2	303	1.4	AR-23-14
93.7 ± 1.5	90.0 ± 3.6	-	93.7 ± 1.5	416	1.6	AR-23-15
93.9 ± 0.9	85.3 ± 2.8	-	93.9 ± 0.9	426	1.6	AR-23-6
94.6 ± 1.9	97.9 ± 4.8	178.8 ± 109.4	94.6 ± 1.9	441	1.4	AR-23-4
95.3 ± 0.9	95.8 ± 5.6	108.1 ± 143.1	95.3 ± 0.9	506	1.3	AR-23-5
95.3 ± 1.3	90.0 ± 9.8	-	95.3 ± 1.3	211	1.2	AR-23-16
95.5 ± 0.9	88.1 ± 5.4	-	95.5 ± 0.9	151	1.7	AR-23-13
99.0 ± 1.2	109.8 ± 32.7	349.9 ± 726.9	99.0 ± 1.2	84	1.5	AR-23-2

SCR-26 (Isla Santa Cruz)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
93.2 ± 2.9	37.4 ± 13.8	-	93.2 ± 2.9	64	1.2	AR-29-13
93.7 ± 4.4	52.5 ± 9.8	-	93.7 ± 4.4	62	1.4	AR-29-15
94.4 ± 2.9	86.9 ± 12.8	-	94.4 ± 2.9	68	1.3	AR-29-5
94.7 ± 0.9	49.6 ± 10.0	-	94.7 ± 0.9	60	1.4	AR-29-4
95.1 ± 2.2	58.5 ± 6.5	-	95.1 ± 2.2	56	1.4	AR-29-16
95.2 ± 4.3	62.0 ± 21.8	-	95.2 ± 4.3	62	1.5	AR-29-14
95.2 ± 2.9	67.8 ± 17.9	-	95.2 ± 2.9	80	1.3	AR-29-10
95.5 ± 1.0	70.9 ± 16.0	-	95.5 ± 1.0	63	1.4	AR-29-12
96.3 ± 1.5	90.5 ± 6.6	-	96.3 ± 1.5	238	1.0	AR-29-11
97.1 ± 1.2	102.2 ± 12.8	223.9 ± 305.2	97.1 ± 1.2	76	1.5	AR-29-8
97.3 ± 2.1	92.0 ± 8.1	-	97.3 ± 2.1	127	2.7	AR-29-1
98.3 ± 1.1	92.0 ± 9.8	-	98.3 ± 1.1	96	1.7	AR-29-2
99.8 ± 1.7	42.8 ± 12.2	-	99.8 ± 1.7	49	1.2	AR-29-9
100.4 ± 1.0	83.5 ± 9.7	-	100.4 ± 1.0	125	1.5	AR-29-7
100.8 ± 1.2	97.2 ± 6.1	11.2 ± 156.6	100.8 ± 1.2	266	1.1	AR-29-3
102.1 ± 1.7	83.0 ± 13.7	-	102.1 ± 1.7	102	1.5	AR-29-6

SCR-27 (Isla Santa Cruz)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
88.6 ± 4.4	103.2 ± 17.7	454.2 ± 386.7	88.6 ± 4.4	195	1.4	AR-30-16
91.8 ± 2.6	93.8 ± 10.2	144.4 ± 258.0	91.8 ± 2.6	157	1.2	AR-30-9
93.6 ± 2.7	87.7 ± 8.1	-	93.6 ± 2.7	274	0.8	AR-30-7
95.1 ± 0.9	92.2 ± 6.0	16.0 ± 161.9	95.1 ± 0.9	248	1.2	AR-30-14
95.9 ± 2.8	80.1 ± 7.2	-	95.9 ± 2.8	194	1.5	AR-30-15
96.1 ± 1.8	87.4 ± 5.4	-	96.1 ± 1.8	199	1.8	AR-30-13
96.2 ± 1.0	95.6 ± 4.2	78.3 ± 107.4	96.2 ± 1.0	500	1.8	AR-30-4
96.7 ± 3.7	59.0 ± 14.6	-	96.7 ± 3.7	56	3.1	AR-30-12
96.9 ± 1.0	94.6 ± 4.1	36.5 ± 106.2	96.9 ± 1.0	361	0.8	AR-30-2
97.5 ± 1.0	86.9 ± 7.5	-	97.5 ± 1.0	182	1.1	AR-30-5
98.1 ± 1.0	93.1 ± 10.6	-	98.1 ± 1.0	201	0.9	AR-30-10
98.9 ± 1.0	81.9 ± 5.2	-	98.9 ± 1.0	147	1.7	AR-30-6
100.6 ± 3.3	98.5 ± 7.1	47.4 ± 162.4	100.6 ± 3.3	161	1.1	AR-30-3
102.9 ± 1.0	104.6 ± 5.8	143.3 ± 134.0	102.9 ± 1.0	251	1.1	AR-30-1
105.3 ± 1.0	114.4 ± 6.4	308.2 ± 132.4	105.3 ± 1.0	391	1.4	AR-30-11
115.5 ± 3.5	125. ± 8.3	314.0 ± 144.5	115.5 ± 3.5	151	2.4	AR-30-8

SCR-28 (Isla Santa Cruz)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
92.2 ± 2.1	82.1 ± 7.9	-	92.2 ± 2.1	198	1.4	AR-31-9
93.9 ± 0.9	75.4 ± 6.6	-	93.9 ± 0.9	173	1.4	AR-31-2
93.9 ± 1.2	87.0 ± 6.2	-	93.9 ± 1.2	159	1.5	AR-31-3
94.6 ± 1.0	86.9 ± 4.8	-	94.6 ± 1.0	374	1.4	AR-31-4
95.1 ± 1.5	83.7 ± 7.6	-	95.1 ± 1.5	239	1.0	AR-31-6
95.4 ± 2.1	84.8 ± 6.6	-	95.4 ± 2.1	288	1.6	AR-31-11
96.2 ± 1.2	92.4 ± 6.2	-	96.2 ± 1.2	274	1.1	AR-31-5
96.3 ± 1.0	67.4 ± 35.9	-	96.3 ± 1.0	40	0.9	AR-31-10
96.3 ± 1.2	88.4 ± 6.4	-	96.3 ± 1.2	226	1.5	AR-31-15
96.6 ± 3.6	75.7 ± 9.6	-	96.6 ± 3.6	153	1.4	AR-31-1
96.8 ± 2.2	77.8 ± 7.6	-	96.8 ± 2.2	167	1.2	AR-31-12
96.9 ± 1.0	84.7 ± 7.1	-	96.9 ± 1.0	249	1.0	AR-31-14
97.0 ± 1.8	89.7 ± 6.3	-	97.0 ± 1.8	291	0.9	AR-31-13
97.7 ± 1.0	76.8 ± 9.0	-	97.7 ± 1.0	178	1.2	AR-31-8
98.8 ± 1.4	84.7 ± 5.4	-	98.8 ± 1.4	170	1.3	AR-31-7
99.3 ± 1.8	76.9 ± 9.6	-	99.4 ± 1.5	84	1.2	AR-31-10
99.4 ± 1.5	90.4 ± 12.0	-	99.4 ± 1.5	175	1.3	AR-31-16

SCR-30 (Isla Santa Cruz)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
89.6 ± 2.3	28.6 ± 14.5	-	89.6 ± 2.3	43	1.2	AR-33-4
92.0 ± 3.3	59.8 ± 21.0	-	92.0 ± 3.3	49	1.3	AR-33-15
93.0 ± 1.8	31.1 ± 26.9	-	93.0 ± 1.8	38	1.4	AR-33-3
93.9 ± 1.0	66.9 ± 18.0	-	93.9 ± 1.0	62	1.7	AR-33-11
94.7 ± 4.7	41.5 ± 18.1	-	94.7 ± 4.7	26	1.4	AR-33-12
95.2 ± 1.2	91.8 ± 3.1	4.5 ± 79.6	95.2 ± 1.2	620	1.0	AR-33-16
95.3 ± 3.2	66.0 ± 11.7	-	95.3 ± 3.2	73	1.4	AR-33-13
96.7 ± 2.2	57.9 ± 94.1	-	96.7 ± 2.2	39	1.9	AR-33-8
96.9 ± 1.0	109.2 ± 19.3	387.7 ± 421.0	96.9 ± 1.0	71	1.4	AR-33-5
97.5 ± 1.7	77.3 ± 9.5	-	97.5 ± 1.7	70	1.3	AR-33-14
97.8 ± 1.0	86.9 ± 11.0	-	97.8 ± 1.0	71	1.2	AR-33-2
97.9 ± 1.3	90.5 ± 6.5	-	97.9 ± 1.3	265	2.5	AR-33-7
100.4 ± 1.0	79.5 ± 39.6	-	100.4 ± 1.0	49	1.0	AR-33-6

SD-25 (Isla San Diego)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
89.5 ± 1.4	89.7 ± 5.8	96.0 ± 154.3	89.5 ± 1.4	291	0.8	AR-28-13
90.0 ± 1.3	81.7 ± 3.4	-	90.0 ± 1.3	344	0.8	AR-28-3
91.6 ± 0.9	92.0 ± 2.1	103.5 ± 52.3	91.6 ± 0.9	1227	0.3	AR-28-16
92.1 ± 1.4	89.2 ± 4.0	13.8 ± 105.7	92.1 ± 1.4	416	1.7	AR-28-7
92.7 ± 0.9	87.2 ± 4.7	-	92.7 ± 0.9	492	1.4	AR-28-12
92.9 ± 1.9	77.3 ± 5.4	-	92.9 ± 1.9	206	1.3	AR-28-10
93.4 ± 0.9	91.6 ± 3.4	46.1 ± 90.9	93.4 ± 0.9	467	0.8	AR-28-14
94.1 ± 0.9	74.8 ± 11.8	-	94.1 ± 0.9	153	1.3	AR-28-8
94.5 ± 1.7	88.6 ± 11.3	-	94.5 ± 1.7	193	1.0	AR-28-6
94.8 ± 0.9	90.8 ± 4.8	-	94.8 ± 0.9	504	1.2	AR-28-4
96.7 ± 1.0	81.6 ± 10.5	-	96.7 ± 1.0	139	2.6	AR-28-15
97.0 ± 1.0	84.0 ± 10.9	-	97.0 ± 1.0	204	1.1	AR-28-9
97.7 ± 2.1	77.4 ± 13.9	-	97.7 ± 2.1	121	1.5	AR-28-1
97.8 ± 2.2	129.6 ± 29.7	760.3 ± 519.1	97.8 ± 2.2	117	1.5	AR-28-11
100.7 ± 1.0	77.9 ± 9.9	-	100.7 ± 1.0	80	1.6	AR-28-5
101.3 ± 1.0	90.7 ± 6.6	-	101.3 ± 1.0	287	1.0	AR-28-2

PB-32 (Punta Botella)

$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ Age (Ma)	Best Age (Ma)	U (ppm)	Th/U	Analysis ID
92.5 ± 1.6	99.2 ± 5.6	264.0 ± 131.1	92.5 ± 1.6	381	1.7	AR-35-13
96.0 ± 1.0	100.9 ± 2.6	216.4 ± 58.5	96.3 ± 2.2	417	1.2	AR-35-14
96.3 ± 2.2	97.6 ± 13.0	129.9 ± 325.2	96.3 ± 2.2	138	2.1	AR-35-8
96.8 ± 1.0	91.8 ± 7.7	-	96.8 ± 1.0	206	1.5	AR-35-4
97.8 ± 2.6	94.0 ± 5.5	-	97.8 ± 2.6	373	1.9	AR-35-6
98.0 ± 1.3	86.0 ± 9.6	-	98.0 ± 1.3	107	1.7	AR-35-5
98.1 ± 1.0	95.3 ± 4.4	25.3 ± 113.9	98.1 ± 1.0	474	1.4	AR-35-2
98.4 ± 1.0	97.1 ± 7.2	64.4 ± 184.4	98.4 ± 1.0	308	1.5	AR-35-16
99.2 ± 1.8	83.8 ± 12.6	-	99.2 ± 1.8	98	1.6	AR-35-7
100.2 ± 1.0	107.3 ± 4.1	269.6 ± 88.4	100.2 ± 1.0	300	2.2	AR-35-1
100.5 ± 1.9	92.5 ± 11.0	-	100.5 ± 1.9	108	1.7	AR-35-11
100.6 ± 1.5	105.4 ± 6.3	215.5 ± 141.3	100.6 ± 1.5	288	1.4	AR-35-3
100.7 ± 4.5	73.0 ± 14.9	-	100.7 ± 4.5	98	1.0	AR-35-15
100.9 ± 1.0	95.1 ± 6.0	-	100.9 ± 1.0	258	1.8	AR-35-10
101.1 ± 1.5	86.5 ± 9.4	-	101.1 ± 1.5	81	1.5	AR-35-9
103.6 ± 1.7	102.6 ± 5.7	80.1 ± 133.3	103.6 ± 1.7	155	1.9	AR-35-12

Apéndice VI

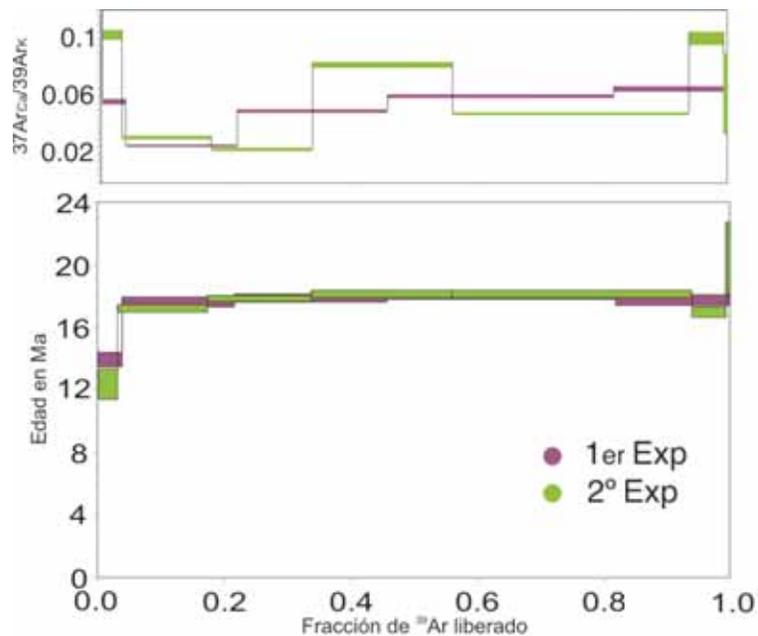
Experimentos por pasos ^{40}Ar - ^{39}Ar

SC-24 (Biotita)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	
1°	1	0.20	0.0021	0.0021	5.97 ± 8.58	96.40	3.60	0.273	
	2	0.60	0.0363	0.0385	13.93 ± 0.45	61.52	38.48	0.056	
	3	0.90	0.1780	0.2164	17.61 ± 0.31	17.66	82.34	0.026	
	4	1.40	0.2406	0.4570	17.89 ± 0.26	6.82	93.18	0.050	
	5	2.50	0.3603	0.8174	18.03 ± 0.23	6.51	93.49	0.060	
	6	6.00	0.1826	1.0000	17.75 ± 0.33	8.79	91.21	0.065	X
2°	1	6.00	0.1826	1.0000	17.75 ± 0.33	8.79	91.21	0.065	
	2	0.80	0.1420	0.1746	17.23 ± 0.24	20.22	79.78	0.031	
	3	1.00	0.1624	0.3370	17.86 ± 0.19	8.23	91.77	0.023	
	4	1.50	0.2224	0.5594	18.15 ± 0.24	5.13	94.87	0.082	
	5	2.50	0.3805	0.9399	18.13 ± 0.22	3.64	96.36	0.048	
	6	4.00	0.0544	0.9943	16.97 ± 0.34	7.90	92.10	0.010	
	7	6.00	0.0057	1.0000	20.44 ± 2.32	4.68	95.32	0.062	X

RESULTADOS INTEGRADOS

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1°	5.567E-03	3.14 ± 0.02	17.70 ± 0.15	0.052	14.8	85.92	2099.27
2°	3.446E-03	3.14 ± 0.02	17.72 ± 0.13	0.053	13.04	86.96	2265.63



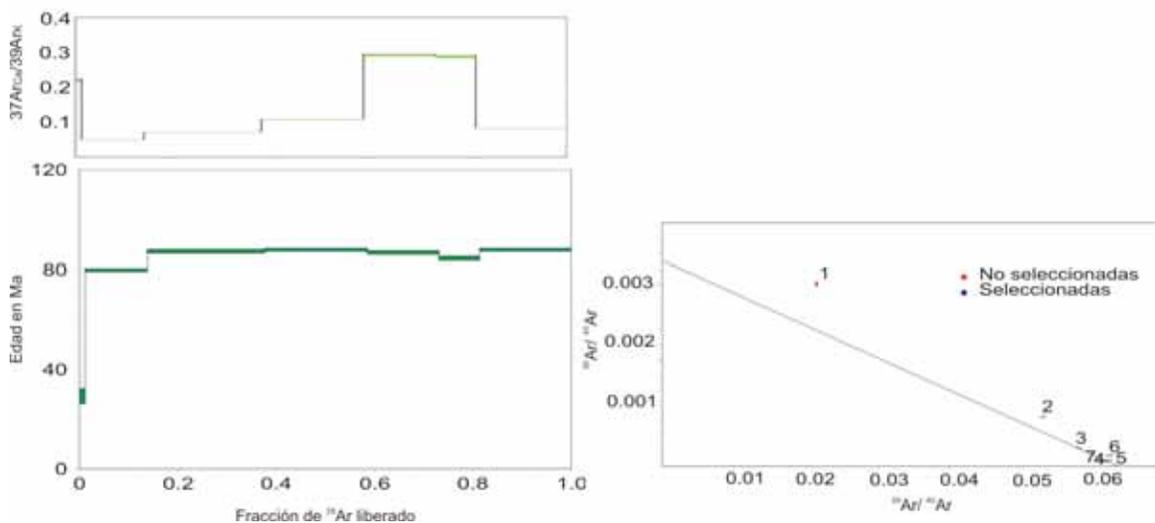
SC-17 (Biotita)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1°	1	0.30	0.0123	0.0123	29.20 ± 3.04	88.90	11.10	0.220
	2	0.60	0.1266	0.1389	79.87 ± 0.67	23.93	76.07	0.049
	3	0.90	0.2382	0.3771	87.18 ± 0.73	8.97	91.03	0.071
	4	1.40	0.2082	0.5853	87.92 ± 0.63	2.22	97.78	0.108
	5	1.80	0.1463	0.7316	86.74 ± 0.79	2.97	97.03	0.292
	6	2.40	0.0829	0.8146	84.46 ± 0.80	5.22	94.78	0.288
	7	4.00	0.1854	1.0000	87.87 ± 0.71	3.56	96.44	0.082

x

RESULTADOS INTEGRADOS

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1°	6.997E-03	15.45 ± 0.06	85.55 ± 0.43	0.130	10.32	89.68	2862.58

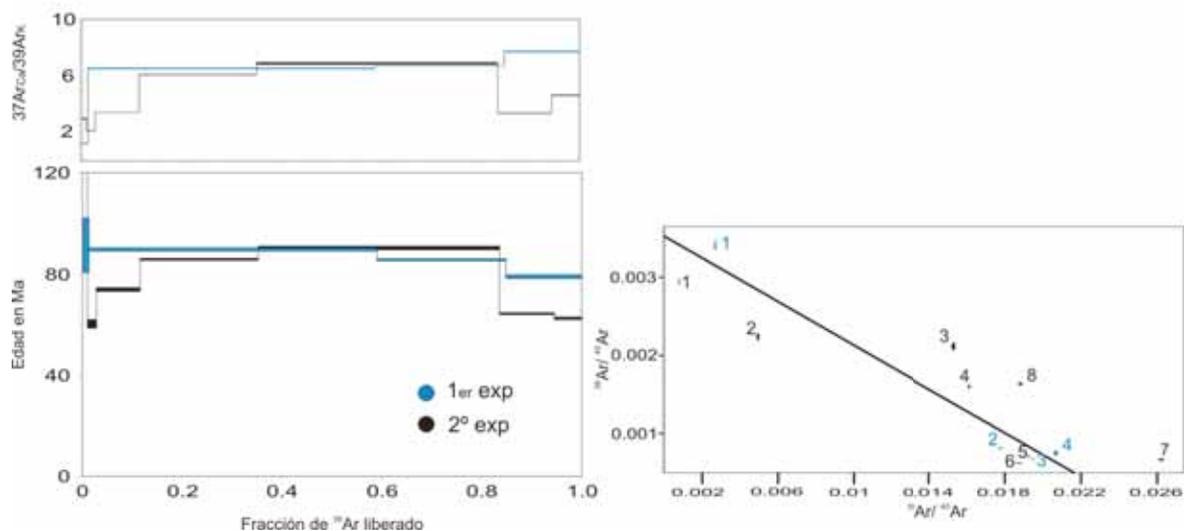


SC-17 (Hornblenda)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1°	1	0.50	0.0134	0.0134	91.42 ± 10.79	85.90	14.10	1.238
	2	1.20	0.5763	0.5897	89.78 ± 0.56	9.25	90.75	6.545
	3	1.90	0.2592	0.8489	85.73 ± 0.33	5.11	94.89	6.700
	4	5.00	0.1511	1.0000	79.07 ± 0.80	7.39	92.61	7.739
2°	1	0.40	0.0018	0.0018	533.50 ± 17.08	72.15	27.85	3.030
	2	0.80	0.0091	0.0109	169.40 ± 4.36	51.25	48.75	2.985
	3	1.10	0.0166	0.0275	60.43 ± 1.67	47.77	52.23	2.119
	4	1.80	0.0885	0.1160	73.92 ± 0.63	32.49	67.51	3.446
	5	2.30	0.2359	0.3520	85.95 ± 0.36	6.18	93.82	6.089
	6	2.90	0.4836	0.8356	90.47 ± 0.79	3.66	96.34	6.897
	7	3.80	0.1090	0.9445	64.34 ± 0.45	4.95	95.05	3.376
	8	7.00	0.0555	1.0000	62.57 ± 0.54	33.56	66.44	4.648

RESULTADOS INTEGRADOS

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	
1°	1.693E-03	15.75	87.14	0.49	6.694	14.59	85.4	2025.56
2°	4.432E-03	15.30	84.72	0.49	5.771	13.88	86.12	2129.38

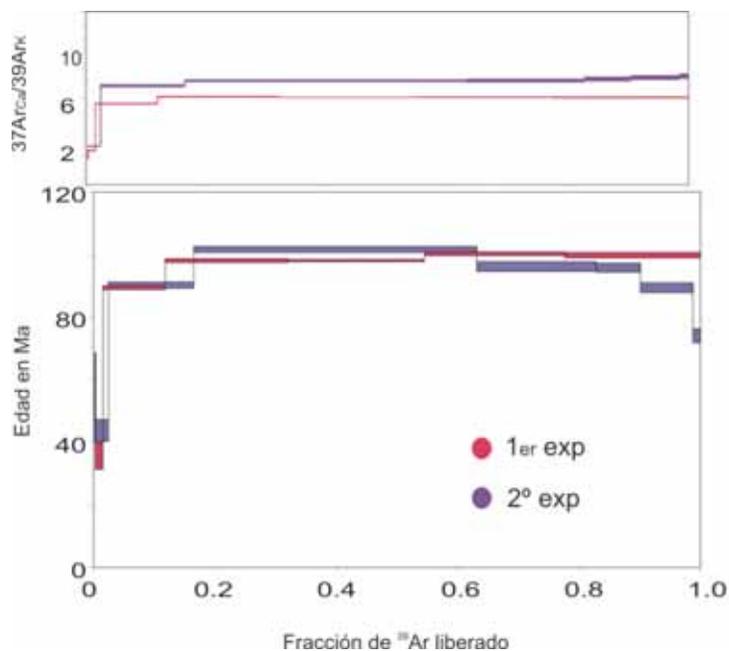


SCR-26 (Hornblenda)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1°	1	0.22	0.0034	0.0034	57.84 ± 10.72	92.93	7.07	1.881
	2	0.55	0.0119	0.0153	35.58 ± 4.30	82.80	17.20	2.377
	3	0.93	0.1029	0.1182	89.34 ± 0.65	19.02	80.98	5.617
	4	1.30	0.2006	0.3188	98.07 ± 0.65	7.70	92.30	6.097
	5	1.80	0.2250	0.5438	98.15 ± 0.38	7.37	92.63	6.045
	6	2.40	0.2318	0.7756	100.20 ± 0.70	5.24	94.76	6.066
	7	5.00	0.2244	1.0000	99.70 ± 0.89	2.46	97.54	6.050
2°	1	0.20	0.0246	0.0246	43.71 ± 3.530	82.58	17.42	2.665
	2	0.90	0.1394	0.1640	90.18 ± 0.970	13.47	86.53	6.848
	3	1.20	0.4660	0.6300	101.60 ± 0.950	6.60	93.40	7.214
	4	1.40	0.1964	0.8264	96.12 ± 1.547	5.62	94.38	7.211
	5	1.70	0.0772	0.9035	95.79 ± 1.533	4.81	95.19	7.318
	6	3.00	0.0836	0.9872	89.34 ± 1.643	6.69	93.31	7.422
	7	6.00	0.0128	1.0000	73.88 ± 2.164	22.50	77.50	7.521

RESULTADOS INTEGRADOS

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1°	4.193E-03	17.62 ± 0.06	97.19 ± 0.47	5.960	10.94	89.06	2701.18
2°	2.121E-03	17.34 ± 0.11	95.69 ± 0.67	7.080	11.66	88.34	2535.3

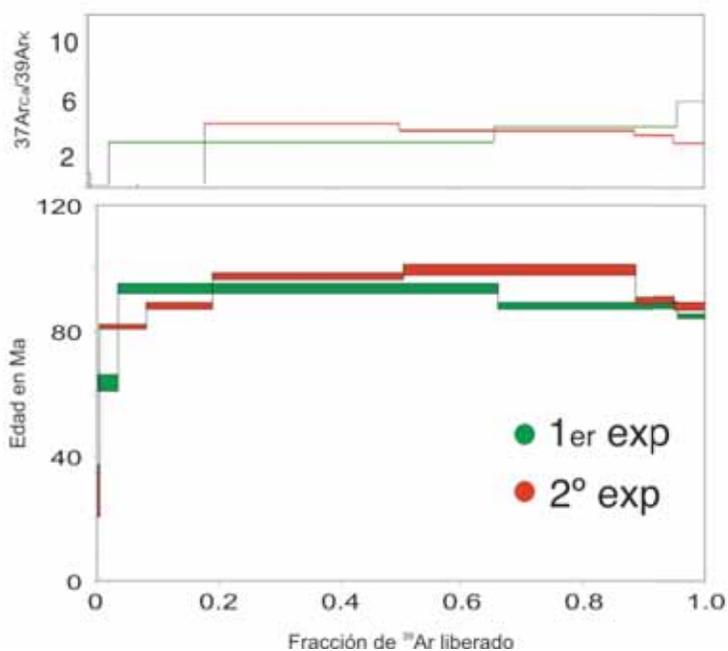


SCR-27 (Hornblenda)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1°	1	0.25	0.0345	0.0345	63.59 ± 2.70	57.08	42.92	0.188
	2	1.00	0.6260	0.6605	93.78 ± 1.60	4.32	95.68	3.144
	3	1.80	0.2958	0.9563	88.12 ± 0.99	2.09	97.91	4.221
	4	5.00	0.0437	1.0000	84.65 ± 0.76	3.28	96.72	5.981
2°	1	0.30	0.0046	0.0046	28.92 ± 8.41	93.24	6.76	0.971
	2	0.80	0.0763	0.0809	81.38 ± 0.71	19.26	80.74	0.075
	3	1.20	0.1090	0.1900	88.13 ± 1.07	6.03	93.97	0.289
	4	2.00	0.3145	0.5045	97.52 ± 1.10	3.34	96.66	4.443
	5	3.10	0.3829	0.8874	99.49 ± 1.48	2.37	97.63	3.953
	6	3.60	0.0632	0.9506	89.77 ± 1.15	2.27	97.73	3.622
	7	7.00	0.0494	1.0000	87.73 ± 1.29	4.53	95.47	3.078

RESULTADOS INTEGRADOS

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1°	1.779E-03	16.41 ± 0.19	90.68 ± 1.07	3.485	6.43	93.57	4595.69
2°	1.779E-03	16.41 ± 0.19	90.68 ± 1.07	3.485	6.43	93.57	4595.69

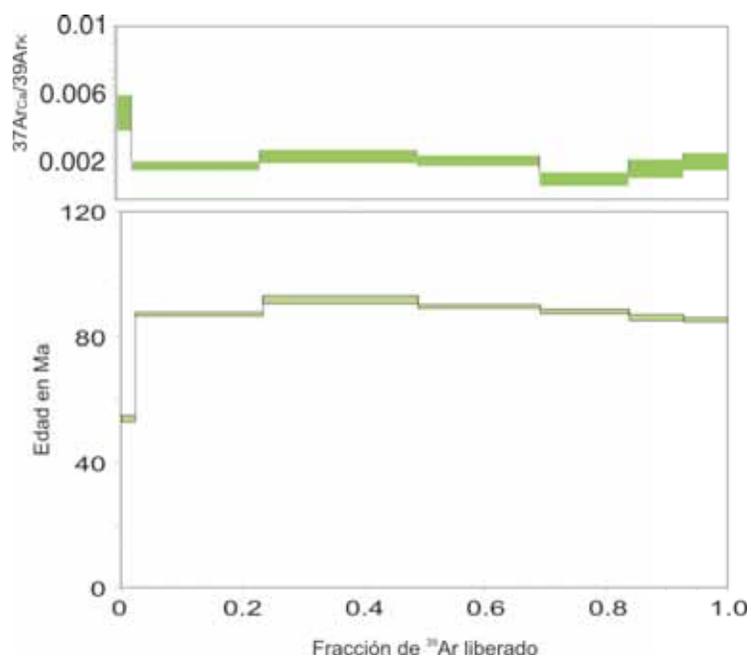


SCR-27 (Biotita)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1 ^o	1	0.25	0.0240	0.0240	54.51 ± 1.11	54.75	45.25	0.057
	2	0.48	0.2100	0.2339	87.54 ± 0.60	8.20	91.80	0.009
	3	0.75	0.2558	0.4897	92.27 ± 1.23	3.25	96.75	0.057
	4	1.10	0.2010	0.6907	90.13 ± 0.65	2.10	97.90	0.042
	5	1.55	0.1459	0.8366	88.43 ± 0.76	1.90	98.10	0.062
	6	2.10	0.0921	0.9287	86.54 ± 0.90	2.48	97.52	0.071
	7	5.00	0.0713	1.0000	85.82 ± 0.78	12.62	87.38	0.174

RESULTADOS INTEGRADOS

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1 ^o	6.231E-03	15.98 ± 0.07	88.40 ± 0.49	0.054	6.08	93.92	4860.83

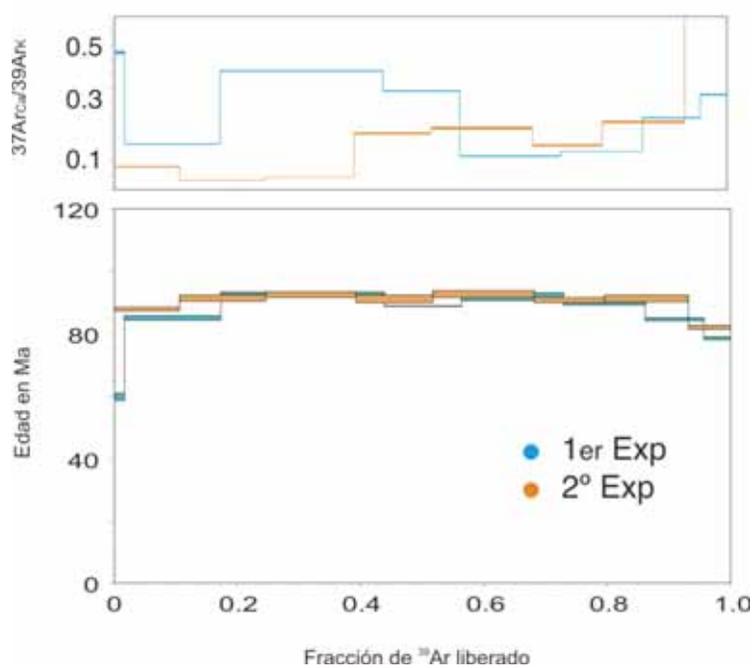


SCR-28 (Biotita)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1°	1	0.30	0.0171	0.0171	59.88 ± 1.28	61.27	38.73	0.475
	2	0.60	0.1554	0.1725	85.07 ± 0.69	10.46	89.54	0.157
	3	0.90	0.2652	0.4377	92.98 ± 0.42	3.12	96.88	0.412
	4	1.10	0.1257	0.5634	88.80 ± 0.19	2.39	97.61	0.342
	5	1.45	0.1659	0.7294	91.83 ± 1.18	1.47	98.53	0.116
	6	1.80	0.1322	0.8615	89.70 ± 0.46	1.96	98.04	0.133
	7	2.40	0.0954	0.9570	84.60 ± 0.37	2.20	97.80	0.248
	8	5.00	0.0430	1.0000	78.59 ± 0.53	4.38	95.62	0.329
2°	1	0.50	0.1058	0.1058	87.91 ± 0.59	23.62	76.38	0.079
	2	0.70	0.1399	0.2457	91.34 ± 0.97	4.62	95.38	0.031
	3	0.90	0.1460	0.3917	92.46 ± 0.93	2.01	97.99	0.042
	4	1.10	0.1251	0.5169	91.16 ± 1.11	1.46	98.54	0.195
	5	1.30	0.1648	0.6817	92.77 ± 1.02	1.44	98.56	0.213
	6	1.50	0.1148	0.7964	90.74 ± 0.89	0.97	99.03	0.153
	7	2.00	0.1346	0.9311	91.29 ± 1.09	1.40	98.60	0.234
	8	5.00	0.0689	1.0000	82.07 ± 0.67	3.46	96.54	0.696

RESULTADOS INTEGRADOS

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1°	1.006E-02	16.03 ± 0.05	88.63 ± 0.40	0.0259	5.36	94.64	5511.91
2°	4.401E-03	16.40 ± 0.07	90.64 ± 0.47	0.175	4.87	95.13	6063.37

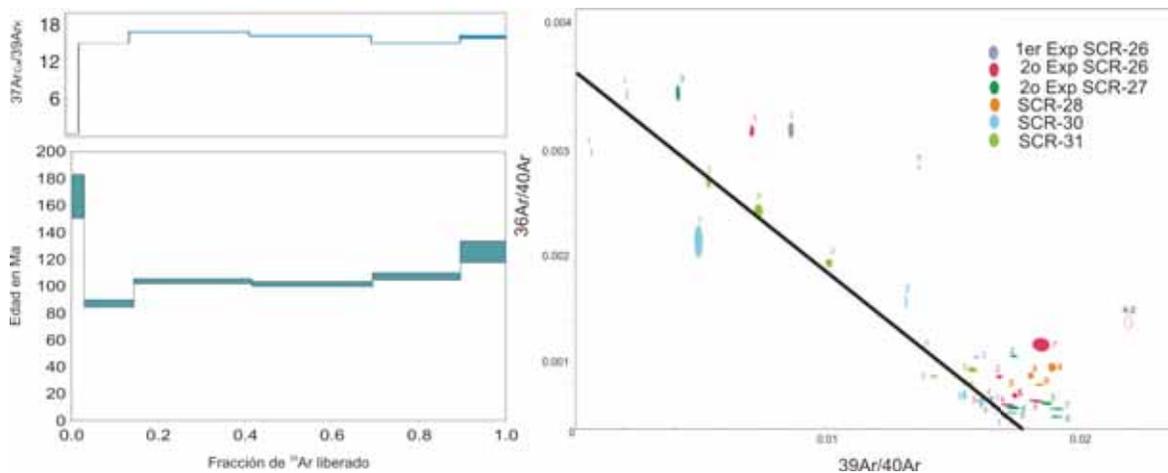


SCR-30 (Hornblenda)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1 ^o	1	0.35	0.0282	0.0282	166.90 ± 16.03	51.56	48.44	0.429
	2	0.90	0.1153	0.1435	87.15 ± 2.55	34.77	65.23	15.045
	3	1.30	0.2725	0.4160	103.60 ± 1.66	8.41	91.59	16.904
	4	1.80	0.2774	0.6934	101.60 ± 1.76	6.43	93.57	16.263
	5	2.40	0.2020	0.8954	107.30 ± 2.78	5.60	94.40	15.090
	6	7.00	0.1046	1.0000	125.50 ± 7.90	8.87	91.13	16.076

RESULTADOS INTEGRADOS

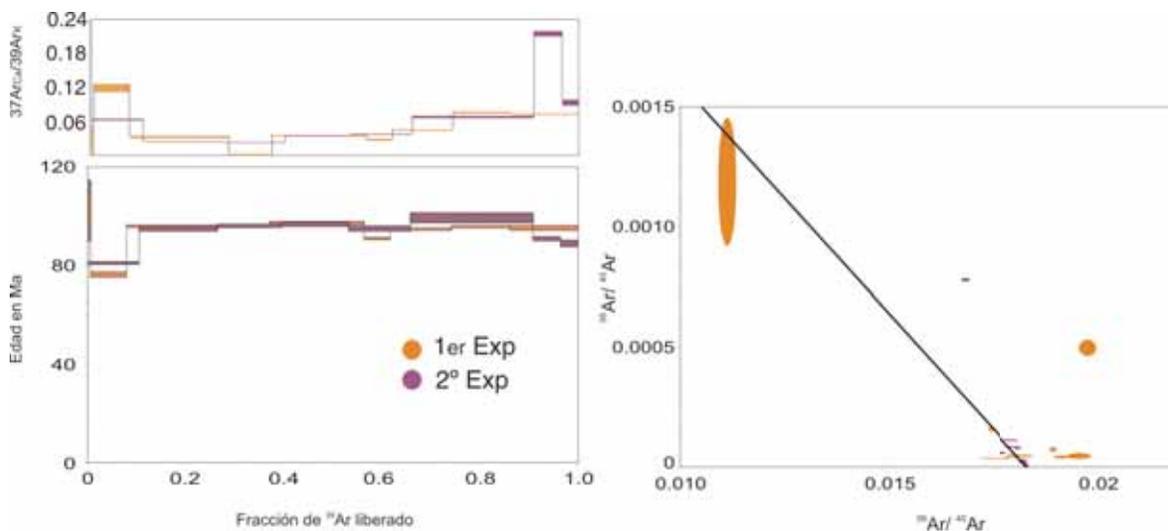
EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1 ^o	1.266E-03	19.27 ± 0.25	106.05 ± 1.37	15.594	11.41	88.59	2589.48



SD-25 (Biotita)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1°	1	0.22	0.0063	0.0063	102.30 ± 12.30	35.12	64.88	0.000
	2	0.50	0.0726	0.0789	76.26 ± 1.14	14.70	85.30	0.119
	3	0.83	0.2037	0.2825	96.09 ± 0.47	4.68	95.32	0.032
	4	1.00	0.0886	0.3712	95.98 ± 0.53	0.00	100.00	0.000
	5	1.35	0.1932	0.5644	97.30 ± 0.52	1.75	98.25	0.034
	6	1.70	0.0526	0.6170	90.89 ± 0.48	2.16	97.84	0.027
	7	2.30	0.1248	0.7418	94.79 ± 0.41	2.35	97.65	0.044
	8	3.00	0.1183	0.8600	95.73 ± 0.56	0.70	99.30	0.075
	9	6.00	0.1400	1.0000	95.32 ± 0.96	2.47	97.53	0.072
2°	1	0.50	0.1063	0.1063	80.81 ± 0.52	23.00	77.00	0.063
	2	0.70	0.1588	0.2651	94.80 ± 0.94	3.30	96.70	0.024
	3	0.90	0.1319	0.3970	96.04 ± 0.78	1.52	98.48	0.022
	4	1.10	0.1359	0.5330	96.68 ± 0.82	1.22	98.78	0.034
	5	1.30	0.1260	0.6590	94.96 ± 1.09	1.37	98.63	0.037
	6	2.10	0.2494	0.9084	99.18 ± 2.05	1.07	98.93	0.067
	7	3.00	0.0569	0.9653	90.71 ± 0.89	1.23	98.77	0.214
	8	6.00	0.0347	1.0000	88.80 ± 1.30	1.34	98.66	0.093

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1°	1.120E-02	17.08 ± 0.05	94.33 ± 0.41	0.048 3.48	96.52	8493.19	
2°	6.009E-03	17.10 ± 0.10	94.41 ± 0.65	0.055 4.03	95.97	7326.91	

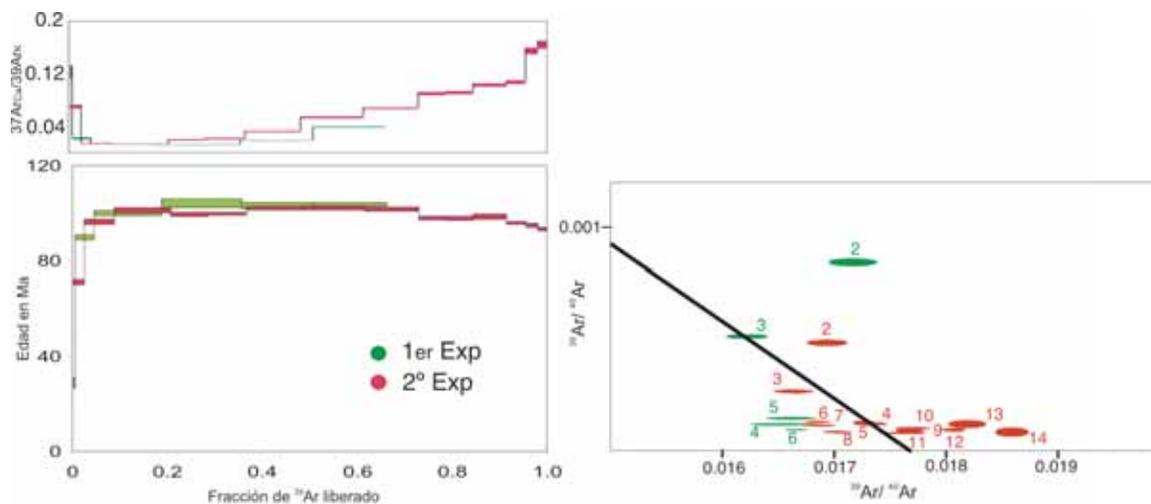


PB-32 (Biotita)

EXP	PASO	Pwr	F ³⁹ Ar	³⁹ Ar _{acum}	Edad (Ma)	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1°	1	0.33	0.0063	0.0063	28.91 ± 2.20	79.39	20.61	0.123
	2	0.60	0.0390	0.0452	89.76 ± 1.14	12.44	87.56	0.021
	3	1.10	0.1425	0.1878	99.97 ± 1.13	7.57	92.43	0.014
	4	1.30	0.1691	0.3569	104.10 ± 1.79	1.75	98.25	0.012
	5	1.50	0.1532	0.5100	103.20 ± 1.37	2.15	97.85	0.018
	6	2.00	0.1520	0.6621	103.70 ± 0.63	1.39	98.61	0.039
	7	5.00	0.3379	1.0000	46.11 ± 0.09	1.31	98.69	0.017
2°	1	0.50	0.0254	0.0254	71.45 ± 1.15	39.34	60.66	0.070
	2	0.80	0.0624	0.0878	96.28 ± 1.05	7.16	92.84	0.014
	3	1.00	0.1196	0.2074	101.30 ± 1.09	3.93	96.07	0.012
	4	1.20	0.0770	0.2844	99.43 ± 0.82	1.79	98.21	0.019
	5	1.40	0.0824	0.3668	99.75 ± 0.58	1.84	98.16	0.021
	6	1.60	0.1178	0.4846	102.10 ± 0.66	1.92	98.08	0.032
	7	1.80	0.1304	0.6150	102.20 ± 0.91	1.69	98.31	0.054
	8	2.00	0.1146	0.7296	101.70 ± 0.81	1.24	98.76	0.067
	9	2.20	0.0594	0.7891	98.02 ± 0.69	1.33	98.67	0.090
	10	2.40	0.0558	0.8449	97.72 ± 0.86	1.48	98.52	0.091
	11	2.80	0.0701	0.9149	98.49 ± 1.11	1.18	98.82	0.103
	12	3.20	0.0403	0.9552	95.90 ± 0.56	1.39	98.61	0.107
	13	3.70	0.0255	0.9807	94.90 ± 0.91	1.77	98.23	0.155
	14	6.00	0.0193	1.0000	93.39 ± 0.78	1.24	98.76	0.164

RESULTADOS INTEGRADOS

EXP	³⁹ Ar	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	Edad (Ma)	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	% ⁴⁰ Ar _{atm}	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1°	1.039E-02	14.97 ± 0.06	82.90 ± 0.45	0.020	4.00	96.00	7388.88
2°	7.465E-03	17.97 ± 0.05	99.09 ± 0.43	0.055	3.31	96.69	8919.93



Apéndice VII

Descripción de los Perfiles Sísmicos

PERFIL 15

Longitud ~100 km. En la línea aparecen dos afloramientos de basamento acústico (Monte Vaquero y Monte Obregón) que forman el límite Este de las cuencas Santa Cruz y Sobrero, respectivamente. A partir del Monte Obregón encontramos la falla principal que define el límite Oeste de la cuenca Farallón, que es la Falla San Martín.

En la zona Este de la sección se identifica la Dorsal de Farallón. Éste es el único perfil de los procesados para este trabajo que la corta, aquí nos vamos a limitar a mencionarla ya que no entra dentro de los objetivos de la tesis. Está limitada por escarpes tanto en la parte NW como en la SE, con una dirección aproximada de 033°.

En el Oeste de la sección se encuentra la cuenca Santa Cruz, que tiene un espesor aproximado de 1200 m. Es la única cuenca del trabajo que se encuentra al Oeste de las islas. Se observan fallas secundarias, probablemente activas, de tipo normal con vergencia hacia el Oeste. Únicamente aquí aparecen este tipo de fallas. En la parte inferior de la cuenca hay evidencias de un mayor contenido de gas. La cuenca está limitada en esta zona por el Monte Vaquero que forma el límite Sur del Banco de Santa Catalina. Éste se levantó a partir de la Falla Santa Catalina, que se encuentra situada en su parte Este y es una falla normal inactiva con buzamiento hacia el Este, que afecta al basamento. Después nos encontramos con la cuenca Sobrero, con un espesor aproximado de 700 m, está formada por dos unidades sismoestratigráficas, la unidad inferior está plegada y presenta fallas normales con buzamiento al Este, se observa un blanqueamiento de la estructura sedimentaria, sobre todo en las zonas de falla, que puede deberse a la presencia de gas; la unidad superior está formada por sedimentos depositados horizontalmente, no afectados por las fallas. El basamento, se infiere, que es de origen continental. El límite Este de la cuenca lo marca el Monte Obregón, que en su parte Este está definido por la falla San Martín. Esta falla es el límite Oeste de la cuenca Farallón, es una falla normal inactiva con vergencia hacia el Este, que afecta a nivel de basamento; y que podemos seguir en todos los perfiles

sísmicos que se encuentran hacia el Sur de este. En esta sección no se ha medido el salto de falla porque la resolución no es la adecuada.

La cuenca Farallón, está dividida en dos unidades sismoestratigráficas. La inferior está afectada por fallas normales secundarias y presenta un alto contenido en gas. La unidad sismoestratigráfica superior no se encuentra afectada por esta deformación. El basamento de la cuenca está formado principalmente por corteza oceánica (menos una pequeña parte al Este y centro de la cuenca que se ha identificado como basamento continental). Se observan sedimentos plegados debido a la intrusión de los sills (Rocchi, S., et al., 2007).

PERFIL 14

Longitud ~120 km. Tiene dos zonas de afloramientos principales, una al Oeste del perfil (Monte San Blas y Monte San Cristóbal), y otra zona en el límite Este (Los dos montes que forman el Macizo Farallón-Sur). Antes de llegar al segundo afloramiento de basamento acústico, en el depocentro de la cuenca se infiere que se encuentra la antigua zona de dorsal, que ahora se encuentra abandonada (aquí es donde encontramos el mayor espesor de sedimentos). La mayoría de las estructuras que aparecen en este perfil las encontramos también en los perfiles 12 y 13.

En la parte Oeste del perfil, al igual que ocurre en el perfil 15, se encuentra la cuenca Santa Cruz, de la cual establecemos el límite con la cuenca Sobrero a partir de los perfiles sísmicos, porque se observa una elevación del basamento acústico (que no llega a aflorar), que corresponde con la zona donde la Isla Santa Cruz se encuentra más próxima al Banco de Santa Catalina. En este caso la Falla Santa Catalina tampoco aflora y su salto es menor que en el caso de la línea 15. Hacia el este está la cuenca Sobrero, delimitada al este por el Monte San Cristóbal, que a su vez está limitado al Este por la Falla Las Pilas (Falla normal inactiva con vergencia hacia el Este, que aquí tiene un salto aproximado de 1700 m), que es la que controló el levantamiento de este bloque y, también la sedimentación en la cuenca

Las Ánimas que, en este punto, tiene un ancho aproximado de 3 km y un espesor aproximado de 2600 m. Al este de esta cuenca se encuentra el Monte San Blas, que está limitado al Oeste por la Falla Escondida (Falla normal inactiva con vergencia hacia el Oeste, es la conjugada de la falla Filo) y al Este por la falla San Martín, que aquí presenta un salto de ~ 600 m.

La cuenca Farallón presenta en esta línea su mayor espesor de sedimentos, aproximadamente 2000 m, que se corresponden con el depocentro de la cuenca. La parte de basamento acústico que se ha identificado como oceánica rodea a la antigua zona de dorsal, que es la que forma el depocentro de la cuenca.

El Macizo Farallón-Sur delimita la cuenca Farallón en su parte Oeste. También lo encontramos en los perfiles 12 y 13. Es el área que nos ha servido para establecer la identificación del basamento de naturaleza volcánica, ya que existe una muestra de una draga que nos dice que es un complejo volcánico silícico, en el que también podemos ver pequeños centros eruptivos en la parte superior (Peter Lonsdale, comunicación personal). El paquete sedimentario que nos encontramos por encima del basamento acústico se encuentra muy deformado y presenta evidencias de contenido en gas. Si observamos el resto de perfiles sísmicos vemos que el espesor de sedimentos aumenta hacia el Sur del área de estudio. En su límite NO se encuentra la zona de falla San Telmo, que lo separa de la cuenca Farallón, se trata de una serie de fallas inactivas con buzamiento hacia el nor-oeste, con dirección paralela a la dorsal de Farallón. También aparece la falla San Cosme entre los dos montículos que forman este complejo, es una falla normal con vergencia hacia el noroeste, la seguimos también en el perfil 13.

PERFIL 13

Longitud de ~90 km. Presenta tres afloramientos en la zona Oeste de la línea y en la zona Este vuelve a aparecer, como en el caso de la línea 14, el Macizo Farallón-Sur. Los

afloramientos de la parte Oeste corresponden a los límites de la cuenca Las Ánimas (que aquí presenta un ancho aproximado de 8 km), pudiéndose ver las mismas fallas. El otro afloramiento que se ve es una pequeña elevación de basamento en el borde de la cuenca Farallón.

Presenta las mismas características que el perfil 14, pero aquí encontramos la Falla La Víbora dentro de la cuenca Farallón, que es una falla normal con vergencia hacia el Este que afecta a nivel basamento.

PERFIL 12

Su longitud es de ~90 km. En esta línea se observan cinco afloramientos de basamento de Oeste a Este son: El Monte San Cristobal, el Monte San Blas, El Monte Prieto y el Monte Colorado, y el borde Oeste del banco del Macizo Farallón-Sur. Esta línea corta la parte sur de la cuenca Las Ánimas y, en este caso, la Falla Las Pilas tiene un salto de falla de ~ 700 m.

Es esta línea la que nos permite definir el basamento de naturaleza plutónica, ya que sobre el Monte San Blas se encuentra localizada la muestra DANA23a, que es un granito.

En la cuenca Las Ánimas se observa que ha habido un cambio en la dirección de depositación de los sedimentos, que en este momento están llegando a través de un arroyo al Oeste de la cuenca el cual arrastra sedimentos desde la cuenca de Santa Cruz y Sobrero que se encuentran a mayor altitud. En esta cuenca los montes actúan como trampa de sedimentos, por esto alcanzan este gran espesor, similar al que encontramos en el depocentro de la cuenca Farallón.

Otras estructuras que encontramos son el Monte Prieto y el Monte Colorado, que se infiere que pueden ser de naturaleza volcánica, porque las ondas son más penetrativas que en la corteza de naturaleza plutónica.

La falla El Venado, que es una falla normal inactiva con vergencia hacia el Este, aquí forma el límite Oeste de la cuenca Farallón y es responsable del levantamiento del Monte Colorado. Mientras que el límite Este de la cuenca lo forma la falla El Jaguar, que es una falla inactiva con vergencia hacia el Nor-oeste, que afecta a nivel de basamento. En esta falla se observa presencia de gas.

En esta línea identificamos por primera vez la cuenca Pescadero, en ella se diferencian dos unidades sismoestratigráficas, la inferior que presenta deformación frágil, con fallas normales que buzcan al Este, y alto contenido en gas; y la superior que no presenta fracturación y con menor contenido en gas. El basamento se infiere que puede ser de origen volcánico, como en el resto del Macizo Farallón-Sur

PERFIL 10

Su longitud es de ~ 70 km. A partir de esta línea la mayoría de las estructuras tienen la misma dirección que la falla transforme abandonada de Pescadero Norte (Ver Apéndice I).

Se observan tres afloramientos en la parte Oeste de la línea. El primer afloramiento, que pertenece a la parte más elevada de la cuenca, corresponde a la Depresión de Los Islotes.

En el límite SW de la cuenca Farallón. Los sedimentos se encuentran rellenando un paleorelieve, indicando que la sedimentación fue posterior al levantamiento del bloque. La acumulación de sedimentos en la parte central de esta zona se puede deber a los escarpes que forman el cierre de la cuenca, y a las corrientes que erosionan o impiden la deposición de los sedimentos cerca de los bordes.

Dentro de la cuenca Farallón encontramos dos fallas normales inactivas con vergencia hacia el Este, La falla El Coyote y la falla San Bernabé. También se continúa la traza de la falla La Víbora.

En la cuenca Pescadero identificamos la falla San Isidro, que es una falla normal inactiva con vergencia hacia el Este; y la falla transforme abandonada Pescadero Norte, que también se reconoce en la línea 8. Es una zona de fractura abandonada de aproximadamente 1.5 km, y que sólo afecta a la unidad sismoestratigráfica inferior de la cuenca Pescadero. Por encima de la unidad sismoestratigráfica afectada por esta falla transforme los sedimentos se han depositado en el espacio generado por la falla, en ellos no se observan señales de deformación.

El Macizo Farallón-Sur aparece en la parte Este del perfil.

PERFIL 9

Tiene una longitud aproximada de 10 km. Esta línea corre paralela a las estructuras por lo que nos aporta mucha información, identificamos en ella dos fallas que también identificamos en la línea 8.

Está casi situada completamente encima de la Depresión de Los Islotes. Los sedimentos de esta cuenca están depositados de forma horizontal, rellenando un paleorelieve.

El basamento acústico no se ve muy bien, puede deberse a problemas del procesado y/o a las zonas donde se superpone la múltiple. Pero se infiere que es de origen continental por su localización.

Se identifica la falla Espíritu Santo que Umhoefer et al., 2002 y Lonsdale, 1989, proponen como falla transforme activa, aunque en esta línea no se observa ninguna característica que lo confirme. El ancho de la zona de falla es de aproximadamente de 300 m., y su dirección sigue la dirección de la antigua transforme de Pescadero N. Se identifica también otra falla subparalela a la anterior, la falla La Cañada; que se correlaciona con otra situada en el perfil 8.

PERFIL 8

Este perfil tiene una longitud aproximada de 90 km y se localiza fuera de la cuenca Farallón por lo que sólo servirá de apoyo para correlacionar estructuras encontradas en el resto de los perfiles. El basamento acústico aflora entre los sedimentos abundantemente en la parte Oeste del perfil.

La primera cuenca que nos encontramos en el lado Oeste del perfil es la Depresión de Los Islotes, está compuesta por dos unidades estratigráficas. La unidad superior se encuentra en discordancia angular con la capas de sedimentos inferiores, que presentan deformación frágil; mientras que la unidad superior no la presenta. En las unidades superiores se infiere la presencia de gas porque los reflectores pierden la coherencia lateral. Se infiere que el basamento acústico encontrado es de tipo continental porque se observa un alto contraste de impedancias sobre un reflector muy continuo. El basamento también se encuentra fallado por fallas normales.

La falla Espíritu Santo, que se identifica como una zona de falla constituida por fallas normales de alto grado de aproximadamente 1 km de ancho, en esta línea se puede inferir que se trata de una falla normal con vergencia hacia el Este. Es la falla maestra de la Depresión Los Islotes ya que acomoda su deformación. Por debajo de la discordancia angular pintada de verde se observa que la falla estuvo activa porque es la que acomoda la deposición de los sedimentos en la cuenca, pero por encima de la discordancia puede que a

un cierto tiempo la falla se reactivara (marcarlo en la figura), por lo que en esta línea nuestra descripción coincide un poco más con la dada por Umhoefer et al., 2002, y Lonsdale, 1989. En el registro sísmico no alcanzamos a observar el límite con el basamento.

Dentro de la Depresión Los Islotes nos encontramos también la falla La Cañada que es una zona de falla normal inactiva con vergencia hacia el Este, con un ancho aproximado de 600 m; es la falla que controla la acomodación en esta zona de la cuenca. Y la falla Palo Blanco, que es una falla normal inactiva con vergencia hacia el Oeste.

Dentro de esta línea también se identifican las siguientes fallas que se correlacionan con las localizadas en perfiles anteriores. La falla El Coyote que estuvo activa hasta el tiempo donde se presenta la discordancia (pintada en verde). Y la falla La Víbora.

Uno de los afloramientos de basamento acústico que encontramos es el Banco Partida, que es un *horst* que se encuentra limitado por fallas normales, que han permitido su levantamiento. La falla más importante que encontramos es la falla Asunción que es la que controla, en este caso, la cuenca La Paz. Los sedimentos en esta cuenca se encuentran rellenando un paleorelieve. La cuenca posiblemente contiene gas porque se observa que la estructura sedimentaria está rota.

Otro de los afloramientos existentes es el Banco Largo. Está controlado en su lado W por la falla El Camaleón, que es una falla normal inactiva con vergencia hacia el Este. En el borde este del banco hay un pequeño canal actual, es decir una zona de erosión de sedimentos o donde no se han depositado debido a corrientes marinas.

Aquí, en la parte Este de la cuenca Pescadero la unidad sismoestratigráfica superior está afectada por fallas normales que vergen hacia el Este, y que afectan a casi todo el paquete sedimentario. También seguimos encontrando la falla transforme abandonada Pescadero Norte, que aquí tiene una anchura aproximada de 600 m.

PERFILES 20, 21, 22 Y 23

Estos perfiles se encuentran situados al N de la cuenca Farallón en el límite de la Falla Transforme de Farallón, y se han agrupado porque no siguen la misma historia de evolución que el resto de la cuenca, si no que tienen que ver con fases de apertura más tardías, ya que siguen los lineamientos de direcciones de aproximadamente 30° que encontramos en las islas.

La cuenca del Fresno se reconoce en todos los perfiles. El basamento acústico está formado por basamento continental que contiene algunas fallas normales inactivas con buzamiento hacia el E. Se divide en dos unidades sismoestratigráficas separadas por una discordancia angular. La unidad inferior contiene fallas secundarias normales con buzamiento hacia el Este y con alto contenido en gas, mientras que la unidad superior no.

En la línea 20 aparece la falla Vista-Bella que es una falla normal con buzamiento hacia el E que forma el escarpe de la cuenca Farallón. En la línea 23 se encuentra la falla Morrito, también es una falla normal con buzamiento hacia el Este que representa el Escarpe de la cuenca Farallón, pero no tiene continuidad con la falla Vista-Bella. Esta falla limita al Monte Valverde que está formado por basamento de naturaleza continental. La falla Vista-Bella forma también el límite Este de un bloque de naturaleza continental, el Monte San Fernando.

En todos los perfiles se ha podido establecer de una forma bastante confiable el límite entre basamento de naturaleza continental y basamento de naturaleza oceánica.

Apéndice VIII

Perfiles Sísmicos Interpretados

