

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología**

**Correlación de unidades volcánicas y sedimentarias de Isla
Ángel de la Guarda y de la región de Calamajué; estimación del
desplazamiento a través del Canal de Ballenas**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Sebastián Jurado Hernández

Ensenada, Baja California, México
2020

Tesis defendida por

Sebastián Jurado Hernández

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Jesús Arturo Martín Barajas

Director de tesis

Dr. Bodo Weber

M.C. Alejandro Hinojosa Corona

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo



Dr. Efraín Gómez Arias

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Sebastián Jurado Hernández © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Sebastián Jurado Hernández** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología.

Correlación de unidades volcánicas y sedimentarias de Isla Ángel de la Guarda y la región de Calamajué: estimación del desplazamiento a través del Canal de Ballenas.

Resumen aprobado por:

Dr. Jesús Arturo Martín Barajas
Director de tesis

La falla transformante Canal de Ballenas (FCB) es actualmente el límite principal entre las placas Pacífico y Norte América, pero antes de hace aprox. 2-3 Ma la principal deformación ocurría en las fallas Tiburón y De Mar que bordean la cuenca Tiburón. A fines del Plioceno éstas últimas disminuyeron su actividad y la deformación se transfirió a la zona del Canal de Ballenas y se generó la apertura de la cuenca Delfín Inferior. Isla Ángel de la Guarda (IAG) fue capturada por la placa de Norte América y desde entonces presenta un movimiento relativo hacia el SE desde el margen peninsular. La estratigrafía de la región de Calamajué aporta información del desplazamiento a través de la FCB y de la deformación del margen peninsular. El registro estratigráfico de Calamajué consiste en dos secuencias volcano-sedimentarias. La inferior es pre-extensional y tiene en la base arcosas líticas con una edad de máxima depositación de ~28 Ma (U-Pb, circones detríticos), y sobreyacen discordantemente al basamento cristalino. Una toba riolítica y lavas máficas a intermedias representan la actividad del arco Comondú en la península. Una lava andesítica dio una edad de enfriamiento de 18.9 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hbl), y aunque el volcanismo de ambas secuencias es de afinidad calcoalcalina, en la secuencia inferior se documentó flujos de lava basáltica ligeramente alcalina y enriquecida en elementos de tierras raras ligeras (La/Sm ~20). La secuencia superior sobreyace en discordancia angular y erosional a la secuencia inferior, y consiste en depósitos de conglomerado aluvial con lapillitas de pómez interestratificadas, de composición intermedia a félsica. Estas tefras se interpretan como depósitos piroclásticos de caída libre de facies medias a distales. La tefra inferior (Ptp1) dio una edad de enfriamiento de 2.6 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hbl). En la zona central de IAG afloran unidades de correlación a través del Canal de Ballenas, ahí se encontraron depósitos aluviales con capas de lapilli similares a los depósitos plio-pleistocénicos de Calamajué. Estos presentan similitud geoquímica de óxidos mayores y elementos traza. La presencia de los mismos depósitos en ambas regiones acota el desplazamiento finito de la FCB en ~100 km en los últimos 2.6 Ma. Adicionalmente el análisis de paleocorrientes en la secuencia superior indica una inversión de oriente a poniente en la dirección de transporte por arriba de esta lapilita. Se interpreta que la activación de la falla Canal de Ballenas generó una respuesta isostática y el levantamiento en el margen peninsular que ocurrió después de los ~2.6 Ma.

Palabras clave: Calamajué, Falla Canal de Ballenas, Isla Ángel de la Guarda, arco Comondú.

Abstract of the thesis presented by **Sebastián Jurado Hernández** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth's Sciences with orientation in Geology.

**Volcanic and sedimentary units correlation of Isla Angel de la Guarda and the Calamajue region:
estimation of displacement through the Canal de Ballenas.**

Abstract approved by:

Dr. Jesús Arturo Martín Barajas
Thesis director

The Canal de Ballenas transform fault is currently the tectonic boundary between the Pacific and North American plates. However, before ~2-3 Ma the main deformation occurred in the Tiburon and De Mar faults which border the Tiburon basin. In Plio-Pleistocene time the main deformation was transferred to the Canal de Ballenas fault and the Lower Delfin basin was opened. Isla Angel de la Guarda was captured by the North American plate, and it now move to the SE relative to San Luis Gonzaga and Calamajue region in NE Baja California. The stratigraphy of Calamajue region provides information about the displacement through the Canal de Ballenas fault and regarding the deformation effects on the peninsular margin. The stratigraphic record of Calamajue consists in two volcano-sedimentary sequences. The lower sequence is pre-extensional and has lithic arkoses at the base with a maximum deposition age of 28 Ma (U-Pb, detrial zircons) and unconformably overlies the crystalline basement. A rhyolithic tuff and mafic to intermediate lava flows and domes represent the activity of the Comondú arc in the Peninsula. An andesitic lava was dated in 18.9 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hbl). The upper sequence discordantly overlies the lower sequence in erosional and angular disconformity. The former consists of sandy to boulder alluvial conglomerate with four interbedded lapillistone deposits. These tephra layers are from 0.8 to 5 m-thick, and varies from rhyolite, dacite and andesite composition, and are interpreted as medial to distal air-fall pyroclastic deposits of medial to distal facies likely sourced from the east in the Canal de Ballenas and/or the Lower Delfin Basin. The lowermost tephra (Ptp1) is rhyolite pumice which yield a cooling age of 2.6 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hbl). The volcanism of both sequences is calcalkaline, but the lower sequence also has lightly alkaline basalt flows enriched in light rare earth elements (La/Sm ~20). Correlative Pliocene tephra layers are found in the west central Isla Angel de la Guarda (IAG) and have have similar stratigraphic and lithologic characteristics, as well as similar major oxides and equivalent trace elements geochemistry. Correlation of these deposits in both regions constrain the finite displacement of the Ballenas Transform fault in ~100 km of offset in the last ~2.6 Ma. In addition, the paleocurrent analysis in the upper sequence indicates an inversion from east to west in the direction of sediment transport and exhumation of the late Pliocene alluvial basin. It can be interpreted that the activation of the Canal de Ballenas fault zone produced an isostatic response and uplift of the peninsular margin after ~2.6 Ma.

Keywords: Calamajue, Canal de Ballenas fault, Isla Angel de la Guarda, Comondu arc.

Dedicatoria

A mis padres María Esther y Mario Alberto.

A mi hermano Alberto.

A mi tía Blanca, por tanto amor que nos regalaste.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante mi maestría.

Un agradecimiento especial al Dr. Arturo Martín Barajas, mi director de tesis, por ser un gran profesor y guía en todo este proceso, además de ser un gran amigo.

A mis sinodales Alejandro Hinojosa, Bodo Weber y Rodrigo Méndez por su disponibilidad para las reuniones y las revisiones del trabajo, además de sus comentarios valiosos que ayudaron a mejorarlo.

A Gabriel Rendón Márquez por su ayuda con la petrografía y su disponibilidad y atención. A Víctor Pérez Arroyo por la elaboración de las láminas delgadas. A Ángela Susana Rosas Montoya por su ayuda en la separación de minerales. A Víctor Manuel Frías por ayudar con la impresión de los mapas utilizados para el trabajo de campo. A Luis Carlos Gradilla Martínez por realizar la catodoluminiscencia de los circones y prestar material para campo. En general agradezco a todo el cuerpo técnico de Ciencias de la Tierra por ser un pilar irremplazable del departamento.

A la Dra. Margarita López por la ayuda con los análisis geocronológicos Ar-Ar. A Enrique Íñiguez y los trabajadores del laboratorio de análisis de roca de CeMIEGeo por los análisis de FRX. A la M.C. Ofelia Pérez Arvizu y al laboratorio ultralimpio e ICP-MS de CGeo UNAM por los análisis de elementos traza. Al Dr. Dirk Frei y al Dr. Bodo Weber por los análisis U-Pb de circones. A la Dr. Joann Stock y al Dr. Chi Ma por los análisis de microsonda electrónica.

A Ricardo Arce Navarro y su equipo de trabajo de Ricardos Diving Tours por sus servicios de panga para realizar el trabajo de campo en la Isla Ángel de la Guarda y en la costa de Calamajué.

Agradecimiento especial a mis amigos y compañeros de campo: Javier Hernández, Armando Rocha y Martín Pacheco Romero. Esperemos que la vaca esté en un mejor lugar.

A todos mis compañeros y amigos de CICESE y de Ensenada. En especial a Brenda, Gabi, Rocío, Eliana, Trejo, Young Ho, Halia, Fabián, Liza, Miguel Ángel y Memo.

A todos los Jurado Montelongo y los Hernández Garza. Los quiero a todos y espero verlos pronto.

A mi compañera que me acompañó y me apoyó durante este proceso, Abigail, te quiero muchísimo.

A mis amigos de la licenciatura: Edson, Manuel, Jorge, Saira, Gisela, Nallely, Merino, Rodrigo, Mayra, Tito, Rolando, Pingu, Richi, Clark, Tony y Lalo.

A mis amigos de Monterrey: José Luis, Jannet, Mario y Bil.

A mis amigos siempre presentes Ramón Alejandro de la Cruz Ruíz y Eduardo Ríos Ochoa.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Marco geológico y tectónico regional.....	1
1.1.1. Historia Pre-batolítica y subducción de la placa Farallón	1
1.1.1. Fin de la subducción en la PBC.....	1
1.1.2. Inicio de la extensión continental en el noroeste de México	2
1.2. Planteamiento y justificación	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
Capítulo 2. Metodología.....	5
2.1. Trabajo de campo.....	5
2.2. Cartografía.....	5
2.2.1. Imágenes de color verdadero de Google Earth Pro	6
2.2.2. Imagen de falso color de imágenes espectrales Sentinel 2	7
2.2.3. Modelos digitales de elevación	8
2.3. Geología estructural.....	8
2.3.1. Datos estructurales	8
2.3.2. Secciones geológicas y columna estratigráfica	9
2.4. Petrología y geoquímica.....	9
2.4.1. Análisis por microsonda de electrones (EPMA)	9
2.4.2. Análisis geoquímicos por fluorescencia de rayos X.....	10
2.4.3. Análisis geoquímico de elementos traza por ICP-MS.....	12
2.5. Geocronología	12
2.5.1. Datación por método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	12
2.5.2. Datación por método U-Pb	13

Capítulo 3. Resultados	15
3.1. Imagen de falso color	15
3.2. Modelo digital de elevación	15
3.3. Cartografía.....	17
3.4. Estratigrafía	19
3.4.1. Secuencia inferior (Pre-rift)	19
3.4.2. Secuencia superior (Sin-Rift)	24
3.5. Geocronología	27
3.5.1. Método Ar-Ar	27
3.6. Método U-Pb.....	30
3.7. Análisis estructural	31
3.7.1. Análisis de fallas	32
3.7.2. Análisis de datos de estratificación	33
3.7.3. Análisis de foliación metamórfica	36
3.7.4. Análisis de paleocorriente.....	37
3.8. Secciones geológicas	38
3.9. Geoquímica de elementos mayores.....	42
3.10. Geoquímica de elementos traza	45
3.11. Correlación de unidades volcánicas de Calamajué e Isla Ángel de la Guarda	47
3.11.1. Geoquímica de vidrio volcánico y roca total en lapillitas	48
3.11.2. Diagramas ternarios de plagioclasas	53
3.11.3. Diagramas ternarios de piroxenos	54
Capítulo 4. Discusión.....	56
4.1. Cronoestratigrafía y deformación	56
4.2. Composición del volcanismo	59
4.3. Análisis de la Cuenca Calamajué	62
4.4. Correlación de unidades con la Isla Ángel de la Guarda	63
Capítulo 5. Conclusiones	69
Literatura citada.....	71
Anexos.....	76

Lista de Figuras

Figura	Página
1 Reconstrucción tectónica del N del Golfo de California desde 11 Ma atrás a la actualidad. PVP, Provincia Volcánica de Puertecitos; SLG, San Luis Gonzaga; Cal, Calamajué; IAG, Isla Ángel de la Guarda; BLA, Bahía de los Ángeles; IT, Isla Tiburón. Tomado y editado de Bennett et al. (2016).....	3
2 Imagen de falso color del área de estudio con los recorridos en campo (líneas rojas). En el mapa inserto el polígono verde es el área de estudio; el polígono café es cuenca central de la Isla Ángel de la Guarda.....	6
3 A Imagen de falso color SWIR2-NIR-B de Sentinel con las bandas 12, 8 y 2 en RGB respectivamente. 1B Mapa litológico de la zona de estudio que incluye la cartografía realizada en este trabajo y la definición de las unidades catografiables. Notar que los depositos sedimentarios recientes Qa1, Qa2 presentan la coloración dominante de la fuente de aporte local.....	16
4 Modelo digital de elevación (MDE) elaborado con imágenes del satélite Pleiades 2 sobrepuesto a hillshade y curvas de nivel cada 20 m, con curvas maestras cada 100 m. Recuadro superior derecho muestra la ubicación del MDE (polígono azul) dentro del área de estudio (polígono rectangular). La cresta que conecta las sierras Calamajué y La Asamblea constituye el parteaguas moderno y es debido a la exhumación de la cuenca aluvial con la secuencia superior. Cal, Calamajué; SLG, San Luis Gonzaga.....	17
5 Mapa geológico de la región de Calamajué en el NE de Baja California. En la zona central domina la secuencia de conglomerado aluvial Ps3 que contiene tefras del Plioceno tardío correlacionables con depósitos similares en Isla Ángel de la Guarda. Las terrazas Os4 corresponden a la inversión de la cuenca y el cambio en la dirección de transporte aluvial hacia el oeste y norte. El Anexo E contiene el control de muestras colectadas.....	18
6 Columna estratigráfica simplificada de la cuenca Calamajué. Comprende dos secuencias mayores separadas por una discordancia angular. La secuencia inferior se considera pre-rift y contiene los depósitos volcánicos y sedimentarios correlacionables con el volcanismo del arco Comondú del Mioceno Temprano.....	22
7 Fotografías de campo de la secuencia inferior. a) Arenisca arcósica Os subyace a la toba riolítica rosada Otr; b) Estratificación cruzada hamacada en Ms1 que subyace discordantemente a la brecha basal de un flujo de lava andesítica Ma1; c) Facies conglomeráticas de Ms1 rica en líticos volcánicos redondeados; d) Vista panorámica de la Cuenca Calamajué (Ps3) vista hacia el este a sureste. Se observa la lava Ma1 en colinas que separan a la CC del Golfo de California. Al fondo el basamento Pzm de la	23

	Sierra La Asamblea; e) Afloramiento de un flujo de andesita Ma1 con diaclasa horizontal pervasiva y fracturas y fallas subverticales rellenas de calcita; f) Domo de lava andesítica Md que posiblemente sobreyace al basamento.....	
8	Fotografías de campo de la secuencia superior: a) Clastos imbricados de lava andesítica (Ma1) en la unidad Ms2 mostrando un transporte señalado por flecha roja; b) Conglomerados clastosoportados de Ps3 mostrando imbrincación de clastos; c) Lapilitas interestratificadas en Ps3 cortadas por fallas normales; d) Relación de corte y relleno en la secuencia Ps3. Ptp2 y Ps3 están erosionados por un canal y rellenos por Ptp4. Esta última a su vez se encuentra parcialmente erosionada y el corte esta relleno por conglomerados arenosos de la misma unidad (lado derecho de la fotografía).....	26
9	Geocronología de la unidad Ma1 (Cal17-19). a) Gráfico definiendo una edad de meseta de 18.8 ± 0.1 Ma en cuatro pasos consecutivos. b) Gráfico de $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para definir una isócrona inversa. La edad de 18.9 ± 0.1 Ma se obtuvo con los experimentos 1-5 a 1-10. La clave corresponde al paso al que pertenece cada dato. Los gráficos y la incertidumbre de la edad están representados en error 2σ	28
10	Geocronología de la unidad Ptp1 (Cal17-13; hb). a) Gráfico de meseta dónde se grafican dos experimentos. La edad la definen los datos del segundo experimento (rojo). b) Gráfico de $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ con los pasos utilizados para estimar la isócrona. Las claves indican el experimento seguido del paso al que corresponden. Los gráficos y la incertidumbre de la edad están representados con error 2σ	29
11	a) Histograma y curva de probabilidad de la edad de los zircones detríticos de la arcosa lítica Os. b) Curva de concordia para la misma muestra de la unidad Os.....	31
12	a) Histograma y curva de probabilidad de los zircones detríticos para la unidad Ms1. b) Curva de concordia para la unidad Ms1.....	31
13	Estereogramas de planos y polos de fallas separados por zonas estructurales y secuencias estratigráficas.....	34
14	Estereogramas con planos y polos de estratificación separados por zonas estructurales y secuencias estratigráficas. Se indican los datos de azimuth e inclinación promedios en cada estereograma.....	35
15	Estereogramas de foliaciones metamórficas de Pzm en la región de Calamajué. SSF, Sierra San Francisquito; SC, Sierra Calamajué; SLA, Sierra La Asamblea.....	36
16	Mapa de paleocorriente de la Cuenca Calamajué. Se muestran rosetas de dirección de imbricación de clastos para las unidades Ms2, Ps3 y Ps4.....	38

17	Secciones geológicas de la región de Calamajué.....	41
18	Diagramas para clasificación de rocas volcánicas. a) Diagrama de TAS (SiO ₂ vs álcalis total; Le Bas et al., 1986) y b) Diagrama de K ₂ O vs SiO ₂ (Peccerillo y Taylor, 1976). Se grafican las rocas volcánicas de Calamajué analizadas por FRX en roca total.....	43
19	Diagrama AFM para la clasificación de rocas volcánicas subalcalinas (Irvine y Baragar, 1971).....	43
20	Diagramas de Harker de SiO ₂ vs óxidos mayores de rocas volcánicas de la región de Calamajué.....	44
21	Aracnigrama de distribución de elementos traza de rocas volcánicas de la región de Calamajué nomalizados a los valores de manto primitivo de Pierce (1983) y diagrama de distribución de tierras raras normalizadas a los valores de condrita (Sun y McDonough, 1989).....	46
22	Grado de fraccionamiento de los elementos de tierras raras (ETR). a) Fraccionamiento de ETR totales; b) Fraccionamiento de ETR ligeras; c) Fraccionamiento de ETR pesadas.....	46
23	Diagrama TAS (Total de alkalis vs SiO ₂) de lapillitas del Plio-Pleistoceno de IAG y Cal. Arriba diagrama de composición de vidrio volcánico de lapillitas con punto rojo promedio para cada unidad; Abajo diagrama de composición de roca total de lapillitas.....	50
24	Diagramas de Harker de SiO ₂ vs óxidos mayores de lapilitas en la región de Cal (color verde) y la cuenca central de IAG (color naranja) analizados por microsonda (EPMA) en vidrio volcánico (izquierda) y por FRX en roca total (derecha).....	51
25	a) Distribución de elementos traza normalizadas a los valores de manto primitivo (Pierce, 1983). b) Distribución de tierras raras normalizadas a los valores de condrita (Sun y McDonough, 1989). Se separan en unidades potencialmente correlacionables.....	52
26	Diagrama de clasificación de plagioclasas de Ribbe (2018) con base en su contenido de K, Na y Ca. Or, Ortoclasa (100% de K); Al, Albita (100% de Na); An, Anortita (100% de Ca); Cal, Calamajué; IAG, Isla Ángel de la Guarda.....	54
27	Diagrama ternario para clasificación de piroxenos con base en su contenido de Ca, Mg y Fe (Morimoto, 1988). Wo: Wollastonita (100% de Ca); En, enstatita (100% de Mg); Fs, Ferrosilita (100% de Fe); Cal, Calamajué; IAG, Isla Ángel de la Guarda.....	55

28	Diagramas multielementales y de REE de las lavas basálticas Mb de la región de Calamajué comparadas con dos lavas alcalinas de la Provincia Volcánica de Puertecitos (PVP). Nótese la diferencia entre las concentraciones de elementos trazas y REE de Cal18-11 (basalto subalcalino) con Cal19-4 (basalto alcalino), y el enriquecimiento de REE ligeras de ésta última muestra y de los basaltos alcalinos de la PVP. 1Martín-Barajas et al. (1995).....	60
29	a) Aracnigrama de elementos traza de dos lavas andesíticas en la cuenca central de la Isla Ángel de la Guarda (IAG) y el domo de lava andesítico Md en la región de Calamajué (Cal); b) Concentración de REE normalizadas a condrita para las mismas unidades.....	65
30	Mapa de la porción noroccidental de la PBC mostrando el desplazamiento estimado de la Isla Ángel de la Guarda con respecto a la península a través de afloramientos de la Toba de San Felipe y las lapilitas reportadas en este trabajo (editado de Stock et al., 2018). 1Polígono de la cuenca central de IAG estudiado por Cavazos-Álvarez (2015) y Hernández-Ramos (2018). 2Polígono del área de estudio del presente trabajo.....	68

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Tabla de características de las bandas espectrales de Sentinel 2.....	7
2	Relación de muestras analizadas por FRX, EPMA e ICP-MS	11
3	Grados de fraccionamiento de ETR normalizados a los valores de condrita (Sun y McDonough, 1989) de las lavas analizadas para este trabajo y dos lavas analizadas por Martín-Barajas et al. (1995) en la Provincia Volcánica de Puertecitos (PVP).....	47

Capítulo 1. Introducción

1.1. Marco geológico y tectónico regional

1.1.1. Historia Pre-batolítica y subducción de la placa Farallón

El basamento de la región de Calamajué fue descrito por Campbell y Crocker (1993) y reportan unidades metavolcánicas y metasedimentarias de la facies de esquistos verdes, cuyos protolitos corresponden a rocas volcánicas y sedimentarias de edad Proterozoico Tardío y Paleozoico. Durante este tiempo la porción NE de la Península de Baja California (PBC) se encontraba sumergida en una transición entre ambiente de talud continental y planicie abisal de margen pasivo, con facies miogeoclinales y de fondo marino, respectivamente (Gastil, 1993). Griffith y Hoobs (1993) fecharon un intrusivo de composición granítica que corta a estas unidades metamórficas. El intrusivo tiene una edad de cristalización de ~100 Ma (U/Pb en zircones) y claramente corresponde a un cuerpo del Cinturón Batolítico Peninsular, el cual aflora a lo largo de aproximadamente 800 km de longitud y corresponde a las raíces de un arco magmático del Jurásico Tardío – Cretácico Temprano producto de la subducción de la placa Farallón bajo la placa de Norte América (Schmidt et al., 2002).

1.1.1. Fin de la subducción en la PBC

La última etapa de la subducción de la placa Farallón, y las microplacas Guadalupe y Magdalena bajo la placa de Norte América, generó actividad volcánica en la PBC. Los depósitos volcánicos y sedimentarios del Oligoceno Tardío al Mioceno Medio forman un registro continuo de 1 a 2 km de espesor en Baja California Sur que se conoce como Grupo Comondú (Hausback, 1984, Umhoefer et al., 2001). En el norte, los afloramientos de esta actividad volcánica son discontinuos y están conformados por secuencias de rocas volcanosedimentarias (Stock y Lee, 1994; Martín et al., 2000; Umhoefer et al., 2001). El fin de la subducción de los remanentes de la placa Farallón se presentó hace ~12 Ma, que es la edad de la anomalía magnética más joven confirmada en la microplaca Guadalupe (Lonsdale, 1991). No obstante, la dorsal Pacífico-Guadalupe alcanzó la trinchera hace ~15 Ma debido al proceso de subducción (Lonsdale, 1991). Ferrari (2004) propone que la placa en subducción se rompió producto de su propio peso, creando una ventana astenosférica y una diversificación de la fuente del magmatismo en la PBC. Fletcher y colaboradores (2007) sugieren que hace ~12.5 Ma la anomalía térmica que operaba bajo la dorsal Pacífico-Farallón migró al oriente, hospedándose en la ventana astenosférica creada por la ruptura de la losa

subducida. La nueva ubicación de la anomalía térmica debilitó la corteza continental dando origen a la apertura del Golfo de California, ubicando aquí el nuevo límite de placas dominado por un movimiento lateral derecho con componente extensional (Curry y Moore, 1984; Stock and Hodges, 1989).

1.1.2. Inicio de la extensión continental en el noroeste de México

Durante el Mioceno Medio el régimen tectónico en el noroeste de México, pasó a ser de tipo compresivo a extensivo triaxial (Nieto-Samaniego et al., 1997). La extensión temprana en esta región corresponde al proceso llamado “basin and range” (23-15 Ma), desarrollándose como un modo de rift amplio ó “wide rift”, exhumando porciones de la corteza media por medio de fallas de bajo ángulo que expusieron rocas de la corteza media y/o inferior en los “metamorphic core complex” en el noroeste de Sonora (Nourse et al., 1994; Vega-Granillo et al., 1996). En la región del Golfo de California el registro de la extensión temprana corresponde a un rift angosto o *narrow rift* (Lizarralde et al., 2007) y fue de tipo transtensional. Progresivamente, ésta deformación generó zonas de cizalla lateral y penetró la litósfera continental, definiendo el nuevo límite entre las placas Pacífico y Norte América.

El inicio de la deformación transtensiva se estima entre 9 y 7 Ma (Gans, 1997; Seiler et al., 2010; Bennet et al., 2014; Oskin et al., 2001) y la edad de la primera incursión marina en el norte del Golfo se estima en 6.5 Ma (Umhoefer et al., 2018; otros). Algunos estudios reportan una edad más antigua para el inicio de la extensión en Baja California. En Laguna Salada, datos de termocronología indican edades de exhumación del bloque cristalino de la falla Cañada David entre 15 y 10 Ma (Axen et al., 2000). Delgado-Argote y colaboradores (2000), en la región de Bahía de los Ángeles, reportan secuencias sedimentarias y relaciones estructurales que indican el inicio de la extensión antes de los 12 Ma. En la zona centro oeste de Isla Ángel de la Guarda, Hernández-Ramos (2018) reporta evidencias de extensión entre 12 y 16 Ma. Además, muestras de pozos profundos de PEMEX reportan edades relativas del Mioceno Medio al Mioceno Tardío en los sedimentos marinos que rellenan las cuencas Consag y Tiburón (Helenes y colaboradores, 2009). Estos reportes constituyen las evidencias de extensión continental más antiguas en la región del Golfo de California y la PBC.

Durante el Plioceno, las fallas con desplazamiento lateral derecho De Mar y Tiburón acomodaron la mayor parte del desplazamiento relativo entre Sonora y Baja California (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007), pero estas zonas de cizalla se abandonaron a fines del Plioceno y activó la zona de FCB, como indican

edades de enfriamiento en el margen oeste de la Falla Canal de Ballenas (FCB), que sugieren un levantamiento del margen peninsular de Bahía de los Ángeles (BLA en Figura 1d) hace ~ 2 Ma (Seiler et al., 2009). Esto ocasionó la captura del bloque continental IAG a la placa de Norte América y el desplazamiento relativo al SE de IAG, lo que también abrió la cuenca Delfín Inferior (**Figura 1**)

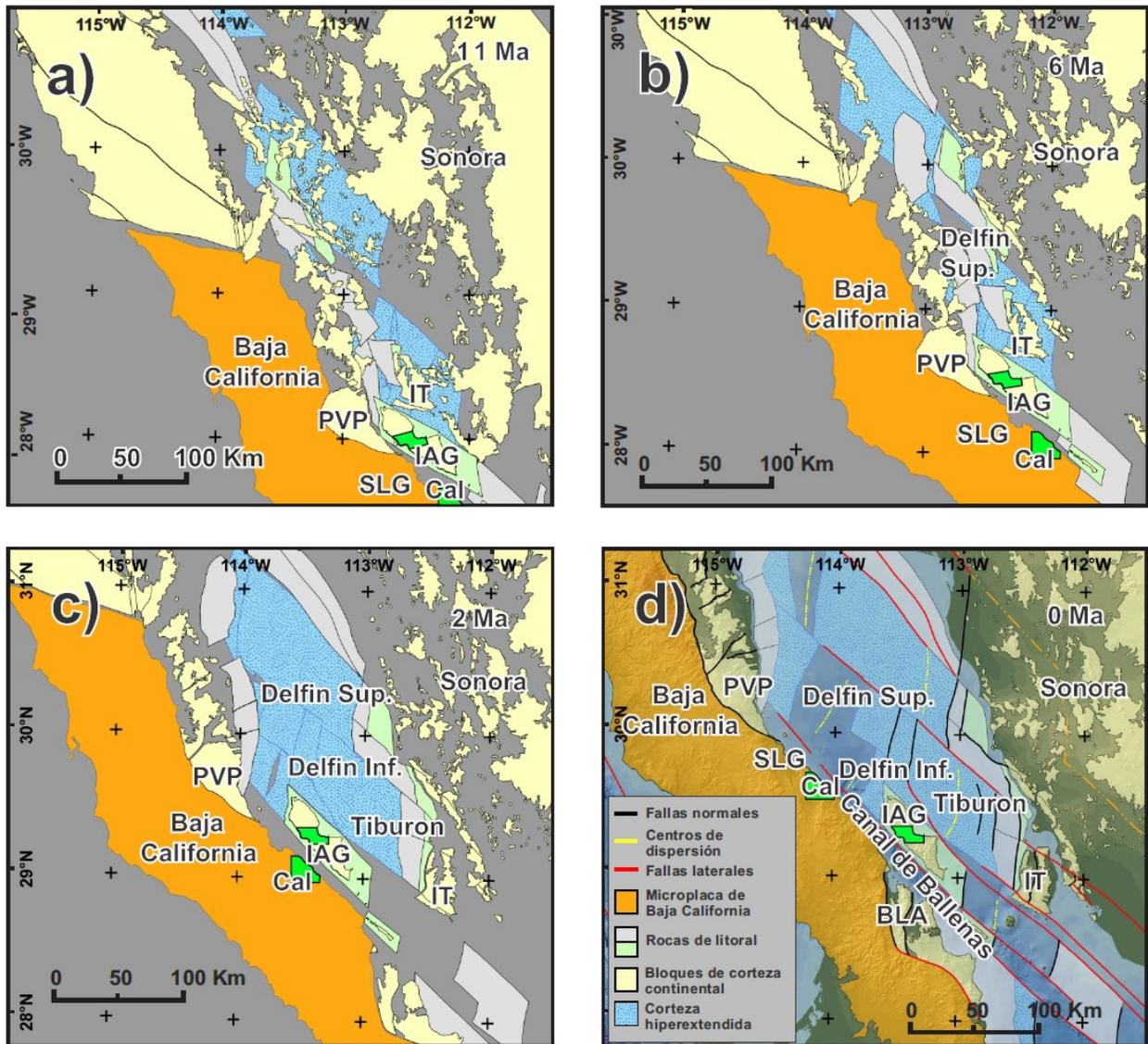


Figura 1: Reconstrucción tectónica del N del Golfo de California desde 11 Ma atrás a la actualidad. PVP, Provincia Volcánica de Puertecitos; SLG, San Luis Gonzaga; Cal, Calamajué; IAG, Isla Ángel de la Guarda; BLA, Bahía de los Ángeles; IT, Isla Tiburón. Tomado y editado de Bennett et al. (2016)

1.2. Planteamiento y justificación

El área de Calamajué (Cal) se ubica en la porción centro oriental de la PBC, ~ 80 km al noroeste de Isla Ángel de la Guarda (IAG), en un sector del litoral con forma lineal asociada a la cizalla de las fallas al norte del Canal de Ballenas. El registro estratigráfico de la zona contiene una secuencia aluvial del Plio-Pleistoceno similar a una secuencia reportada en la cuenca central de la Isla Ángel de la Guarda por Cavazos-Álvarez (2015) y Hernández-Ramos (2018), por lo que una correlación de unidades litológicas a través de ambas zonas permitiría acotar el desplazamiento de la FCB.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar el estudio geológico estructural de la cuenca Calamajué con el fin de ubicar unidades de correlación con la porción centro-occidental de la isla Ángel de la Guarda y acotar el desplazamiento finito de la FCB. Además, se hará un análisis estratigráfico y de paleocorrientes de las unidades del Plio-Pleistoceno para determinar el tiempo en que ocurrió la exhumación de la cuenca aluvial de Calamajué.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar la cartografía geológica-estructural del área de Calamajué
- Realizar fechamiento isotópico por el método Ar-Ar para conocer edades de erupción de rocas volcánicas representativas.
- Realizar fechamiento isotópico por el método U-Pb en circones detríticos para conocer la procedencia de sedimentos y su edad de máxima depositación.
- Realizar el estudio petrológico (petrografía y geoquímica de óxidos mayores y trazas) para caracterizar el vulcanismo de la zona y hacer una comparación de las unidades potencialmente correlacionables en Calamajué e Isla Ángel de la Guarda.

Capítulo 2. Metodología

Se utilizaron herramientas cartográficas de gabinete con fotografía de imágenes de satélite y se realizaron reconocimientos de campo y cartografía de detalle de las zonas accesibles. Se colectaron datos estratigráficos y muestras representativas para estudios petrológicos y geocronológicos. Las principales técnicas utilizadas se describen a continuación.

2.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en la ubicación de contactos y descripciones litológicas, recolección de muestras de rocas y de datos estructurales y estratificaciones. Se hizo descripción de los afloramientos tomando en cuenta tipo de roca, mineralogía, coloración, textura, entre otras características, y se tomaron puntos con un GPS marca Etrex para su importación al mapa de ArcGis y facilitar la traza de los contactos geológicos. También se tomó registro fotográfico de los afloramientos y contactos geológicos importantes, dónde se usaron escalas para estimar espesores de las capas y tamaño de las estructuras. Los datos estructurales y estratificaciones se midieron con brújula y se expresan en este trabajo en grados azimutales.

Se realizaron tres campañas de ~8 días efectivos de campo cada una en 2017, 2018 y 2019 (Figura 2). Adicionalmente, en abril del 2018 se realizó una campaña a Isla Ángel de la Guarda para el reconocimiento de unidades en la cuenca central (Recuadro dentro de Figura 2) que son tentativamente correlacionables con las unidades en el área de Calamajué. Las campañas del 2017 y 2019 llegó al área de estudio por tierra y en la campaña del 2018 se abordó al área en panga desde Bahía de los Ángeles para acceder a los arroyos que desembocan al Golfo de California y que se encuentran muy retirados de los accesos por tierra.

2.2. Cartografía

Se utilizó el software ArcGis v10.3 para compila los datos de campo incluyendo datos estructurales, contactos litológicos y ubicación de muestras. La cartografía de campo se apoyó en imágenes satelitales de color verdadero y falso color y modelos digitales de elevación que se describen a continuación.

2.2.1. Imágenes de color verdadero de Google Earth Pro

Las imágenes satelitales de Google Earth Pro tienen una resolución espacial de 0.5 x 0.5 metros por píxel (mpp). Imágenes con fecha del 16/01/2015 fueron exportadas debido a que son las que presentan mejor resolución y cubren totalmente el área de estudio y fueron georreferenciadas para su importación en ArcGis. La resolución de estas imágenes fue aprovechada para apoyar el trabajo de campo y de cartografía al ubicar las zonas de mayor interés y accesibilidad para los reconocimientos de campo.

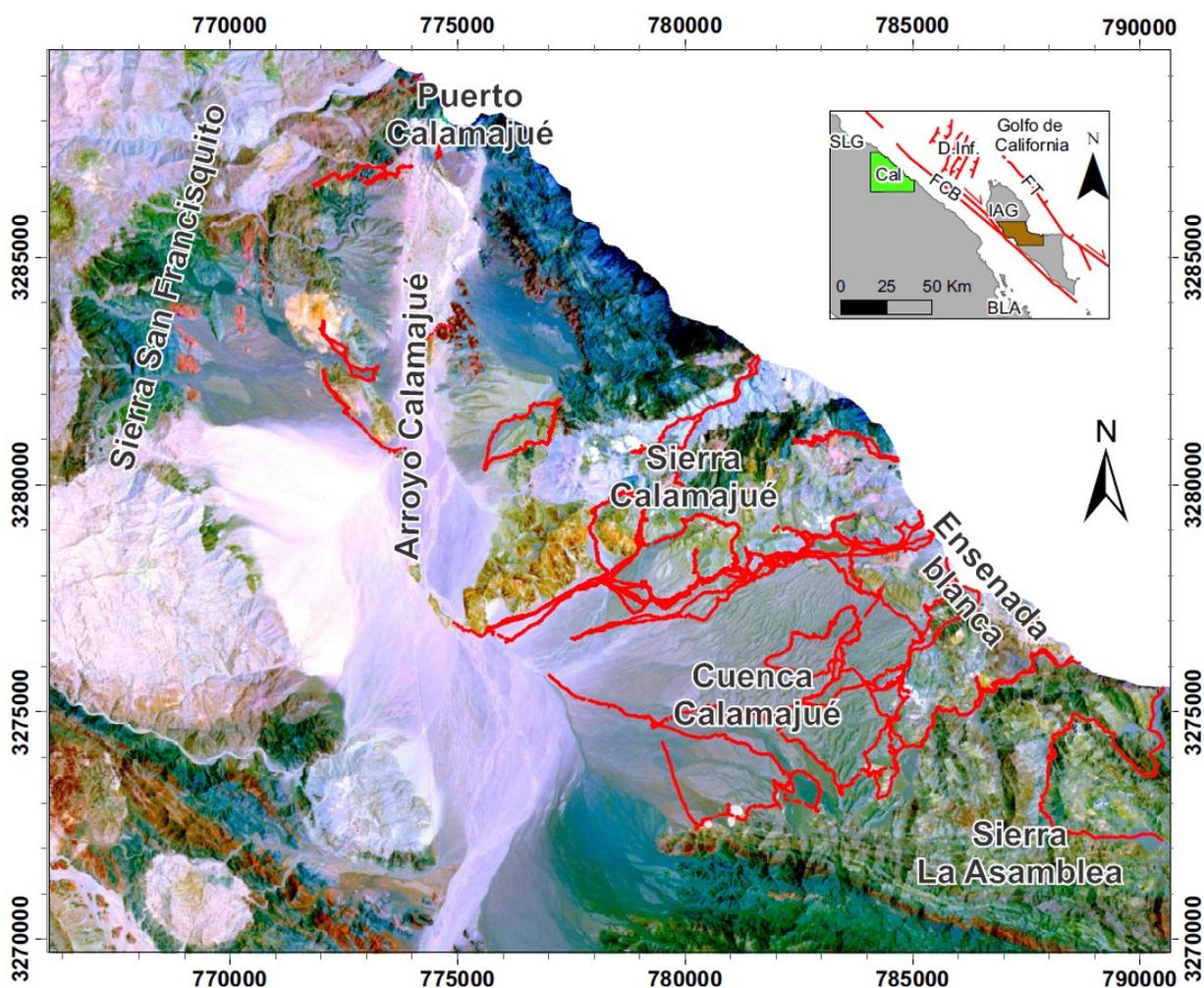


Figura 2 Imagen satelital Sentinel 2 en falso color (12, 8, 2) del área de estudio con los recorridos en campo (líneas rojas). En el mapa inserto el polígono verde es el área de estudio; el polígono café es cuenca central de la Isla Ángel de la Guarda.

2.2.2. Imagen de falso color de imágenes espectrales Sentinel 2

Se utilizó el software de uso libre “SNAP” (Sentinel Application Platform) de la Agencia Espacial Europea (ESA) para el análisis espectral de las imágenes del satélite Sentinel 2 de junio de 2017. Sentinel 2 tiene un ciclo de revisita orbital de 5 días, sin embargo, la elevación solar del mes de junio alcanza sus máximos valores y la zona se encuentra mejor iluminada.

Posteriormente, los datos se procesaron con la herramienta Sen2cor de la Plataforma de Explotación de Herramientas Científicas (STEP) de la ESA, la cual realiza la corrección atmosférica a los datos de Sentinel 2.

Se utilizaron las bandas espectrales 12-8-2 (SWIR2, NIR y B) en los canales R-G-B, correspondientemente (Tabla 1). Se normalizó la resolución espacial de las tres bandas a 10 mpp con la herramienta “Resampling” de SNAP, ya que la banda 12 de Sentinel tiene una resolución de 20 mpp, mientras las bandas 8 y 2 tienen resolución de 10 mpp.

Tabla 1: Tabla de características de las bandas espectrales de Sentinel 2.

Banda espectral		Longitud de onda central (μm)	Ancho de onda (μm)	Resolución (m)
B1	Costa	443	20	60
B2	Azul	490	65	10
B3	Verde	560	35	10
B4	Rojo	665	30	10
B5	Re1	705	15	20
B6	Re2	740	15	20
B7	Re3	783	20	20
B8	NIR	842	115	10
B8a	NIRn	865	20	20
B9	Vapor de agua	945	20	60
B10	Cirrus	1380	30	60
B11	SWIR1	1910	90	20
B12	SWIR2	2190	180	20

ESA, 2019

2.2.3. Modelos digitales de elevación

Se adquirieron 82 km² de imágenes estereoscópicas de la región de Calamajué capturadas por el satélite Pleiades el 2018/06/25. El paquete incluye en par estereoscópico pancromático (0.5mpp) y su correspondiente juego multiespectral (Azul, Verde, Rojo e Infrarrojo; 2mpp). El software de uso libre *AMES Stereo Pipeline (ASP)* versión 2.6.1 (Beyer et. al., 2019) se utilizó para obtener un MDE a partir de las imágenes pancromáticas.

Se siguió un flujo de trabajo propuesto en el manual de ASP que consistió en proyectar el par de imágenes pancromáticas con un MDE de menor resolución del área, en este caso se usó un MDE de SRTM de 1 segundo de arco de resolución (~30 mpp), de modo que nuestras imágenes izquierda y derecha consiguieron tener la misma perspectiva. Posteriormente ambas imágenes de salida se juntaron para generar una nube de puntos y, así, generar el MDE.

Debido a que las imágenes Pleiades 2 no cubren toda el área de estudio, se utilizó un MDE TanDEM-X con resolución de 12 mpp (DLR, 2017) para el área no cubierta por las imágenes Pleiades 2. Ya que ambos MDE se encontraban desfasados -30 m sobre el nivel del mar (0 m), fueron ajustados a la altura del geoide en esa posición según el Modelo Gravitacional Terrestre (EGM) del 2008 con la herramienta “dem_geoid” de ASP.

2.3. Geología estructural

Se colectaron datos de estratificación de unidades sedimentarias y volcanosedimentarias, así como datos de foliación metamórfica y de flujo de lavas. Los datos se representaron en redes estereográficas para el análisis de los datos estructurales. Complementariamente se realizaron secciones geológicas y una columna estratigráfica simplificada del área.

2.3.1. Datos estructurales

Los datos de estratificación y planos de fallas se graficaron en el software *Stereonet v.10*. Los datos se dividieron en cuatro zonas y que contienen dos secuencias estratigráficas, una inferior y otra superior. Se

empleó el hemisferio inferior de la falsilla estereográfica y la proyección de áreas iguales de Schmidt para planos de estratificación y planos de fallas en forma, polos y densidad de polos. Los estereogramas se editaron en *CoreIDRAW-X7*.

Los datos de imbricación de clastos fueron graficados en estereogramas de rosetas unidireccionales en intervalos de 30° con un valor perimetral del círculo del 60%.

2.3.2. Secciones geológicas y columna estratigráfica

Las secciones geológicas se construyeron a partir de los MDE con el software ArcGis v10, donde también se digitalizaron. Posteriormente las secciones se editaron en *CoreIDRAW-X7* y se representó la litología, los contactos que guardan entre unidades estratigráficas y las fallas que cortan las secuencias.

Se realizó una columna estratigráfica simplificada del área de estudio a partir de las descripciones litológicas y las relaciones de contacto en el software *CoreIDRAW-X7*.

2.4. Petrología y geoquímica

En el Departamento de Geología de CICESE, con la ayuda técnica de Víctor Pérez Arroyo, se elaboraron láminas delgadas de las muestras recolectadas en campo para análisis petrográfico al cortar la roca con una cortadora de disco y pulir la “galleta” de la roca cortada. El portaobjeto se adhiere a la cara pulida de la “galleta” con resina epoxi y se deja secar para cortar el prisma dejando un grosor final de 30 μm . La descripción petrográfica de las láminas sirvió como base para la selección de muestras para análisis geoquímico y geocronológico.

2.4.1. Análisis por microsonda de electrones (EPMA)

Siete muestras de lapilli de pómez se enviaron para elaborar láminas delgadas con pulido espejo al laboratorio Burnham Petrographics, Idaho, USA, donde usan un compuesto de $\frac{1}{4}$ μm de diamante en un disco cubierto de tela para lograr el pulido final de la lámina. Estas láminas delgadas se utilizaron para

análisis puntuales de vidrio volcánico y fases minerales con la microsonda electrónica (Electron Probe Micro Analyzer o EPMA), marca JEOL-Jxa 8200 de la División de Ciencias Geológicas y Planetarias de Caltech, en Pasadena, California. Con este análisis se obtuvo la composición cuantitativa de óxidos mayores y algunos óxidos menores en el vidrio volcánico y cristales de plagioclasas y piroxenos, que son las fases minerales dominantes en las pómez analizadas (Anexo B).

En el análisis con el EPMA es común que la composición del vidrio volcánico no alcance el 100% de óxidos debido a la hidratación variable del vidrio. El micro-analizador fue operado inicialmente a una potencia e intensidad de corriente de 15 Kv y 10 nA, respectivamente, y con una apertura focal del rayo de 8 μm . Sin embargo, la alta potencia del haz ocasionó un escape de los elementos más volátiles (e.g. Na_2O) y fue necesario disminuir la potencia a 5 nA. Además, las paredes vítreas de las pómez son comúnmente muy delgadas y el haz perforó el vidrio volcánico y posiblemente alcanzó la resina y el vidrio del portaobjetos. Así mismo, los microcristales de la matriz vítrea producen una variación significativa en la composición del vidrio volcánico. Para disminuir este efecto analítico se cambió la apertura focal de 8 μm a 2 μm y se evitaron las áreas con microcristales en el vidrio.

2.4.2. Análisis geoquímicos por fluorescencia de rayos X

Quince muestras de rocas volcánicas se escogieron para análisis de roca total por un aparato de fluorescencia de rayos X de onda dispersiva marca Bruker modelo S8 Tiger (Tabla 2). Las muestras se trataron en el laboratorio de preparación de muestras del departamento de Geología de CICESE. El primer paso es la remoción de superficies intemperizadas con el fin de utilizar la roca “fresca” y libre de alteración meteórica. Posteriormente, cuatro de las ocho muestras fueron trituradas por medio de una prensa hidráulica hasta la malla 3 $\frac{1}{2}$ (5.6 mm). El material más fino se homogeneizó y cuarteó y posteriormente una porción representativa se pulverizó hasta un tamaño <200 μm en el molino de anillos de carburo de tungsteno. Las cuatro muestras restantes, de menor dureza se molieron con un mortero de ágata.

Tabla 2: Relación de muestras analizadas por FRX, EPMA e ICP-MS

Muestra	Unidad	Descripción	Este	Norte	FRX	EPMA	ICP-MS
CAL18-5	Ptp4	Lapilita riolítica	782516	3280908	✓		
CAL17-14a	Ptp3	Lapilita andesítica	781057	3278100	✓	✓	✓
CAL17-14b	Ptp2	Lapilita dacítica	781057	3278100	✓	✓	✓
CAL17-14b	Ptp2	Lapilita dacítica	782516	3280908	✓		
CAL17-16	Ptp1	Lapilita riolítica	772953	3286625		✓	
CAL17-21	Ptp1	Lapilita riolítica	776323	3280783	✓	✓	✓
CAL17-19	Ma1	Lava andesítica	775454	3276654	✓		✓
CAL17-15	Md	Lava andesítica	771988	3283577	✓		✓
CAL18-11	Mb	Lava basáltica	784368	3274908	✓		✓
CAL19-04	Mb	Lava basáltica	782138	3273291	✓		✓
CAL18-13	Mdr	Dique riolítico	786037	3277755	✓		✓
IAG18-1	Ptp3	Lapilita dacítica	263711	3240250	✓	✓	✓
IAG18-2	Ptp2	Lapilita andesítica	263711	3240250	✓	✓	✓
IAG18-3	Ptp1	Lapilita riolítica	263711	3240250	✓	✓	✓
IAG19-19	Ma1	Lava andesítica	255464	3249475	✓		✓
IAG19-20	Ma1	Lava andesítica	253307	3251074	✓		✓

Los análisis de FRX se hicieron en el laboratorio de micro-análisis de rocas geotérmicas del CeMIEGeo. Las concentraciones de SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, Mn₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂ y P₂O₅ y contenido de volátiles mediante la pérdida por ignición (LOI) a ~1,000°C se muestran en el Anexo A. Los óxidos se expresarán como % de peso (wt %).

Seis muestras analizadas por EPMA también fueron analizadas por FRX para verificar la variación del análisis de microsonda, ya que con EPMA se realizan análisis puntuales de la fracción de muestra incorporada a la lámina delgada, que en este caso llegó a ser una cantidad relativamente pequeña a nuestra muestra total recolectada en campo (1 a 9 pómez por lámina). El análisis de óxidos mayores por FRX se realizó a una mezcla ~homogénea de roca total utilizando más de veinte fragmentos de pómez por muestra.

Los resultados obtenidos por FRX de los óxidos se normalizaron al 100% sin incluir el valor de LOI (*loss on ignition*). Los microanálisis en vidrio volcánico por EPMA se seleccionaron eliminando los resultados menores a 90% en la suma de óxidos totales. Estos microanálisis fueron normalizados al 100%.

Los datos geoquímicos se graficaron en los diagramas de clasificación magmática TAS (SiO_2 vs $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), en diagramas de Harker y de AFM.

La composición y tipo de plagioclasas y piroxenos en lapillitas del Pleistoceno, utilizando los datos de EPMA, se obtuvo según su fórmula estructural con base en 13 y 10 átomos de oxígeno, respectivamente.

2.4.3. Análisis geoquímico de elementos traza por ICP-MS

Los elementos traza se analizaron por un espectrómetro de masas de analizador cuadrupolar con plasma acoplado por inducción (Q-ICPMS) marca ThermoCap Qc en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la UNAM. Los elementos traza se expresan en partes por millón (ppm) y corresponden a: a) LILEs (e.g., Rb, Cs, Sr, Ba, Pb); b) HFSEs (e.g., Nb, Ta, Zr, U, Hf); c) Lantánidos o REEs (La-Lu) y; d) metales de transición (e.g., Co, Ni, Cu, Zn). Para su representación gráfica se emplearon diagramas de discriminación magmática multielementales (aracnigramas) normalizados a manto primitivo (Pierce, 1983) y los gráficos de elementos de Tierras Raras (ETR) normalizados con las concentraciones en condritas (Sun y McDonough, 1989).

2.5. Geocronología

2.5.1. Datación por método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

El método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ permite conocer el tiempo transcurrido desde que una fase mineral se enfrió por debajo de su temperatura de cierre. Estas temperaturas son diferentes para los minerales con alto contenido de potasio normalmente utilizados en este método. Por ejemplo, las temperaturas de cierre son: biotita $\sim 300^\circ\text{C}$, muscovita $\sim 400^\circ\text{C}$ y hornblenda $\sim 550^\circ\text{C}$ (Faure y Mensing, 2005). En el caso de rocas volcánicas, la edad proporcionada por éste método corresponde a la edad de erupción de la lava (Anexo D).

Dos muestras de roca volcánica del área de estudio se fecharon mediante un concentrado de hornblenda (Tabla 2). Dos muestras adicionales se enviaron al laboratorio de geocronología del U.S. Geological Survey en Menlo Park, pero sus resultados no alcanzaron a incluirse en esta tesis.

La preparación de los concentrados comenzó con la fracción de la malla No.60 (0.25 mm), que fue en donde se concentró la mayor cantidad de hornblenda. La fracción acumulada entre las mallas No. 40 y No. 60 (<.35 mm, >.25 mm) se lavó y secó para eliminar el polvo adherido. Para facilitar la separación de hornblenda se utilizó un imán de Neodimio que eliminó los minerales ferromagnéticos, y la fracción paramagnética, donde se encuentra la hbl, se separó de la fracción diamagnética (no magnética) con un separador magnético Frantz. El concentrado final se hizo con separación manual bajo el microscopio estereoscópico.

Los concentrados de hornblenda se irradiaron en el reactor nuclear de la Universidad de McMaster en Ontario, Canadá. El fechamiento de estas muestras se realizó en el Laboratorio Interinstitucional de Geocronología de Argón (LIGar) de la UNAM en Juriquilla, Queretaro. En este análisis se aplicó la técnica de calentamiento por pasos para la extracción del Ar, con la ayuda de un láser como fuente de calentamiento. El análisis isotópico de Ar se realizó con el espectrómetro de masas multicolector para gases nobles NGX del LIGar.

Para la representación gráfica de los datos se empleó el programa AgeCalc (De Basabe-Delgado, 2002). Se graficó un diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para la determinación de edad por isócrona y un diagrama de espectro de edad para la estimación de la edad por meseta.

2.5.2. Datación por método U-Pb

Este método de datación es generalmente empleado en zircones con edad mayor a ~2 Ma. En este trabajo se fecharon zircones detríticos de dos muestras de roca sedimentaria para conocer su edad máxima de depósito y las fuentes de proveniencia de los sedimentos. El transporte que experimentan los zircones detríticos generalmente limpia las zonas que pudieran presentar pérdida de Pb por efectos secundarios, por lo que la edad medida con el método U-Pb corresponde a la edad de cristalización de la fuente ígnea de la que proviene el zircón.

Los concentrados de zircones se obtuvieron triturando y tamizando la roca hasta la malla No.60 (0.25 mm). La muestra concentrada en el tamiz se separó en fracciones con diferentes densidades por medio de una mesa Wilfley. El zircón, al tener una densidad de 4.6 - 4.7 gr/cm³, se concentra en las fracciones más densas, siendo mayor a la de los minerales formadores de roca, como el cuarzo (2.7 gr/cm³) y los

feldspatos (2.6 gr/cm³). Posteriormente se removieron los minerales magnéticos con el imán de Neodimio y el separador magnético Frantz. La separación continuó con la técnica de líquidos pesados, donde se utiliza politungstato de sodio (3 gr/cm³ de densidad) para decantar los zircones y hacer flotar los minerales poco densos que no hayan sido filtrados en la mesa Wilfley. Por último, se hizo una separación manual del material decantado para eliminar apatitos (3.2 gr/cm³) y cualquier otra fase mineral encontrada.

El concentrado de zircones se examinó mediante imágenes de catodoluminiscencia en la división de Ciencias de la Tierra con la ayuda técnica de Luis Gradilla. Las muestras se analizaron con un ICP-MS Thermo Element II (sector field) con un láser acoplado de marca Resonetics en Stellenbosch University, en Sudáfrica, por el Dr. Dirk Frei y el Dr. Bodo Weber.

Los fechamientos se representaron en gráficos de concordia de tipo Wetherill, histogramas y curvas de probabilidad relativa. En los histogramas y curvas de probabilidad se emplearon las edades ²³⁸U-²⁰⁶Pb para zircones menores a 1 Ga y para los de mayor edad se empleó la edad ²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb.

Capítulo 3. Resultados

3.1. Imagen de falso color

La imagen Sentinel 2 de falso color se obtuvo a partir de la combinación de bandas 12, 8, 2 (SWIR2, NIR, B) cargadas en los canales R-G-B, respectivamente. Esto contrasta la coloración de unidades litológicas producto de la asociación de minerales, alteraciones y textura. La imagen fue utilizada principalmente para interpolar contactos de las unidades cartografiadas a zonas dónde no fue posible acceder (Figura 3).

Esquistos de mica blanca con respuesta al azul son abundantes en las rocas de la unidad Pzm, mientras esquistos de clorita y otros minerales de alteración y/u oxidación dan coloración rojiza a otros horizontes de esta misma unidad. Otra litofacies de Pzm presenta coloración de verde oliva a marrón y petrológicamente predominan cuarcitas.

La tonalita Kgr se observa de color blanco, casi al punto de saturar la imagen. La toba riolítica Otr y las unidades sedimentarias Os y Ms1 dan respuestas similares, sin embargo, sus afloramientos son de menor dimensión y, en ocasiones, también saturan la imagen (Figura 3).

La lava andesítica Ma1 contrasta con el resto de las unidades al presentarse de color ámbar en un afloramiento grande en el centro del mapa. El domo de lava andesítica Md, ubicada en el NW del mapa, se presenta en color salmón.

En el caso de las unidades sedimentarias Ms2, Ps3 y Ps4 la coloración no es muy distintiva, pudiendo estar controlada por la composición de sus clastos, que en ocasiones son de diferente litología.

3.2. Modelo digital de elevación

El modelo digital de elevación (MDE) de 0.5 mpp de resolución generado con el software ASP corresponde a un polígono irregular del área de estudio que abarca la Cuenca Calamajué (**Figura 4**). El MDE fue utilizado para ubicar fallas, realizar secciones geológicas y calcular espesores de las unidades utilizando diferencias de alturas y funciones trigonométricas. El área que abarca el MDE no fue limitante para el cálculo de espesores, ya que todas las unidades, a excepción de Md, afloran en este polígono.

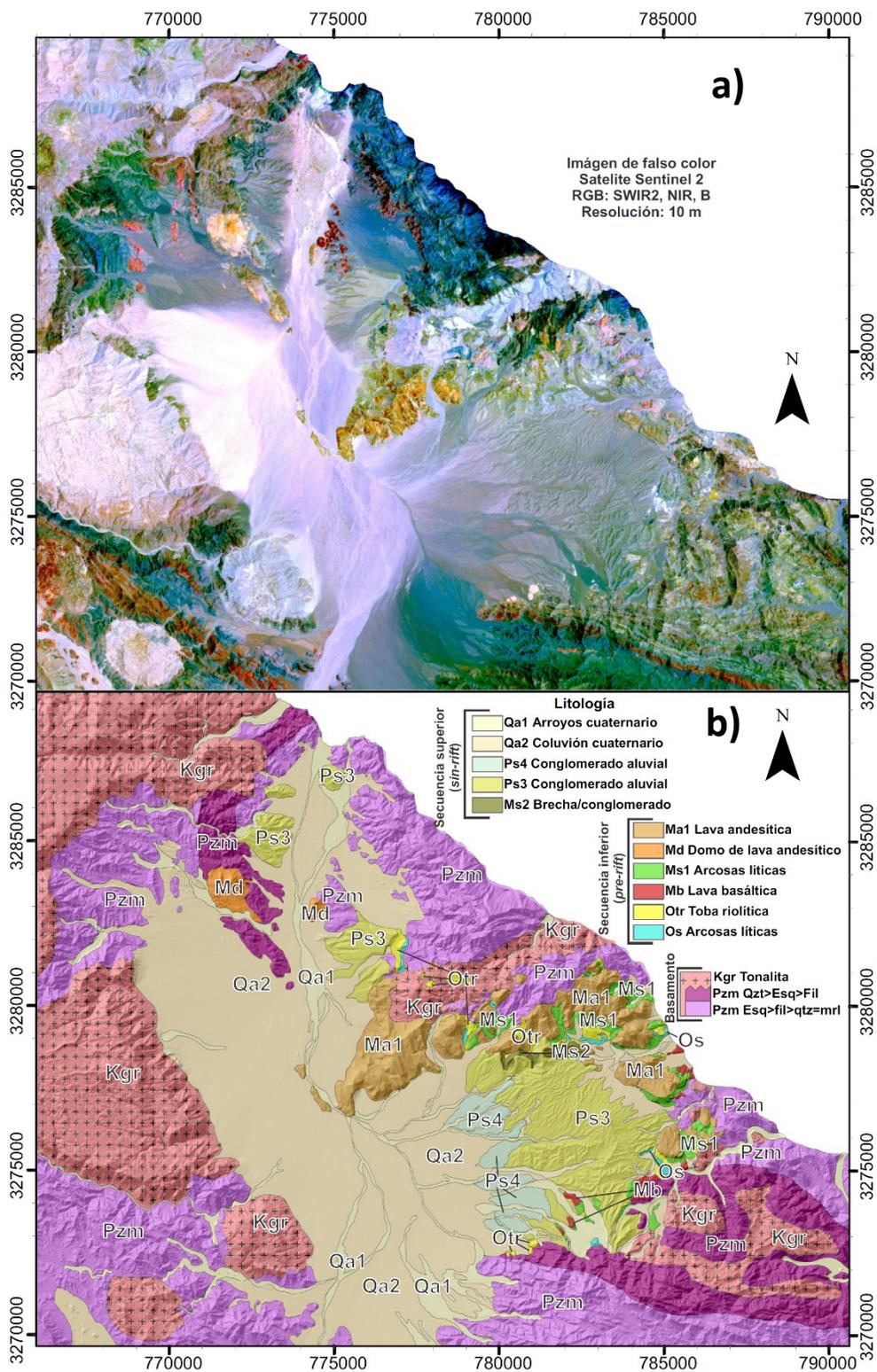


Figura 3 a) Imagen de falso color SWIR2-NIR-B de Sentinel con las bandas 12, 8 y 2 en RGB respectivamente. b) Mapa litológico de la zona de estudio que incluye la cartografía realizada en este trabajo y la definición de las unidades catográficas. Notar que los depósitos sedimentarios recientes Qa1, Qa2 presentan la coloración dominante de la fuente de aporte local.

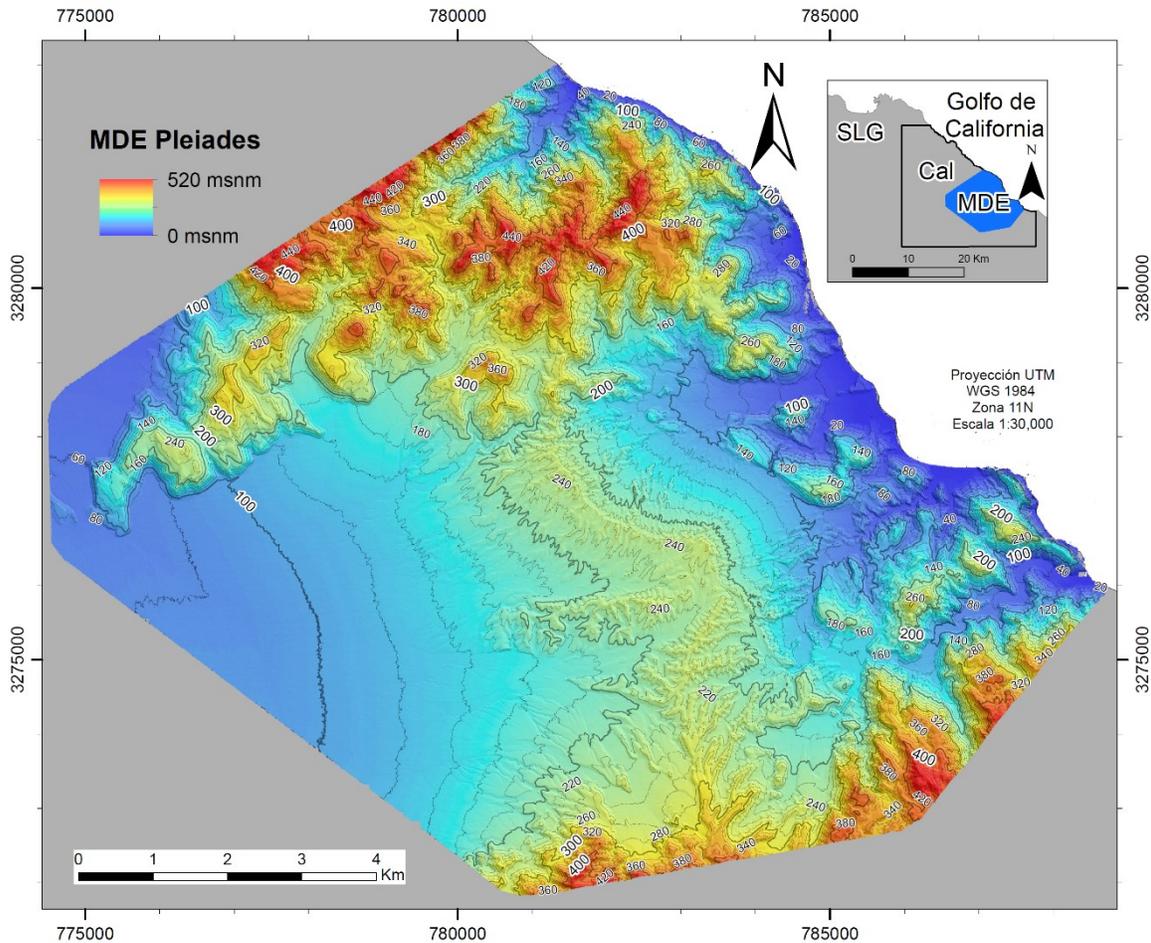


Figura 4 Modelo digital de elevación (MDE) elaborado a partir de un par de imágenes estereoscópicas del satélite Pleiades 2 sobrepuesto a un sombreado del mismo y curvas de nivel cada 20 m, con curvas maestras cada 100 m. Recuadro superior derecho muestra la ubicación del MDE (polígono azul) dentro del área de estudio (polígono rectangular). La cresta que conecta la sierras Calamajué y La Asamblea constituye el parteaguas moderno y es debido a la exhumación de la cuenca aluvial con la secuencia superior. Cal, Calamajué; SLG, San Luis Gonzaga.

3.3. Cartografía

El resultado de esta actividad culminó en el mapa geológico-estructural de escala 1:50,000 en el que se marcan 14 litologías diferentes, trazos de fallas importantes, diques, datos de foliación y estratificación, ubicación de muestras, fechas radiométricas y las secciones geológicas. La información geológica está sobre un MDE (DLR, 2017; Figura).

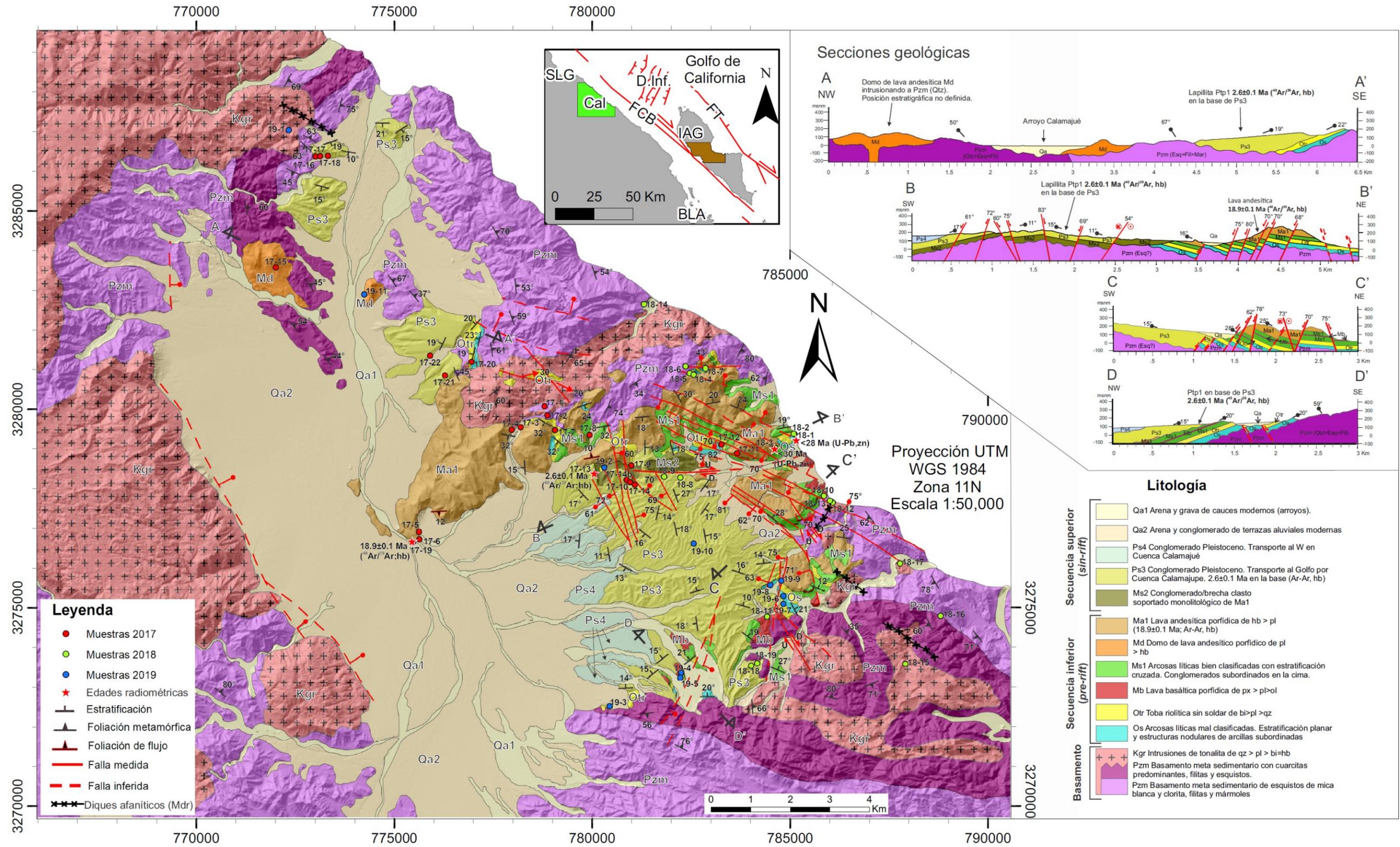


Figura 5 Mapa geológico de la región de Calamajué en el NE de Baja California. En la zona central domina la secuencia de conglomerado aluvial Ps3 que contiene tefras del Plioceno tardío correlacionables con depósitos similares en isla Angel de la Guarda. Las terrazas Ps4 corresponden a la inversión de la cuenca y el cambio en la dirección de transporte aluvial hacia el oeste y norte. El Anexo E contiene el control de muestras colectadas.

3.4. Estratigrafía

Se dividió la columna estratigráfica que sobryace al basamento granítico y metamórfico en dos secuencias: la secuencia inferior y la secuencia superior (**Figura 6**).

Basamento metamórfico y granítico

Las rocas que conforman a las sierras más elevadas dentro del área consisten en una secuencia de rocas meta sedimentarias (Pzm) de esquisto, filita, cuarcita y mármol, principalmente, con una foliación metamórfica marcada con dirección NW-SE. Conforman la Sierra San Francisquito en la porción NW del área, la Sierra Calamajué en la parte NE, y la Sierra La Asamblea, en la porción sur. La mineralogía de los esquistos y filitas consiste mayormente en cuarzo, mica blanca y clorita. Las filitas son de clorita y presentan un color ocre rojizo producto de alteración de las micas. Las cuarcitas presentan textura granoblástica de grano fino con cuarzo mono y policristalino.

En las tres sierras mencionadas las rocas metamórficas están intrusionadas por tonalita (Kgr) de textura fanerítica con plagioclasa, cuarzo, biotita, hornblenda y microclina.

3.4.1. Secuencia inferior (Pre-rift)

Esta es una secuencia vulcano sedimentaria de ~400 m de espesor y sus unidades afloran mayormente en las orillas de la Cuenca Calamajué (CC), que colinda al norte con la Sierra Calamajué y al sur con la Sierra La Asamblea. La secuencia también aflora en las colinas que separan a la CC de la Ensenada Blanca (**Figura 7**).

Diques riolíticos Mdr

Se reconocieron diques color gris de composición riolítica cortando al basamento. La mayoría se ubicaron en el SE del área de estudio, cerca de la línea de costa (Figura). Tienen un espesor de hasta 1.5 m y se emplazaron preferentemente en dirección NW-SE. La lámina delgada revela una textura porfírica de flujo con cristales de plagioclasa y trazas de hornblenda flotando en una matriz vítrea. La relación matriz/cristal es de 90/10, aproximadamente. No se reconocieron estos diques cortando a otras unidades más recientes, sin embargo, no se consideran del basamento debido a su textura porfírica a afanítica

Arcosa lítica Os y toba riolítica Otr

Sobreyaciendo al basamento de forma discordante se encuentra un depósito sedimentario color ocre/rojizo de arcosas líticas (Os). Aflora en pequeñas ventanas en los bordes de la CC. Al sur de la cuenca se estiman 28 m de espesor real para esta unidad. En la Ensenada Blanca su espesor es de más de 45 m sin aflorar la base. Se presenta en estratos masivos y delgados, pobremente consolidados, de arenisca de grano fino a grueso. Contiene facies subordinadas de lutitas nodulares y conglomerado polimíctico mal clasificado, con líticos volcánicos redondeados de hasta 40 cm de diámetro dispuestos en estratos de 1 a 2 m de espesor. La fracción arenosa que lo componen son mayormente plagioclasas y feldespatos, seguido de líticos volcánicos y metamórficos y cuarzo mono y poli cristalino. Además, presenta un alto contenido de óxidos de hierro que le dan la coloración rojiza a la unidad.

En la cima de la unidad Os, y de manera concordante, se presenta una toba lítica (Otr) con un espesor máximo de 60 m. Ésta toba la conforman 80% de ceniza volcánica, 10% de líticos accidentales, 5% de pómez y 5% de cristales. En lámina delgada de la pómez se observa que los microcristales magmáticos son de plagioclasa, biotita y cuarzo, mientras los líticos accidentales corresponden principalmente a líticos metamórficos.

Arcosa lítica Ms1 y lava basáltica Mb

Sobreyaciendo a Otr de manera concordante ocurrió la depositación de una unidad sedimentaria de arcosas líticas bien clasificadas. Aflora en los cerros que delimitan al este a la cuenca Calamajué, en dónde cuentan con un espesor máximo de 100 m. También afloran en pequeñas ventanas en los bordes N y S de la cuenca. Esta unidad presenta estratificación cruzada en la mayor parte de la secuencia y facies de conglomerados con líticos volcánicos y metamórficos redondeados dispuestos en estratos de al menos 5 m de espesor. El tamaño de grano de la arcosa es de arena media y están compuestas por plagioclasas y feldespatos, líticos volcánicos y metamórficos y cuarzo mono y policristalino, principalmente.

En la parte media del paquete Ms1 se encuentra interestratificada una lava basáltica (Mb) de color gris oscuro, con un espesor máximo de 17 m. Aflora cerca de la Ensenada Blanca y en el costado sur de la Cuenca Calamajué. Este flujo de lava no se encuentra en el flanco N de la cuenca y distintivamente presenta una textura porfídica de olivino en una matriz fina de piroxeno y plagioclasa.

Flujo de lava andesítico Ma1

La unidad Ma1 es una lava de andesita porfídica de hornblenda y plagioclasa. Aflora en la periferia N de la Cuenca Calamajué y en las lomas de la Ensenada Blanca. Sobreyace y corona a la secuencia inferior de manera concordante, sin embargo, en la zona N de la cuenca se depositó en discordancia erosional en contacto directo con Os, Otr y Ms1. El flujo de lava inferior tiene un espesor de 50 m y contiene una brecha basal, pero el espesor máximo de esta unidad es de 158 m y posiblemente incluye dos o más flujos individuales. Datos de foliación de flujo en la parte NW de la cuenca Calamajué sugieren un flujo de esta lava con dirección E-W. Petrográficamente se observa una textura porfídica de hornblenda y plagioclasa en una matriz vítrea y microlitos de plagioclasa con orientación de flujo.

Columna estratigráfica de Calamajué

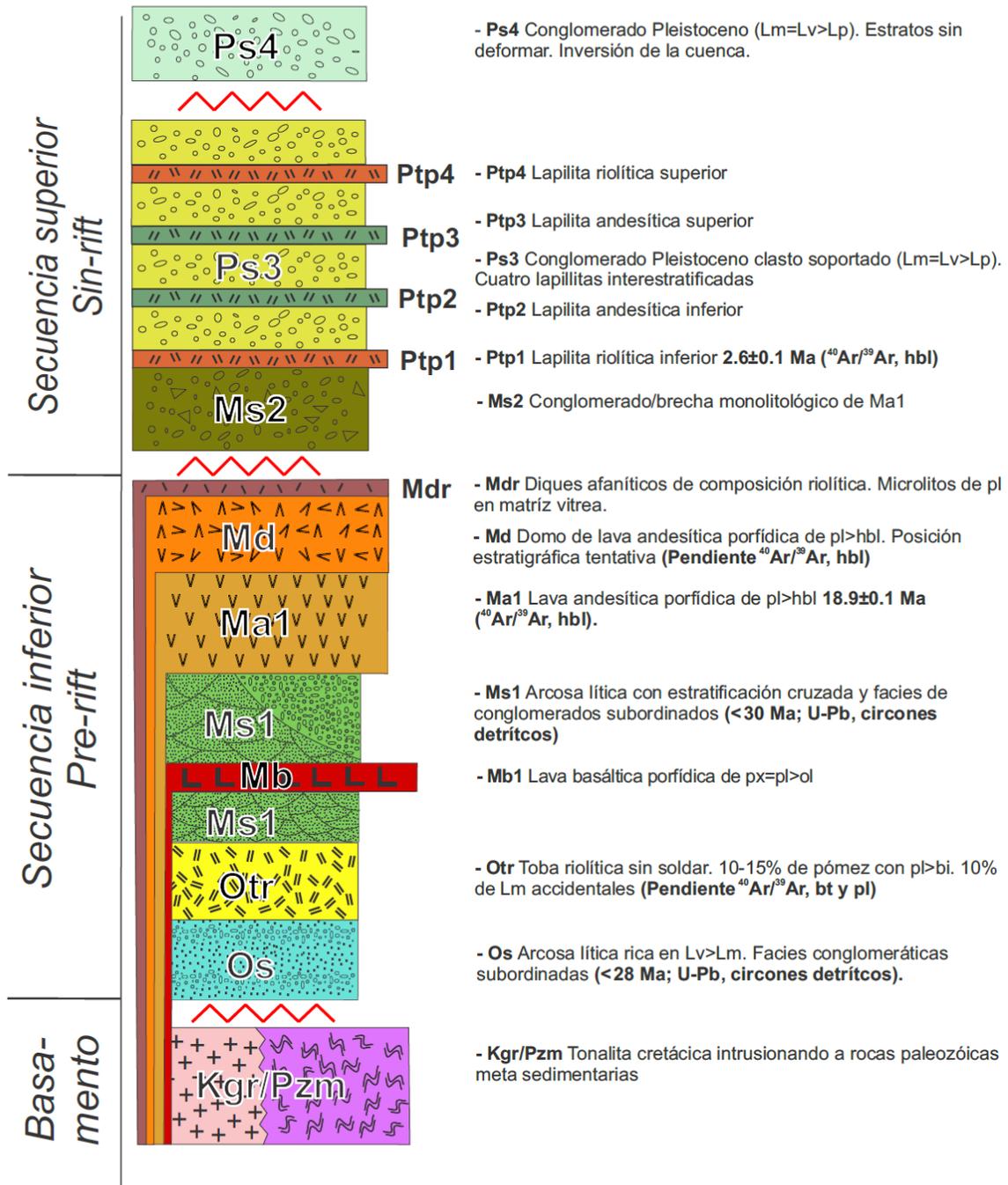


Figura 6 Columna estratigráfica simplificada de la cuenca Calamajué. Comprende dos secuencias mayores separadas por una discordancia angular. La secuencia inferior se considera pre-rift y contiene los depósitos volcánicos y sedimentarios correlacionables con el volcanismo del arco Comodú del Mioceno Temprano.

Domo de lava Md

Un domo de lava andesítica porfídica de plagioclasa y hornblenda aflora sobre el paleorelieve del basamento Pzm en el lado NW de la zona de estudio, al W del arroyo Calamajué. Otro pequeño remanente de esta lava se encuentra al E del mismo arroyo y tiene una distribución en planta mayor a 300 m en su parte más ancha. El espesor de esta unidad es mayor a 170 m y corresponde a la altura máxima del domo central (Figura 7f). En microscopio presenta textura porfídica de microcristales de plagioclasa y hornblenda, con cuarzo y feldespato potásico subordinados, inmersos en una matriz vítrea.

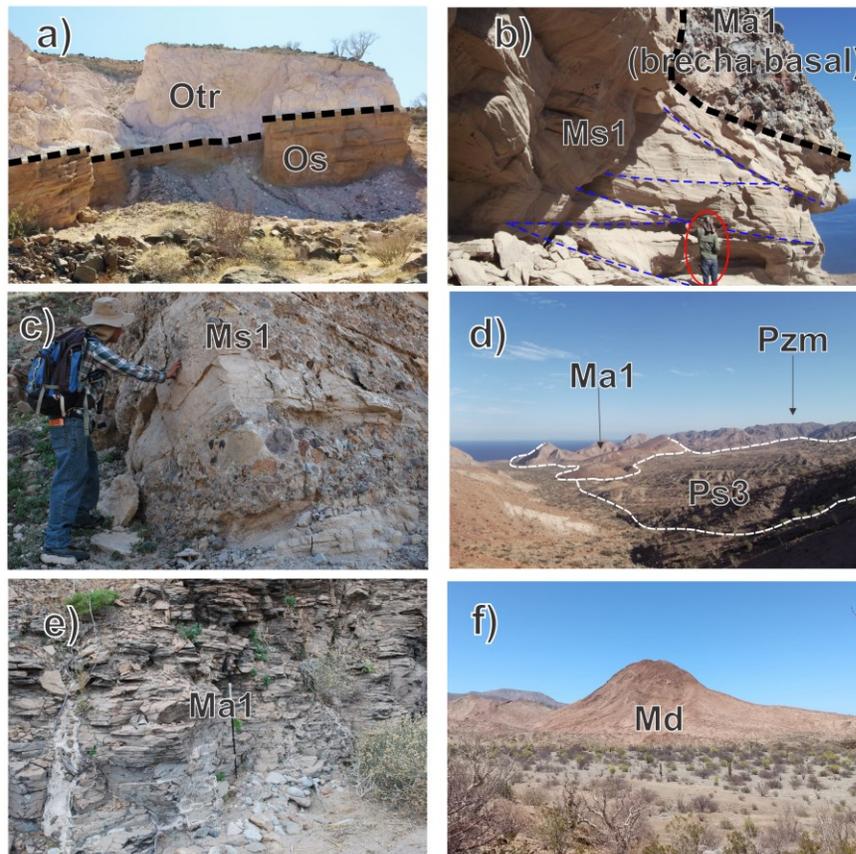


Figura 7. Fotografías de campo de la secuencia inferior. a) Arenisca arcósica Os subyace a la toba riolítica rosada Otr; b) Estratificación cruzada hamacada en Ms1 que subyace discordantemente a la brecha basal de un flujo de lava andesítica Ma1; c) Facies conglomeráticas de Ms1 rica en líticos volcánicos redondeados; d) Vista panorámica de la Cuenca Calamajué (Ps3) vista hacia el este a sureste. Se observa la lava Ma1 en colinas que separan a la CC del Golfo de California. Al fondo el basamento Pzm de la Sierra La Asamblea; e) Afloramiento de un flujo de andesita Ma1 con diaclasa horizontal pervasiva y fracturas y fallas subverticales rellenas de calcita; f) Domo de lava andesítica Md que posiblemente sobreyace al basamento.

3.4.2. Secuencia superior (Sin-Rift)

La secuencia superior consiste en estratos gruesos a delgados de conglomerado aluvial que sobreyace en discordancia angular a la secuencia inferior. Está conformada principalmente por una brecha monolitológica (Ms2) y una secuencia conglomerática aluvial (Ps3) que contiene a hasta cuatro depósitos de lapillita de pómez interestratificadas (Ptp, ver **Figura 8**).

Brecha conglomerática Ms2

Esta unidad aflora solamente en la porción N de la cuenca Calamajué. El espesor máximo es de ~55 m de un conglomerado brechoide, en estratos gruesos a muy gruesos sin estructura interna, clasto-soportado, con 85% de clastos y <15% de matriz de arena gruesa. Presenta muy mala clasificación y los clastos angulosos de Ma1 son predominantes, y clastos de Pzm y Otr subordinados. Los clastos de Ma1 llegan a tener más de 40 cm de diámetro.

Conglomerado polimíctico Ps3 y lapillitas de pómez Ptp

Ps3 sobreyace de manera concordante a Ms2 y subyace a Ps4. En la parte central de la cuenca Calamajué se estima que Ps3 tiene un espesor de ~350 m, sin embargo, este espesor se reduce por acuñaamiento hacia los flancos N y S de la cuenca aluvial, en dónde las unidades de la secuencia inferior afloran por la exhumación de toda la secuencia. Ps3 son depósitos aluviales de conglomerado polimíctico granosoportado con una relación de 80% de clastos contra 20% de matriz de arenas gruesas. También presenta facies de arenisca conglomerática subordinada dispuesta en estratos de <1 m de espesor. Los depósitos de Ps3 presentan mala clasificación con clastos subangulosos a subredondeados que varían composicionalmente en la zona. En el norte de la cuenca predominan los líticos de Ma1 sobre líticos de Pzm; mientras en el sur y zona centro de la cuenca la presencia de Ma1 disminuye y se hace presente Mb. En esta zona Ps3 tiene una proporción de clastos del 80% contra 20% de matriz de arenas gruesas.

Interestratificadas en Ps3 se identificaron cuatro estratos masivos de lapillita de pómez, sin matriz, que son interpretados como depósitos piroclásticos primarios de caída libre. El primero de estos depósitos (Ptp1) se encuentra en la base de Ps3 y se trata de una lapillita de pómez color blanco con un espesor máximo de 5 m cerca del puerto de Calamajué (**Figura 2**). En la porción norte de la cuenca Calamajué este depósito tiene una base de 1 m de ceniza volcánica que grada a fragmentos de pómez hacia la cima. Sin contar la base rica en ceniza, el depósito está conformado por un 95% de pómez con tamaño promedio de

5 cm de diámetro, el 5% restante consiste en ceniza volcánica y líticos accidentales de Ma1 y Pzm. Bajo el microscopio las pómez de Ptp1 presentan microcristales primarios de plagioclasa, clinopiroxeno y hornblenda.

El segundo depósito volcánico (Ptp2) es una lapillita de escoria pumicítica de color verdoso a negro rojizo. Tiene un espesor máximo de 1 m en la porción NE de la Cuenca Calamajué, pudiendo ser mayor, ya que presenta una relación de relleno en paleo bajos (**Figura 8, d**). Está conformada por un 85% de escoria-pómez redondeada, con 1 cm de diámetro promedio y un 15% de matriz de ceniza y fragmentos líticos accidentales menores a 1 cm de tamaño. En microscopio se observa una textura afanítica del vidrio, presentando microlitos de plagioclasa y clinopiroxeno.

Sección arriba aflora Ptp3, que consiste en un depósito concordante de escoria y pómez de color verde claro a verde oscuro. Presenta un espesor máximo de 1.5 m en la parte N de la cuenca y contiene 70% de fragmentos de pómez de ~1 cm de diámetro en promedio, 15% de matriz de ceniza volcánica y 10% de líticos volcánicos y metamórficos accidentales. En microscopio se observa una textura vitroclástica con trazas de microcristales de plagioclasa y piroxeno.

El cuarto depósito volcanoclastico (Ptp4) corresponde a una lapillita de pómez blanca, que presenta un espesor máximo de 90 cm. Está conformado por 90 % de fragmentos de pómez redondeados de hasta 3 cm de diámetro y 10% de matriz de ceniza y líticos accidentales. Petrográficamente se reconocen microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno en el vidrio riolítico.

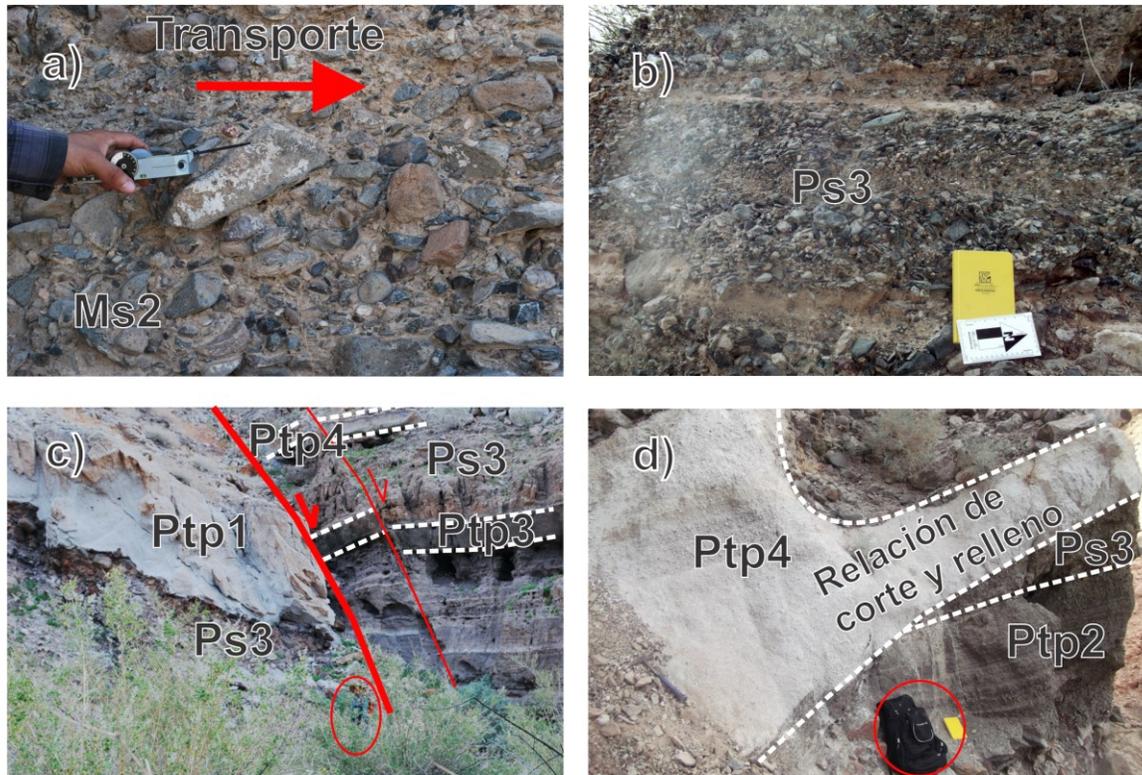


Figura 8 Fotografías de campo de la secuencia superior: a) Clastos imbricados de lava andesítica (Ma1) en la unidad Ms2 mostrando un transporte señalado por flecha roja; b) Conglomerados clastosoportados de Ps3 mostrando imbricación de clastos; c) Lapilitas interestratificadas en Ps3 cortadas por fallas normales; d) Relación de corte y relleno en la secuencia Ps3. Ptp2 y Ps3 están erosionados por un canal y rellenos por Ptp4. Esta última a su vez se encuentra parcialmente erosionada y el corte está relleno por conglomerados arenosos de la misma unidad (lado derecho de la fotografía).

Conglomerado aluvial Ps4

La unidad Ps4 sobreyace a Ps3 por discordancia angular. Ps4 está conformada por conglomerado clastosoportado y aflora como terrazas aluviales en la porción oriental de la cuenca. Su espesor máximo es de ~20 m. Se conforma por 80% de líticos volcánicos principalmente de Ma1, líticos metamórficos de cuarcitas y flitas, y líticos de Kgr subordinados. Esta unidad se distingue de Ps3 por un cambio en la dirección de transporte o paleocorrientes y no se encuentra basculada, siendo claramente más joven que Ps3.

3.5. Geocronología

3.5.1. Método Ar-Ar

Dos concentrados de hornblenda se fecharon por éste método isotópico. Una de estas muestras (clave Cal17-19) corresponde a la lava andesítica Ma1. La otra corresponde a la muestra de lapillita Ptp1 (clave Cal17-13). En esta última sólo se utilizaron pómez limpias para la extracción de hornblenda y se consideran los piroclastos primarios del depósito.

Lava andesítica Ma1 (Cal17-19)

Al concentrado de hornblenda para esta unidad se le realizó un experimento de calentamiento que constó de 11 pasos. Los resultados definen una edad meseta con 4 pasos consecutivos liberando un total del 70% de ^{39}Ar calculando una edad de 18.8 ± 0.1 Ma (error 2σ). Para el diagrama $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ traza una isócrona inversa conformada por los pasos 5 a 10 obteniendo una edad de 18.9 ± 0.1 Ma (error 1σ) con un MSWD de 1.1. En la isócrona se omitieron los primeros cuatro pasos debido a que se interpreta que liberan el Ar de la periferia del cristal, siendo esta la zona más propensa a alteración o contaminación con Argón atmosférico.

Ambas edades presentan buenos datos y no muestran una diferencia importante en la edad, sin embargo, el gráfico de meseta muestra una mayor variabilidad en los pasos, mientras la isócrona muestra que los datos se ajustan bien a una recta sin cambiar significativamente su pendiente, por lo que se considera la edad de isócrona como la más representativa.

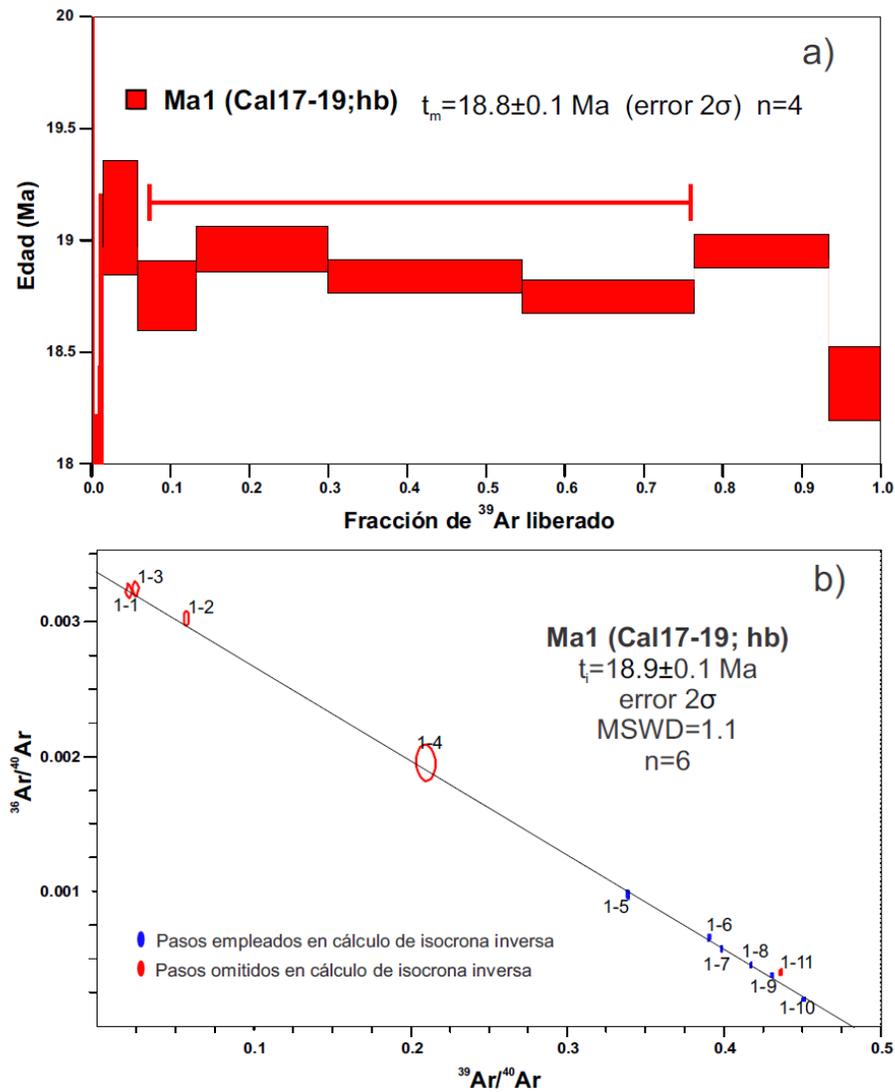


Figura 9 Geocronología de la unidad Ma1 (Cal17-19). a) Gráfico definiendo una edad de meseta de 18.8 ± 0.1 Ma en cuatro pasos consecutivos. b) Gráfico de $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para definir una isócrona inversa. La edad de 18.9 ± 0.1 Ma se obtuvo con los experimentos 1-5 a 1-10. La clave corresponde al paso al que pertenece cada dato. Los gráficos y la incertidumbre de la edad están representados en error 2σ .

Lapillistone riolítico Ptp1

En esta muestra se realizaron dos experimentos de calentamiento por pasos en su concentrado de hornblenda. El gráfico de meseta muestra los pasos de ambos experimentos, pero el primer experimento no cumple con las características para determinar una edad meseta. Los pasos 5 al 10 del segundo experimento se empalman en sus errores liberando 70% del ^{39}Ar , lo que resulta en una edad de 2.6 ± 0.1 Ma (error 2σ).

Para obtener la isócrona inversa de esta muestra se graficaron los pasos 3 al 9 del segundo experimento, debido a que son los que ajustan mejor una recta. La edad obtenida es de 1.9 ± 0.1 Ma y un MSWD de 1. A pesar de contar con un MSWD bajo, los pasos empleados en la isócrona inversa no se distribuyen a lo largo del gráfico, como sí lo hace la isócrona de la muestra Cal17-19, de modo que la pendiente puede cambiar considerablemente agregando u omitiendo pasos. En adelante se hará referencia a la edad de meseta para la muestra del depósito inferior de lapillita Ptp1 (Figura 10).

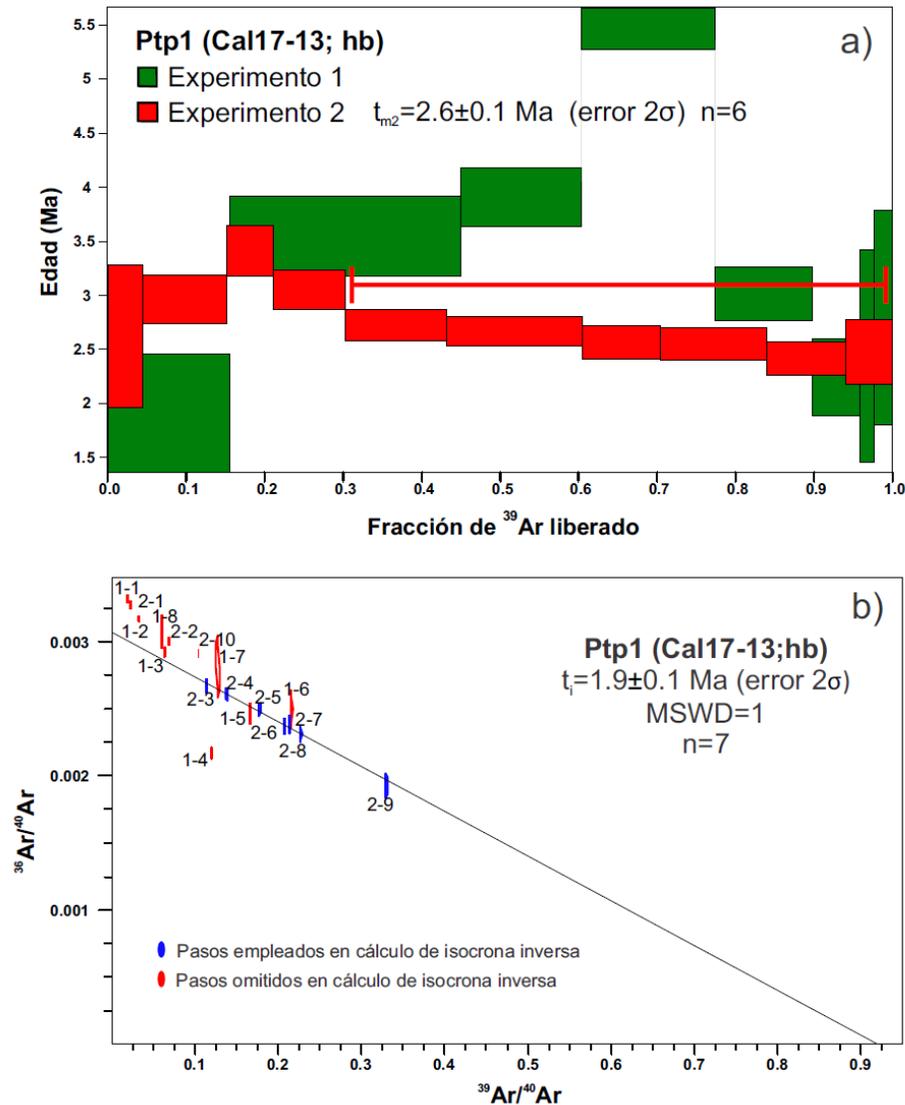


Figura 10 Geocronología de la unidad Ptp1 (Cal17-13; hb). a) Gráfico de meseta dónde se grafican dos experimentos. La edad la definen los datos del segundo experimento (rojo). b) Gráfico de $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ con los pasos utilizados para estimar la isócrona. Las claves indican el experimento seguido del paso al que corresponden. Los gráficos y la incertidumbre de la edad están representados con error 2σ .

3.6. Método U-Pb

En este apartado se reportan las edades de los zircones detríticos de las arcosas líticas Os y Ms1, muestras Cal18-01 y Cal18-03, respectivamente. Estas muestras corresponden a la cima de estas dos unidades.

Unidad Os

El gráfico de histograma y curva de probabilidad de la muestra Cal18-01 (Os) presenta 4 poblaciones de zircones: a) La más antigua es de ~163 Ma (n=12) que corresponde al Jurásico Tardío; b) Un pico cercano a los 134 Ma (n=6) corresponde al Cretácico Temprano; c) La población predominante de 83 circones detríticos tiene una edad promedio de 97 Ma (Cretácico Tardío); y d) Una población de 10 circones de edad ~28 Ma correspondiente al Oligoceno. Se analizaron tres circones con edad proterozoico, dos zircones arrojan un edad cercana a los 1125 Ma y uno con edad de 1700 Ma, los cuales no se consideran como poblaciones (**Figura 11**). En esta muestra se infiere que la edad máxima del depósito es de 25 Ma por el circón más joven de la población del Oligoceno. Los 111 circones analizados para esta muestra resultaron concordantes, por lo que no se tuvieron que filtrar datos.

Unidad Ms1

En la arcosa lítica de Ms1 se identificaron 6 poblaciones en el gráfico de histograma: a) La más antigua es de 3 circones y tiene una edad de ~1177 (Meso-proterozóico); b) la siguiente población tiene una edad promedio de 167 Ma (n=5) y es del Jurásico Medio; c) Un pico de zircones del Cretácico Inferior se define con una edad de ~140 Ma (n=13); d) La población predominante corresponde al Cretácico Tardío con una edad promedio de 99 Ma (n=58); e) Existe una población marcada por la curva de probabilidad de datos totales (curva azul; Figura 9a) con edad de ~76 Ma (n=18); f) Por último, la población más joven es del Oligoceno con una edad promedio de 30 Ma (**Figura 12**). Dentro de la población del Oligoceno, los circones más jóvenes analizados son de 22 Ma, considerándose esta como la edad de máxima de depósito. Al igual que en la muestra Os, todos los circones analizados de Ms1 son concordantes y no se tuvieron que filtrar de los gráficos.

En síntesis, la edad máxima del depósito las unidades Os y Ms1 es del Oligoceno y anteceden la actividad del arco Comondú en la península de Baja California.

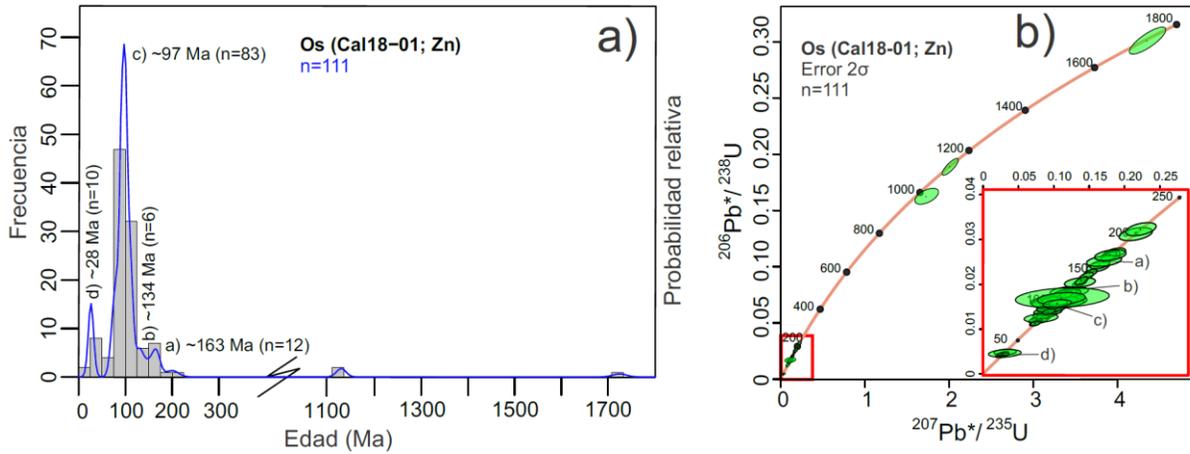


Figura 11 a) Histograma y curva de probabilidad de la edad de los zircons detríticos de la arcosa lítica Os. b) Curva de concordia para la misma muestra de la unidad Os.

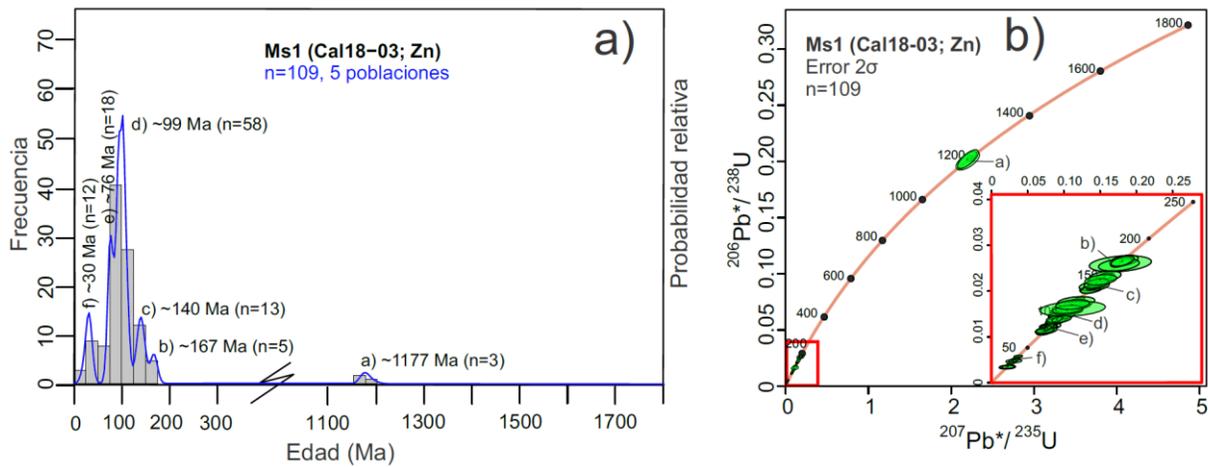


Figura 12 a) Histograma y curva de probabilidad de los zircons detríticos para la unidad Ms1. b) Curva de concordia para la unidad Ms1.

3.7. Análisis estructural

El análisis de los datos de orientación de las fallas y de la estratificación de las unidades sedimentarias se dividió en cuatro zonas estructurales (ZE). Con el objetivo de distinguir posibles cambios en el sistema de

deformación se dividieron los estereogramas de la secuencia inferior (Sinf) y de la secuencia superior (Ssup). La mayoría de las fallas tienden a una dirección NNW-SSE y otras subordinadas son de dirección NNE-SSW. Se reconocieron fallas oblicuas con componente normal y estrías medidas entre los 90° y 180°, por lo tanto, su movimiento es interpretado como oblicuo dextral. No se reconocieron indicadores de fallas inversas.

Las medidas de estratificación varían considerablemente, pero en grandes rasgos se observa que para las zonas ZE1 y ZE4 la estratificación de Ssup presenta un rumbo ~E-W, mientras que en ZE2 y ZE3 la mayoría de los datos de estratificación tienden a una dirección NW-SE. En toda la región los echados de las capas varían entre los 13° y 23°, existiendo un basculamiento diferencial de hasta 8° entre la Sinf y la Ssup únicamente observable en la zona ZE2.

3.7.1. Análisis de fallas

Zona estructural 1

Los afloramientos en esta zona se encuentran muy aislados unos de otros, por tanto, solo se reconocieron tres fallas cortando la Ssup, dos con un rumbo de 336° y 74° de echado al NE y la restante con rumbo de 135° y echado de 75° al SW. A falta de afloramientos de la Sinf no se pudo realizar su respectivo análisis de fallas en esta zona (**Figura 13**).

Zona estructural 2

Las fallas cortando a la Sinf en la zona 2 tienen orientación dispersa, sin embargo, 7 fallas de 9 medidas tienen un rumbo de 320° y están echadas 74° al NE en promedio. En Ssup se presenta una familia de fallas con un rumbo de 321°/59°NE y una familia más prominente con 359° de rumbo y un alto echado de 83° al ~E, además hay un grupo de fallas antepuestas con rumbo 154° y 81° de echado al SW.

Zona estructural 3

En esta zona la Sinf se encuentra cortada por fallas con una tendencia de 113° de rumbo con 72° de echado, mientras un par de datos son antepuestos a esa orientación, con un azimuth y echado de 313°/46°NE. En

cuanto a la Ssup, las fallas tienen una gran dispersión, sin embargo, se pueden visualizar en dos familias antepuestas, la primera de rumbo 320° echada 74° al NE y la segunda con rumbo 119° y echada 77° al SW.

Zona estructural 4

En la Sinf la familia principal de fallas medidas es de 120° de rumbo con 78° de echado al SW, mientras otros 3 datos son antepuestos con rumbo y echado de $326^\circ/61^\circ$ NE. En cuanto a la Ssup existe un pequeño grupo de 4 datos consistente con un rumbo NNW de 354° y echado 79° al NE, mientras otros 7 datos son mucho más dispersos teniendo un rumbo entre el SE y el SW echados al SW y NW, respectivamente.

3.7.2. Análisis de datos de estratificación

Zona estructural 1

Los datos medidos para la Ssup fueron tomados en afloramientos de Ps3 cerca del Puerto Calamajué y son consistentes con un rumbo de 83° y un echado de 16° al SE (**Figura 14**). De la Sinf sólo el domo de lava Md aflora en esta zona, del cual no se pudo tomar datos de estratificación ya que guarda contacto de forma irregular con el paleorelieve.

Zona estructural 2

Para la Sinf el rumbo de las capas varía entre los cuadrantes NE al SW, sin embargo, en promedio el rumbo y echado es de $135^\circ/23^\circ$ SW. Para el rumbo de las capas en la Ssup el caso es muy similar con un rumbo promedio de 126° , sin embargo, el echado es de 15° al SW, 8° menos que en la Sinf.

Zona estructural 3

Un cambio importante existe para la ZE3, ya que las capas cambian y buzcan al oriente, contrario a la ZE2. La Sinf en promedio tiene rumbo y echado promedio de $302^\circ/22^\circ$ NE. En cuanto a la Ssup, el rumbo cambia a 14° , mientras el echado es de 19° al SE.

Zona estructural 4

Los datos de estratificación de Sinf en esta zona tienen un azimuth y echado promedio de $298^{\circ}/19^{\circ}\text{NE}$, similar a la ZE3. Mientras que en la Ssup la tendencia es de 258° de rumbo y de 13° de echado al NW.

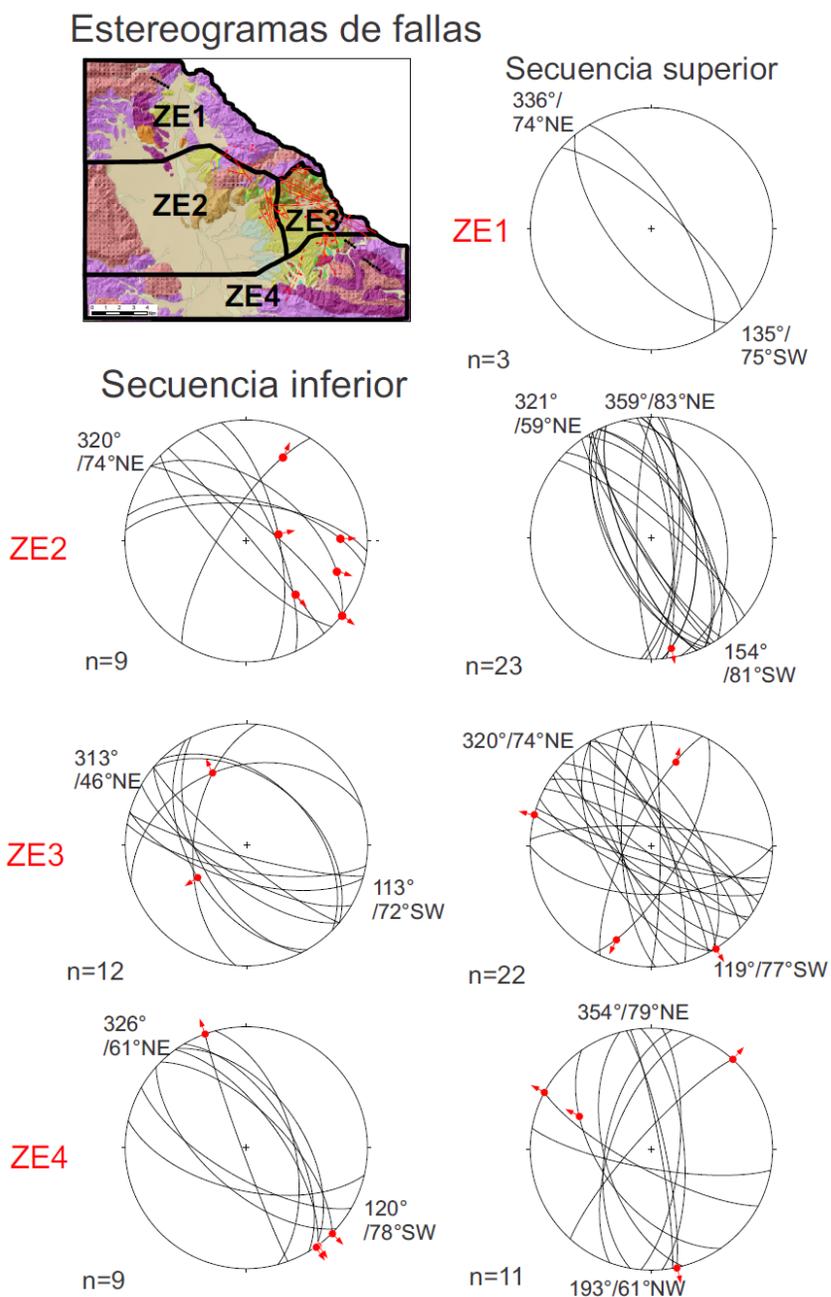
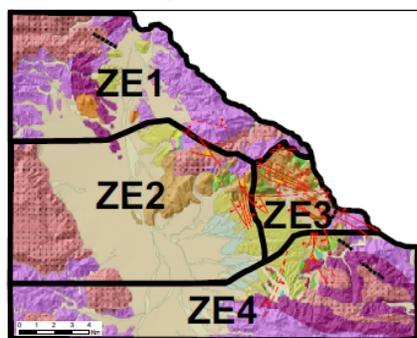
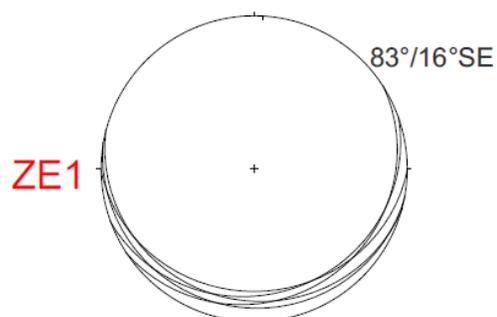


Figura 13 Estereogramas de planos y polos de fallas separados por zonas estructurales y secuencias estratigráficas.

Estereogramas de estratificación



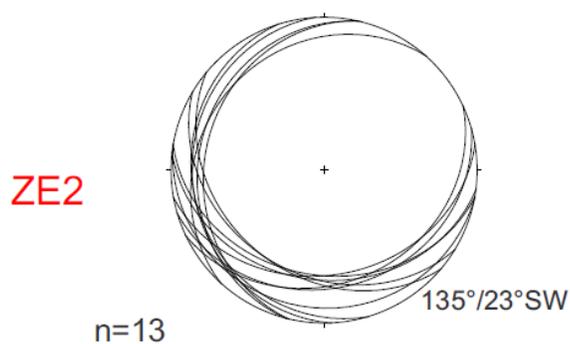
Secuencia superior



ZE1

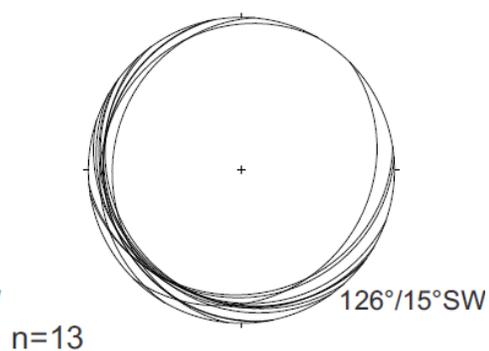
n=5

Secuencia inferior

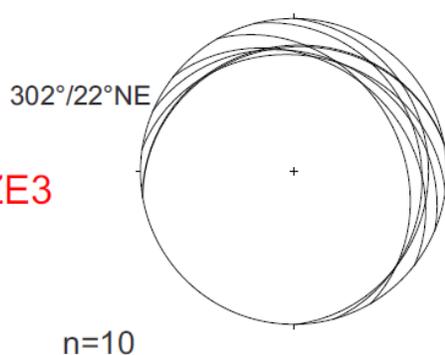


ZE2

n=13

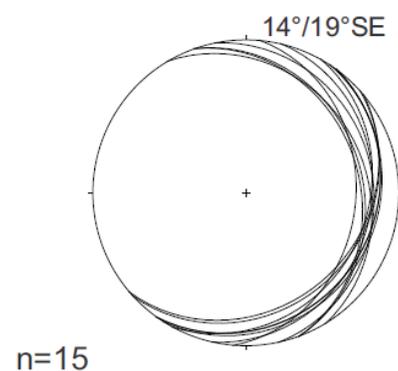


n=13

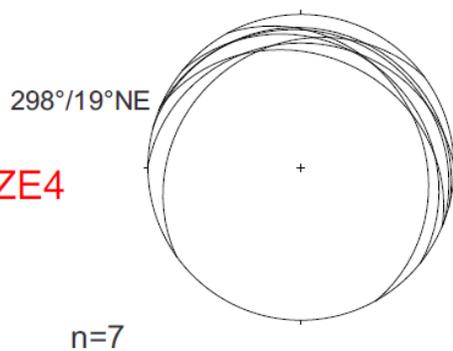


ZE3

n=10

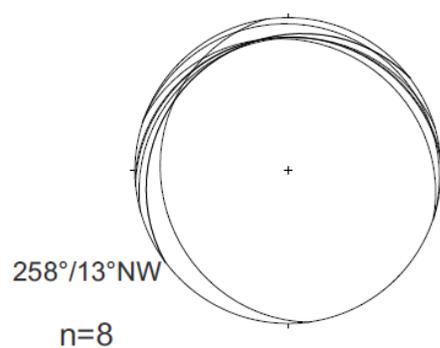


n=15



ZE4

n=7



n=8

Figura 14 Estereogramas con planos y polos de estratificación separados por zonas estructurales y secuencias estratigráficas. Se indican los datos de azimuth e inclinación promedio en cada estereograma.

3.7.3. Análisis de foliación metamórfica

Los estereogramas de foliación metamórfica se dividieron en dos zonas: norte y sur. Los de la zona norte incluyen datos medidos en la Sierra Calamajué y la Sierra San Francisquito y la zona sur incluye los medidos en la Sierra La Asamblea.

En la zona norte se observa una tendencia al NNW con un rumbo promedio de 328° y un echado de 52° al NE. Existe otra población más pequeña de foliaciones con un rumbo de 22° y un echado promedio de 75° al SE la cual corresponde a mediciones en el sur de la Sierra Calamajué y en el norte del área de estudio, en la Sierra San Francisquito.

En la zona sur (Sierra La Asamblea) las foliaciones presentan una mayor dispersión. La única pequeña familia es antepuesta a la tendencia en la zona norte con un rumbo de 147° y un echado de 68° al SW.

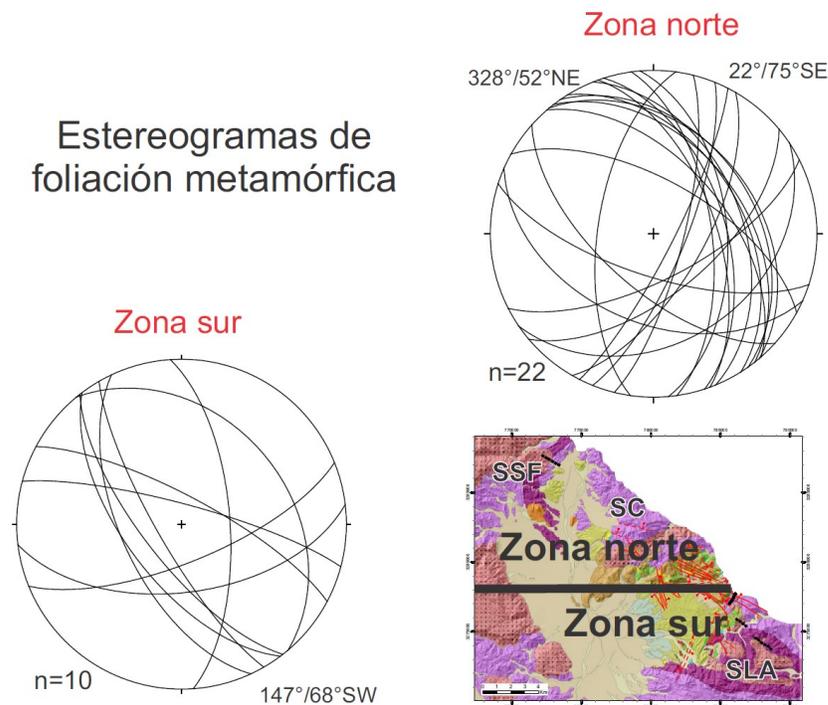


Figura 15 Estereogramas de foliaciones metamórficas de Pzm en la región de Calamajué. SSF, Sierra San Francisquito; SC, Sierra Calamajué; SLA, Sierra La Asamblea.

3.7.4. Análisis de paleocorriente

Las rosetas de paleocorriente graficadas para las unidades aluviales de Ms2, Ps3 y Ps4 nos muestran la evolución de la Cuenca Calamajué en su historia más reciente (**Figura 16**). La unidad Ms2, ubicada en el flanco norte de la Cuenca Calamajué, una roseta muestra dirección al E, mientras otras dos principalmente apuntan a una dirección SE, hacia el centro de la cuenca.

La unidad Ps3 presenta paleocorrientes de fuentes locales controladas por los altos topográficos alrededor de la cuenca. En el NW del mapa dos rosetas muestran un drenaje proveniente de la Sierra Calamajué con dirección al SW. En la porción sur de la cuenca dos rosetas de paleocorriente tienen una dirección NW provenientes de la Sierra La Asamblea. En el eje central de la cuenca, cuatro rosetas son consistentes en una dirección NE, hacia la costa del Golfo de California. Existe una variación importante en el flanco N de la cuenca, cerca de la Falla Calamajué, donde esta unidad drena hacia el N, según lo indican 4 rosetas que corresponden a cuatro sitios de medición.

Existe un claro cambio en la dirección de paleocorriente para la unidad Ps4, ya que cuatro rosetas muestran una dirección al W, contrario a la paleocorriente de la unidad Ms2 y las de Ps3 en el eje central de la cuenca. Esto sugiere la inversión de la cuenca y el levantamiento y será discutido en el capítulo 4.

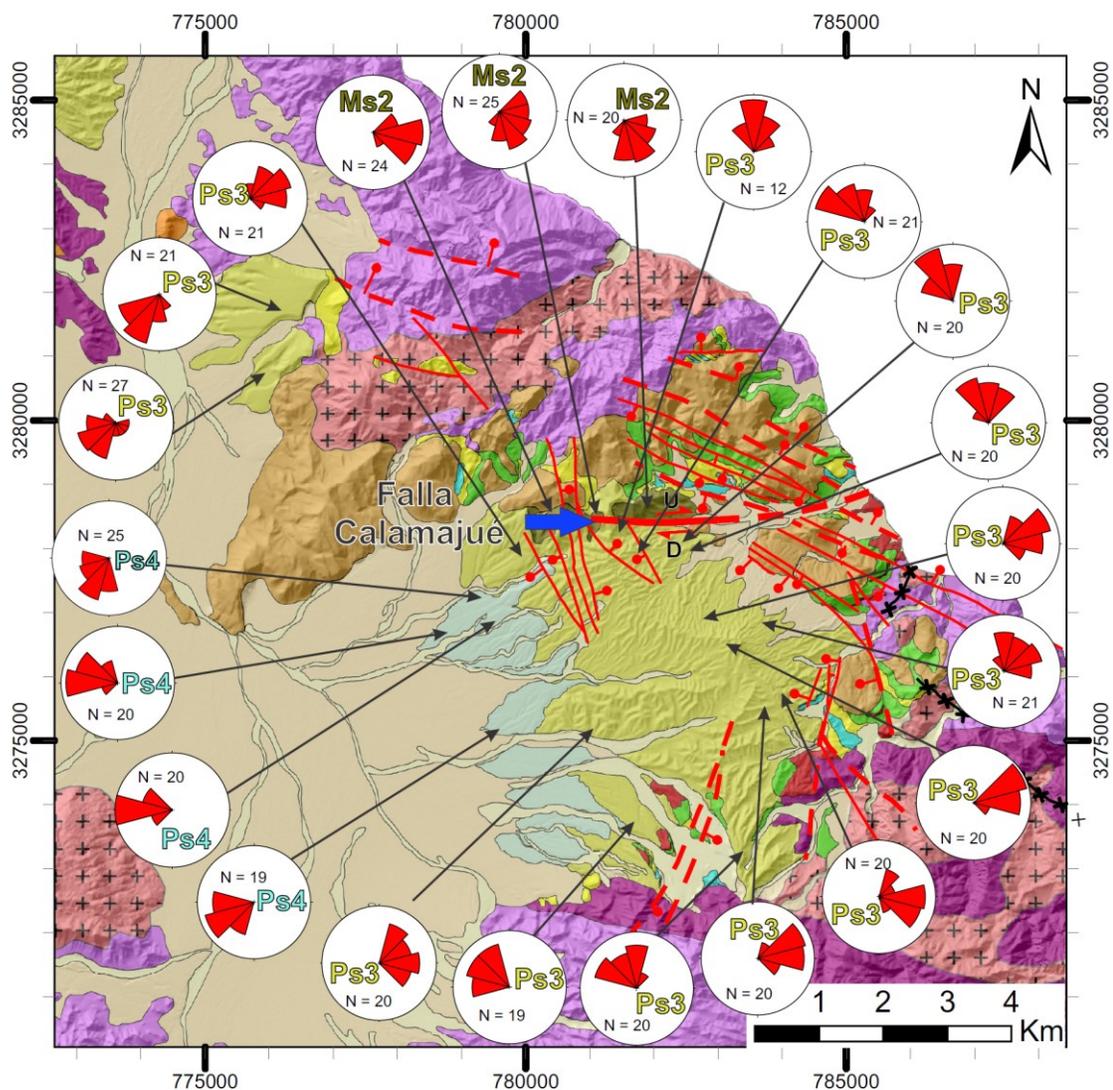


Figura 16 Mapa de paleocorriente de la Cuenca Calamajué. Se muestran rosetas de dirección de imbricación de clastos para las unidades Ms2, Ps3 y Ps4.

3.8. Secciones geológicas

En cuatro secciones se muestra la relación estratigráfica que guardan las unidades de la región de Calamajué, así como la geometría de las fallas que las cortan y basculan los estratos (**Figura 17**).

Sección A-A'

Se trazó esta sección con un rumbo azimutal de 114° (SW) y una longitud de 8 km. El basamento Pzm se encuentra exhumado en ambos extremos de la sección, al oriente en la Sierra San Francisquito y al poniente en la Sierra Calamajué, y también aflora en un remanente en la parte media de la sección, por lo tanto, se infiere su presencia a poca profundidad. Recargado sobre el basamento de la Sierra Calamajué, existen remanentes de los depósitos Os y Otr basculados 23° al NW. El domo de lava andesítico Md intrusióna facies cuarzosas de Pzm, y su espesor es de 170 m sin alcanzar la base. También existe otro remanente de esta lava al poniente del Arroyo Calamajué, sin embargo, ninguno de estos dos afloramientos se encuentra en contacto con el resto de las unidades, por lo que no es posible interpretar su posición estratigráfica. Depósitos aluviales de la unidad Ps3 sobreyacen las unidades miocénicas Os y Otr.

Sección B-B'

Esta sección muestra las características de la zona N de la Cuenca Calamajué. Tiene un rumbo de 65° azimutales y una longitud de 6 km. Los afloramientos de la S.Inf que se encuentran al N de esta sección a más elevación, lo que lleva a pensar que por debajo de Ps3 y Ms2 se encuentra el basamento Pzm, estando erosionada la S.Inf. En la porción NE de la sección, Os sobreyace por discordancia a Pzm, y a su vez Os es sobreyacida por Otr, Ms1 y Ma1.

La sección abarca la zona estructural 2 al oriente y la zona 3 al poniente. En la ZE2 las capas de Ms2 y Ps3 se encuentran echadas al oriente, y así lo hacen algunas fallas, sin embargo, las fallas más importantes de esta zona deben ser antepuestas, buzando al NE. El régimen cambia en la ZE3, donde las fallas importantes buzando al SW y los estratos buzando al NE. Las unidades de la S.Inf. están exhumadas en el extremo derecho de la sección por medio de una familia de fallas de alto ángulo que buzando al SE y basculan los estratos aproximadamente 25° al NE. La sección acaba en la línea de costa y en esta porción se infiere la presencia de fallas buzando al NE.

Sección C-C'

Esta sección se encuentra trazada desde la parte central de la Cuenca Calamajué, hasta la línea de costa de forma subparalela a la sección B-B'. Tiene un rumbo de 39° NE y una longitud de 3 km. En el lado derecho de la sección se muestra cómo la S.Inf. se depositó encima del basamento Pzm por discordancia.

En esta zona la S.Inf. cuenta con la presencia de Mb1, a diferencia que en la sección B-B', además de que Ms1 cuenta con un mayor espesor. En el extremo izquierdo de la sección se muestra a la unidad Ps3 sobre el basamento metamórfico Pzm, considerando que la S.Inf. en la parte central de la CC se encuentra erosionada.

La sección está en la ZE2 y la corta una familia de fallas, inferidas y medidas, echadas principalmente al SW, culminando con una falla antepuesta echada al NE.

Sección D-D'

Esta sección está trazada en la porción sur de la Cuenca Calamajué con un rumbo NW50°SE por una longitud de 3 km. En esta zona las unidades de la S.Inf. se encuentran recargadas sobre cuarcitas del basamento metamórfico Pzm y basculadas 20° al NW. La ausencia de Ma1 en superficie se interpreta como que la unidad en esta zona se ha erosionado o se encuentra enterrada. Sobre una superficie erosionada de Ms1 y por discordancia angular se depositó la unidad Ps3, la cual se encuentra también basculada en la misma dirección, pero solo 15°. En esta zona se reconoció la presencia de las cuatro lapillitas del Pleistoceno interestratificadas en Ps3. Por encima de Ps3 se encuentra la unidad Ps4, la cual no se encuentra basculada y, como se describió en el mapa de paleocorrientes, tiene una dirección de transporte al W.

La sección está ubicada dentro de la zona estructural 4 y se trazó en una dirección NW-SE para cortar perpendicularmente el rumbo de las capas. Fueron inferidas un par de fallas con rumbo SW-NE para explicar el echado al NW de las capas sedimentarias y la repetición vista en superficie de las unidades Otr y Os.

Secciones geológicas

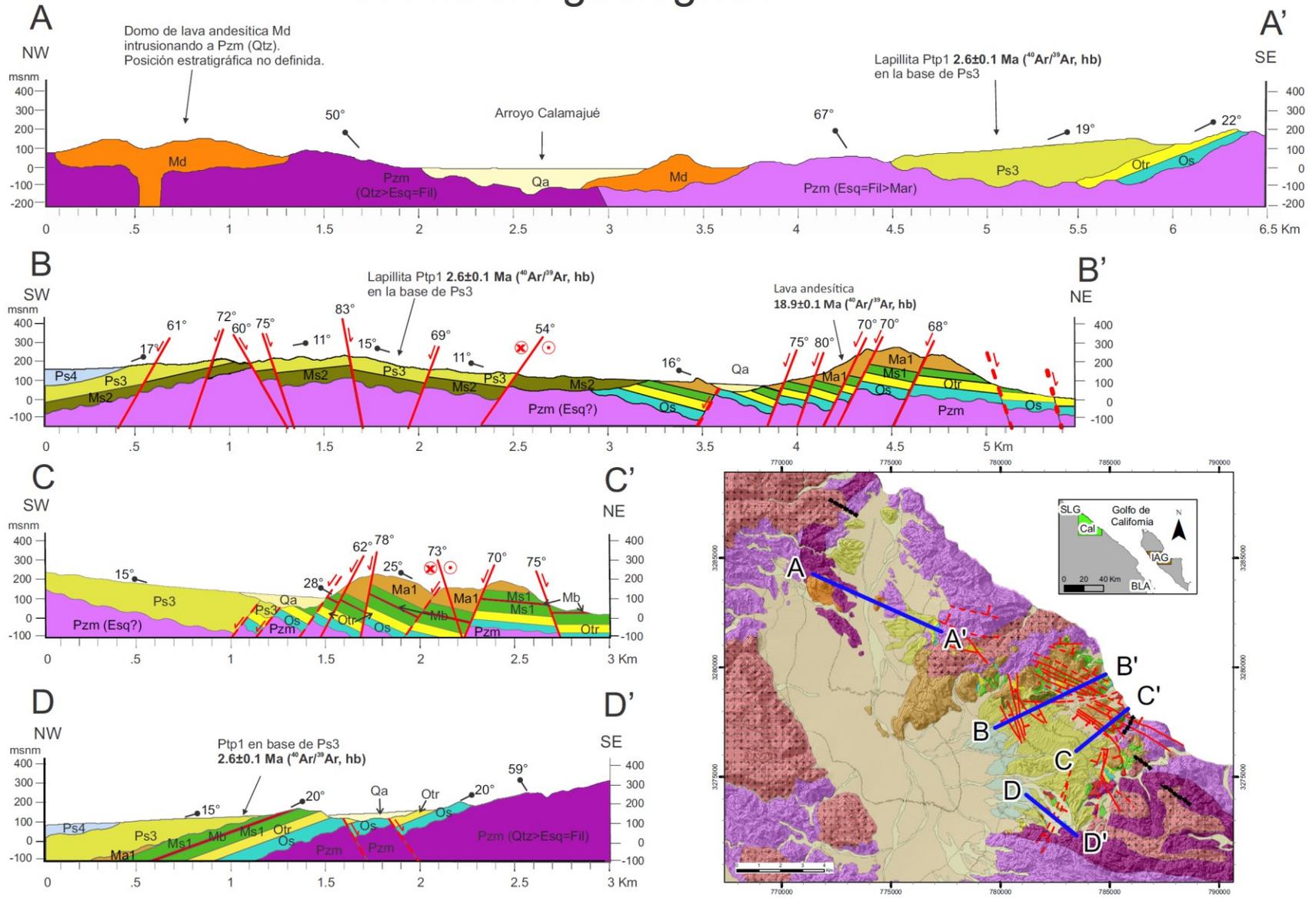


Figura 17 Secciones geológicas de la región de Calamajué

3.9. Geoquímica de elementos mayores

Se analizaron 11 muestras de roca volcánica de la región Calamajué FRX y se graficaron en diferentes diagramas de clasificación petrológica.

En el diagrama TAS las rocas grafican en la serie subalcalina a excepción de una de las dos muestras basálticas de Mb, la cual grafica en el límite inferior de la serie alcalina. Se observa que las rocas de la secuencia inferior son basalto y andesita. En el volcanismo de la secuencia superior, el caso de las lapillitas interestratificadas en Ps3, el vulcanismo varía de andesita basáltica a la riolita (**Figura 18, a**). Adicionalmente, el diagrama K_2O vs SiO_2 muestra que las rocas tienen un contenido de K_2O de medio a alto y caen dentro del campo de las rocas subalcalinas (**Figura 18b**).

En el diagrama AFM de Irvine y Barager (1971) se observa que Mb se encuentra en el límite superior de la serie calco-alcalina. Las rocas intermedias de la secuencia pre-rift (Ma1 y Md) presentan proporciones similares de los tres componentes. Por último, las lapillitas de la secuencia sin-rift tienen a definir la curva de campana del diagrama, culminando en un enriquecimiento en el total de álcalis para las rocas más diferenciadas (**Figura 19**).

Los diagramas Harker muestran el comportamiento esperado, con un empobrecimiento en Fe_2O_3 , Mn_2O_3 , MgO y CaO con el aumento de SiO_2 ; al contrario de Na_2O y K_2O los cuáles aumentan con el sílice. El Al_2O_3 tiene un comportamiento en forma de campana con el aumento de SiO_2 y disminuye en las muestras con más de ~60% de sílice (**Figura 20**).

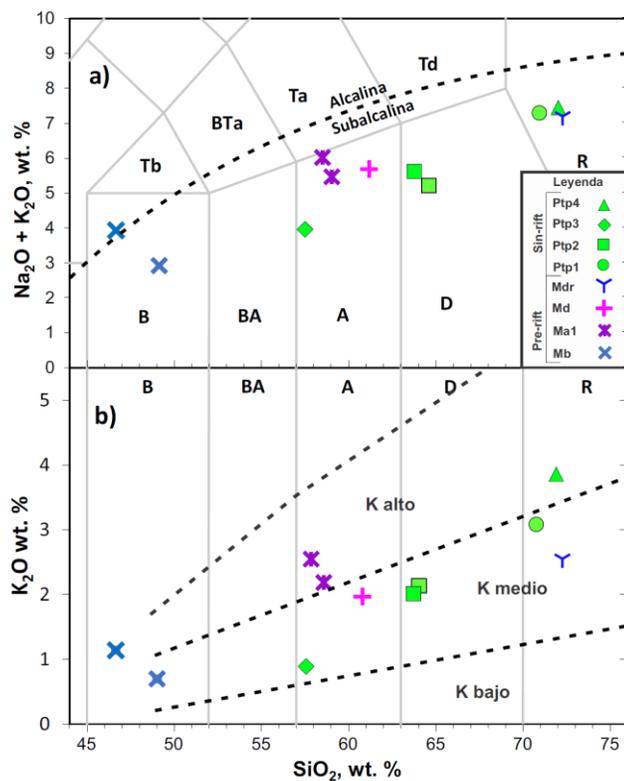


Figura 18 Diagramas para clasificación de rocas volcánicas. a) Diagrama de TAS (SiO_2 vs álcalis total; Le Bas et al., 1986) y b) Diagrama de K_2O vs SiO_2 (Peccerillo y Taylor, 1976). Se grafican las rocas volcánicas de Calamajué analizadas por FRX en roca total.

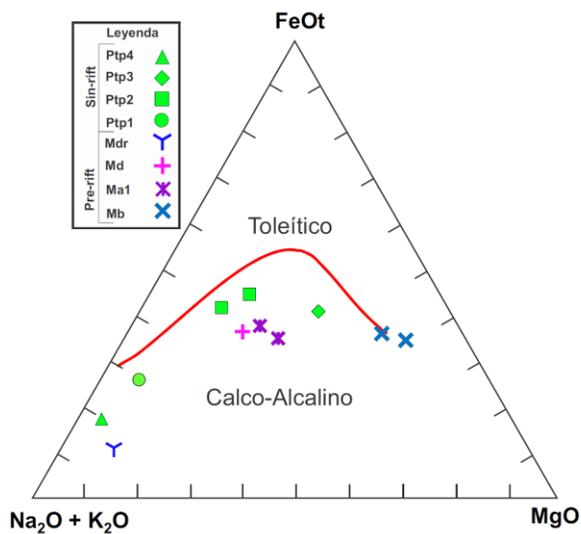


Figura 19 Diagrama AFM para la clasificación de rocas volcánicas subalcalinas (Irvine y Baragar, 1971).

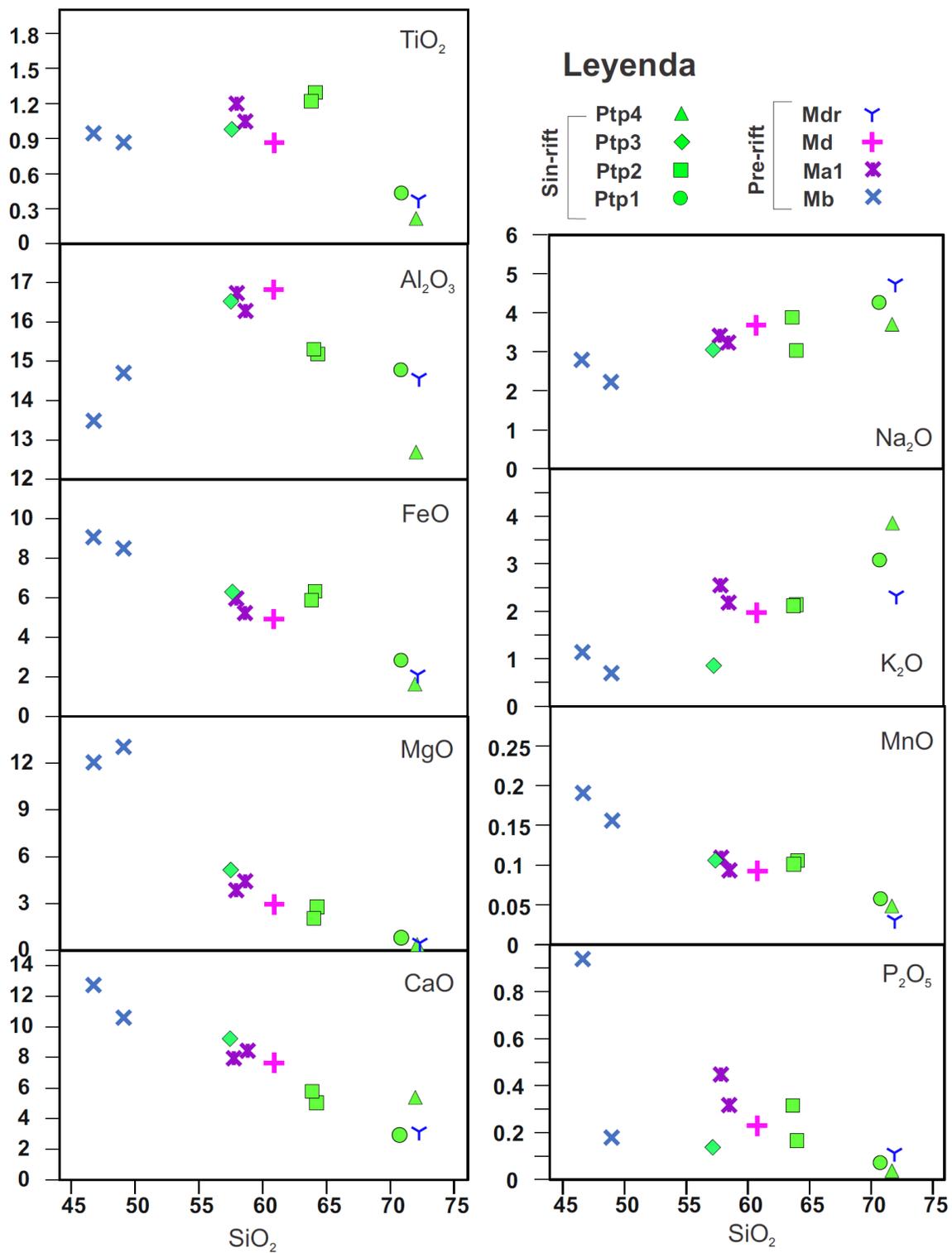


Figura 20 Diagramas de Harker de SiO₂ vs óxidos mayores de rocas volcánicas de la región de Calamajué.

3.10. Geoquímica de elementos traza

Se analizaron 9 lavas máficas de la región de Calamajué para conocer su concentración de elementos de tierras raras (ETR) y elementos traza.

Los arcnigramas de elementos traza para la secuencia inferior (pre-rift) presentan anomalías positivas en Ba, U, Pb y anomalías negativas importantes en Nb y Ta. No se distingue una anomalía negativa en Eu característica de cristalización fraccionada de las plagioclasas.

Los valores de fraccionamiento de ETR totales (La/Yb) están entre 4.83 - 8.67 en tres muestras de la Sinf (Mdr, Md y Cal18-11 de Mb), sin embargo, las dos muestras de Ma1 y una muestra de Mb (Cal19-04) presentan valores de La/Yb entre 16.11–20.26 (**Figura 21** y **Figura 22**; Tabla de fraccionamiento). El fraccionamiento de ETR pesadas (Gd/Yb) también es alto en Ma1 y la muestra Cal19-04 de Mb (entre 3.0 y 5.55) en comparación con las lavas Mdr, Md y Cal18-11 de Mb (1.43 - 1.83).

Los valores altos de ETR ligeras en Ma1 y Mb con respecto al resto de las lavas de la Sinf, además de la diferencia entre las dos muestras de Mb serán discutidas en el siguiente capítulo.

Para el arcnigrama de elementos traza de las lavas sin-rift (Ssup) se observan anomalías positivas en K y Pb y anomalías negativas en Nb y Ta. A diferencia de la Sinf, las lavas sin-rift más diferenciadas (Ptp1 y Ptp2) muestran anomalías negativas en Eu (**Figura 21**).

Para la secuencia Sin-rift (S.inf.) el fraccionamiento de ETR totales se encuentra entre 3.12 - 6.24. Las ETR ligeras tienen valores de fraccionamiento de 1.71 a 3.24. El fraccionamiento de ETR pesadas en estas lavas está entre 1.34 - 1.5.

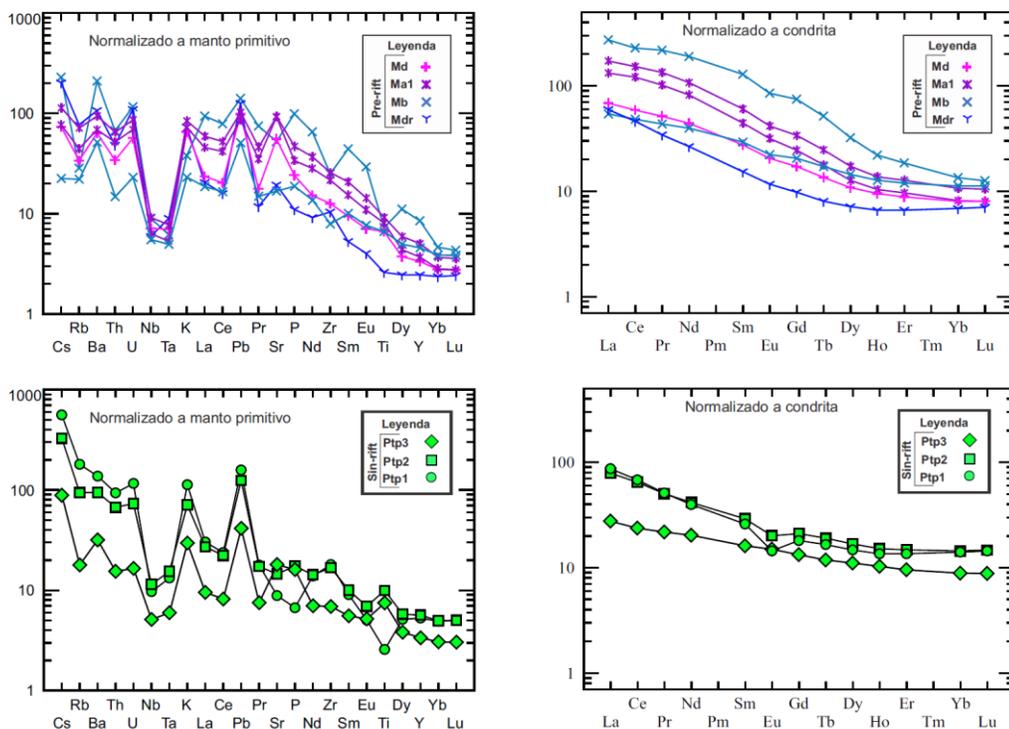


Figura 21 Aracnigrama de distribución de elementos traza de rocas volcánicas de la región de Calamajué normalizados a los valores de manto primitivo de Pierce (1983) y diagrama de distribución de tierras raras normalizadas a los valores de condrita (Sun y McDonough, 1989).

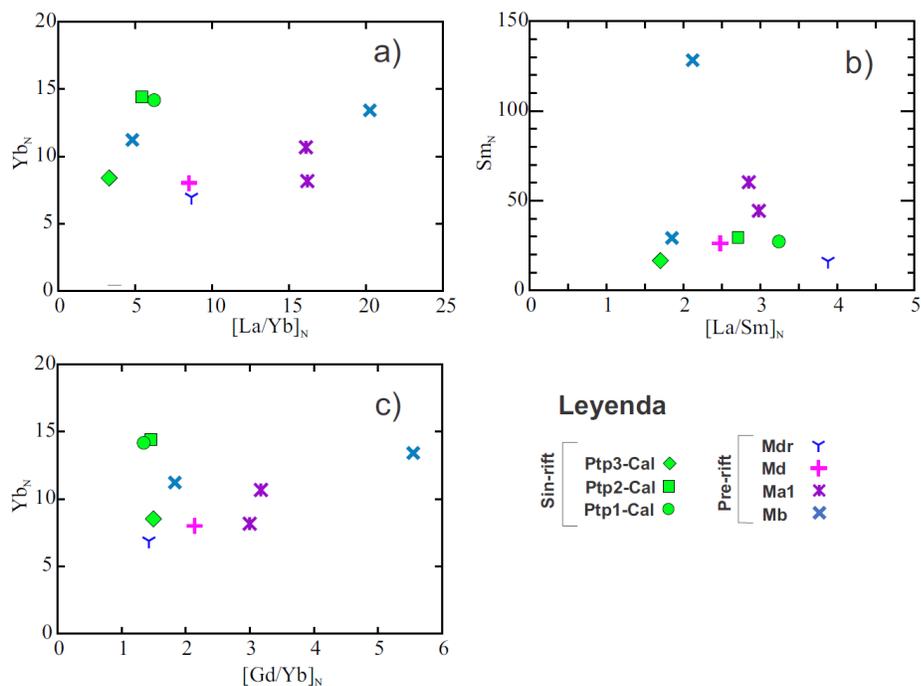


Figura 22 Grado de fraccionamiento de los elementos de tierras raras (ETR). a) Fraccionamiento de ETR totales; b) Fraccionamiento de ETR ligeras; c) Fraccionamiento de ETR pesadas.

Tabla 3: Grados de fraccionamiento de ETR normalizados a los valores de condrita (Sun y McDonough, 1989) de las lavas analizadas para este trabajo y dos lavas analizadas por Martín-Barajas et al. (1995) en la Provincia Volcánica de Puertecitos (PVP)

Grado de fraccionamiento de tierras raras						
Localidad	Secuencia	Clave	Unidad	[La/Yb]N	[La/Sm]N	[Gd/Yb]N
Calamajué	Sin-rift	CAL17-14A	Ptp3	3.12	1.71	1.50
		CAL17-14B	Ptp2	5.46	2.71	1.46
		CAL17-21	Ptp1	6.24	3.24	1.34
	Pre-rift	CAL17-15	Md	8.51	2.49	2.14
		CAL17-11	Ma1	16.20	2.98	3.00
		CAL17-19	Ma1	16.11	2.85	3.17
		CAL19-04	Mb	20.26	2.12	5.55
		CAL18-11	Mb	4.83	1.85	1.83
CAL18-13	Mdr	8.67	3.88	1.43		
Isla Ángel de la Guarda	Sin-rift	IAG18-1	Ptp3	5.27	2.54	1.51
		IAG18-2	Ptp2	4.51	2.31	1.51
		IAG18-3	Ptp1	6.17	3.35	1.29
	Pre-rift	IAG19-19	Ma1	8.74	3.01	1.88
		IAG19-20	Ma1	6.00	2.40	1.73
PVP ¹	Pre-rift	VC87-10	Tmb	21.44	2.82	0.46
		VC87-54	Tmb	19.44	3.58	0.40

¹ Martín-Barajas et al., 1995. PVP: Provincia Volcánica de Puertecitos

3.11. Correlación de unidades volcánicas de Calamajué e Isla Ángel de la Guarda

Con fines comparativos y de posible correlación de unidades se realizó un reconocimiento a la zona central de Isla Ángel de la Guarda, en donde afloran unidades volcánicas con posible correlación a través del Canal de Ballenas. En el área de Calamajué se encontraron cuatro depósitos de lapilita de pómez, que se interpretan como depósitos de caída libre. En la zona Los Machos de la Isla Ángel de la Guarda, Cavazos-Álvarez (2015) y Hernández-Ramos (2018) reportaron tres lapilitas de pómez con características similares a las de Calamajué y que se interpretaron también como depósitos de caída libre.

Con el propósito de correlacionar estas unidades (Ptp) se compararon sus resultados en diagramas de TAS y Harker de su composición en vidrio volcánico y en roca total. Además, se utilizaron los arcnigramas de elementos traza y los diagramas de elementos de Tierras Raras normalizados a condritas. Adicionalmente, se graficaron diagramas ternarios de plagioclasas y piroxenos de los microcristales analizados por EPMA.

En la simbología se usó una misma figura geométrica para las unidades potencialmente correlacionables empleando color verde para Calamajué y el color naranja para Isla Ángel de la Guarda.

En este apartado se utilizará el sufijo “Cal” en el nombre de la unidad (e.g. Ptp1-Cal) para nombrar las lapilitas de Calamajué y el sufijo “IAG” para nombrar las de Isla Ángel de la Guarda.

Los resultados muestran tres pares similares de lapilitas entre la región de Cal e IAG; un par riolítico (círculos), uno con composición dacítica (cuadrados) y uno de andesitas (rombos). Para las lapilitas riolíticas (Ptp1-Cal y Ptp1-IAG), tanto la geoquímica de mayores como de elementos traza y de microcristales muestran gran similitud. Los óxidos mayores y elementos traza de las dacitas Ptp2-Cal y Ptp3-IAG son muy parecidos entre ellos, aunque la muestra de IAG es de textura más afanítica en comparación con la muestra Cal. Esta diferencia textural no permite la comparación y/o correlación con base en microcristales. Las pómez andesíticas Ptp3-Cal y Ptp2-IAG muestran que la composición de óxidos mayores es similar, así como la geoquímica de sus microcristales. No obstante, Ptp3-Cal muestra menor concentración de elementos traza incompatibles que Ptp2-IAG (**Figura 23, 24 y 25**). Por último, la lapilita Ptp4-Cal solo fue analizada por FRX en roca total, y es similar a las otras lapilitas riolíticas analizadas, sin embargo, su posición estratigráfica en la cima de la secuencia Ps3 indica que esta unidad solo está presente en Calamajué.

3.11.1. Geoquímica de vidrio volcánico y roca total en lapillitas

Los resultados promedio de la geoquímica del vidrio volcánico entre Ptp1-Cal y Ptp1-IAG (círculos) muestran las mayores diferencias de porcentaje de peso (wt %) en Na₂O (1%), SiO₂ (0.9%) y K₂O (0.3%). Para las lapillitas Ptp2-Cal y Ptp3-IAG (cuadrados) los óxidos mayores son casi idénticos, solo se observa una diferencia de 0.9% en Al₂O₃ y 0.7% en Na₂O. En el caso de Ptp3-Cal el SiO₂ varía en 4.7% con respecto a Ptp2-IAG, mientras el MgO lo hace en 3.6% y el CaO en 1.9% (**Figura 24**).

Los diagramas TAS y Harker de roca total muestran pequeñas diferencias en los elementos en SiO₂ (0.9%), Al₂O₃ (0.45%) y en Fe₂O₃ (0.6%) entre las dos riolitas (Ptp1-Cal y Ptp1-IAG). Mientras tanto, la dacita Ptp2-Cal es casi idéntica a Ptp3-IAG solo mostrando una diferencia de 0.8% en Al₂O₃ y de 0.4% en Na₂O, muy similar a la geoquímica de vidrio volcánico. Para el caso de las tefras de composición andesítica Ptp3-Cal y

Ptp2-IAG (rombos) las diferencias entre ellas se minimizan con respecto al vidrio volcánico, teniendo desfaces de 0.7% en SiO₂, 1.1% en MgO y 1.2% en CaO.

Elementos traza en lapillitas

La correlación de las unidades Ptp1-IAG y Ptp1-Cal muestran un comportamiento muy similar en el diagrama normalizado a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) con ligeras variaciones en Cs, Rb, Sr y Ti. En el diagrama de REE normalizado a condrita (Sun y McDonough, 1988) el Eu es el único elemento que muestra una variación visible, sin embargo, ambos presentan la anomalía negativa de este elemento característica de la cristalización fraccionada de la plagioclasa (**Figura 25**).

La unidad Ptp3-IAG muestra un pico positivo en P con respecto a Ptp2-Cal en el diagrama normalizado a manto primitivo, sin embargo, se tiene que considerar que el P es un elemento muy móvil, o que puede estar concentrado si un microlito de apatito se incluye en el análisis. El diagrama normalizado a condrita muestra valores empalmados en sus REE con una ligera anomalía negativa en Eu en ambas muestras.

En el caso de las pómez de andesita, a pesar de presentar distribuciones paralelas o, en otras palabras, con las mismas anomalías positivas y negativas, Ptp3-Cal muestra un empobrecimiento en elementos traza incompatibles con respecto a Ptp2-IAG. A diferencia de las dacitas y riolitas, las andesitas no presentan anomalía negativa en Eu.

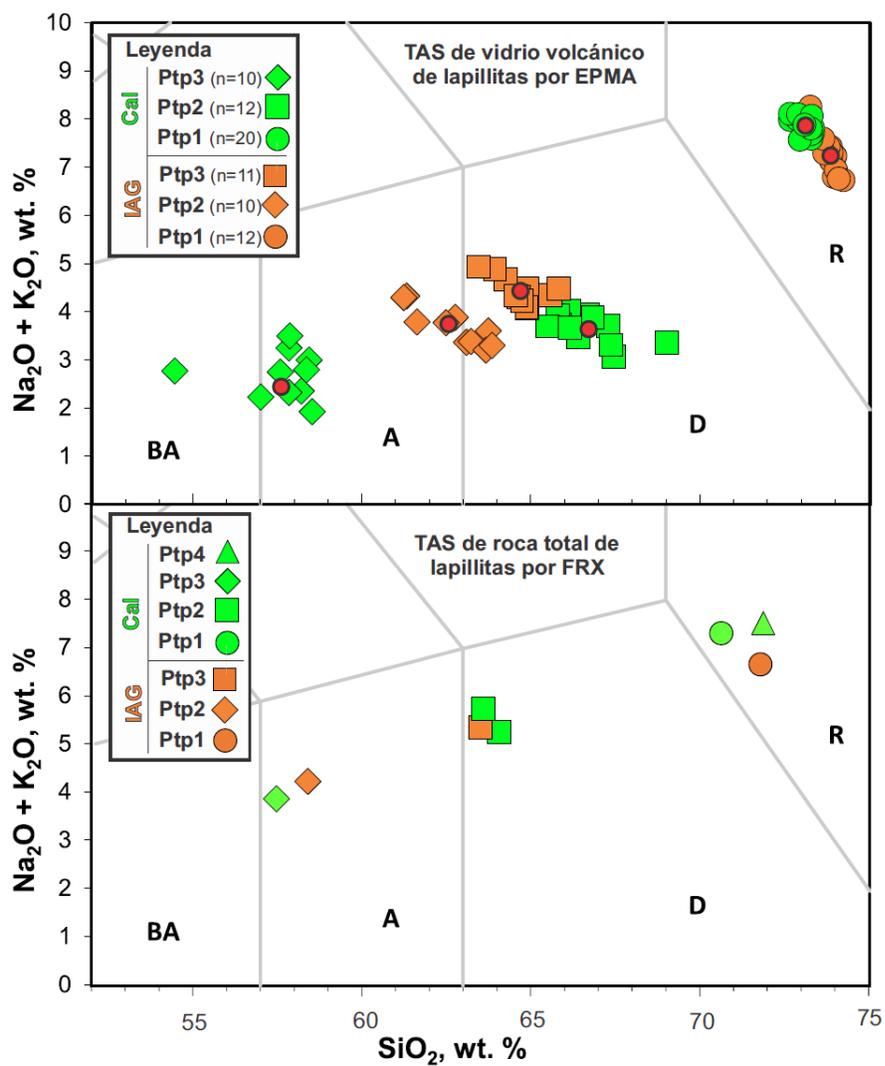


Figura 23 Diagrama TAS (Total de alkalis vs SiO_2) de lapillitas del Plio-Pleistoceno de IAG y Cal. Arriba diagrama de composición de vidrio volcánico de lapillitas con punto rojo promedio para cada unidad; Abajo diagrama de composición de roca total de lapillitas

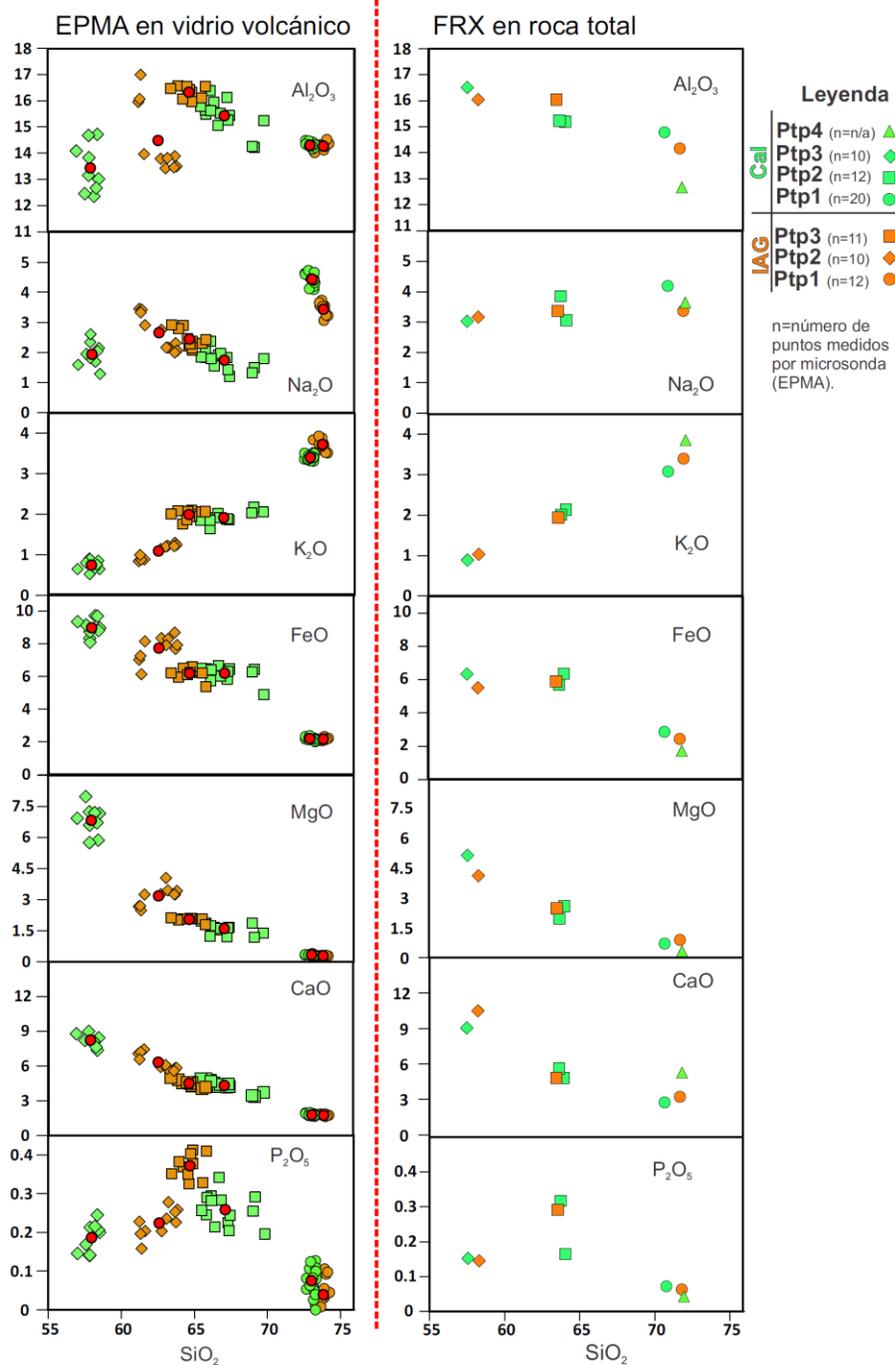


Figura 24 Diagramas de Harker de SiO₂ vs óxidos mayores de lapilitas en la región de Cal (color verde) y la cuenca central de IAG (color naranja) analizados por microsonda (EPMA) en vidrio volcánico (izquierda) y por FRX en roca total (derecha).

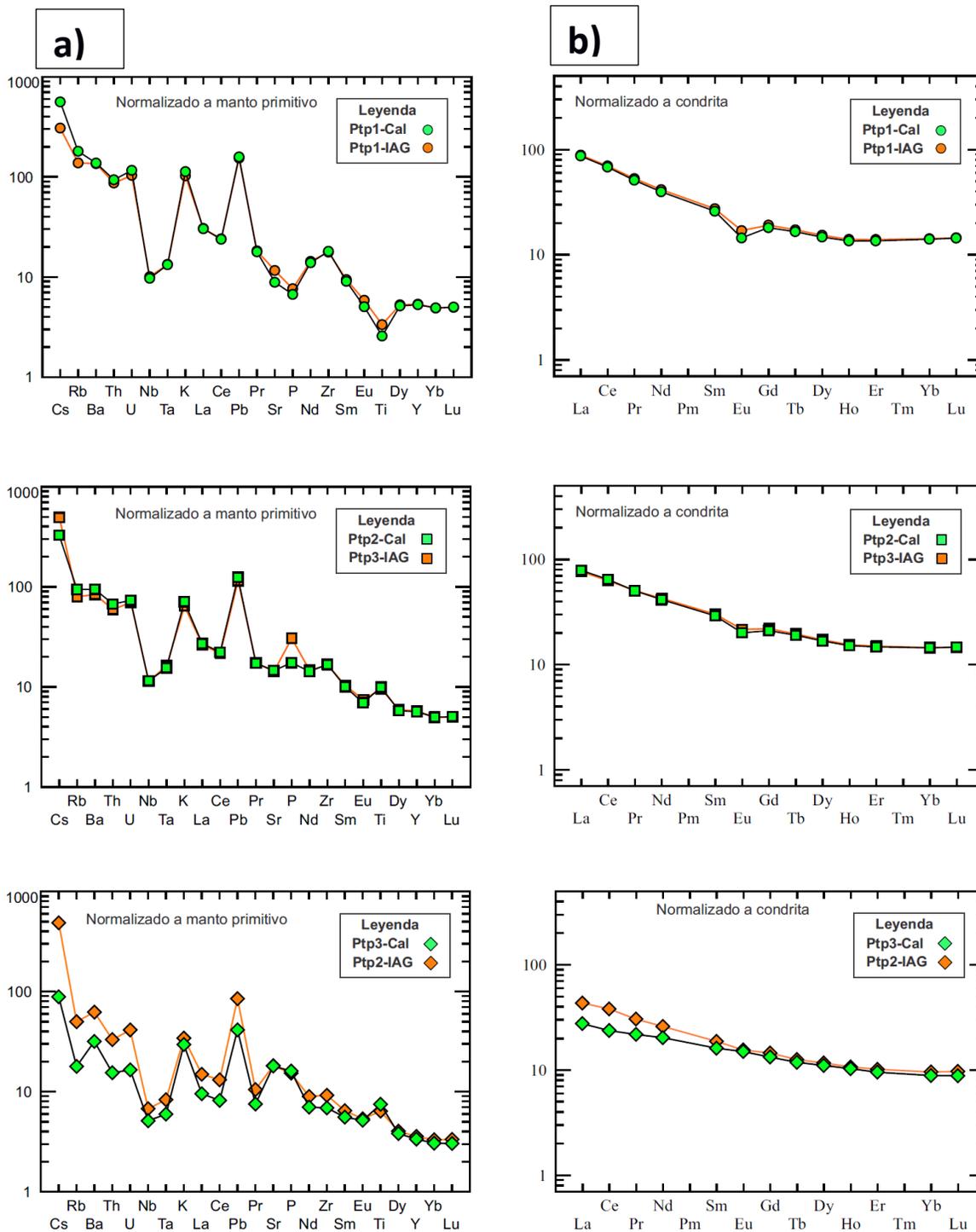


Figura 25 a) Distribución de elementos traza normalizadas a los valores de manto primitivo (Pierce, 1983). b) Distribución de tierras raras normalizadas a los valores de condrita (Sun y McDonough, 1989). Se separan en unidades potencialmente correlacionables.

3.11.2. Diagramas ternarios de plagioclasas

En este diagrama se grafican la proporción molar de K, Na y Ca en plagioclasas y feldespatos. La ortoclasa es el extremo superior (100% de K u Or_{100}), la albita el de la izquierda (100% de Na o Al_{100}) y la anortita el de la derecha (100% de Ca o An_{100} ; **Figura 26**).

En las lapillitas riolíticas se puede observar que en la unidad Ptp1-CAL las plagioclasas varían en un rango composicional de An_{45} (andesina) a An_{55} (labradorita), mientras para la unidad Ptp1-IAG las plagioclasas son andesina (An_{41-49}) y solo una plagioclasa grafica en el campo de labradorita (An_{56}).

Para el diagrama de lapillitas de composición intermedia (andesitas y dacitas), en la unidad Ptp2-Cal observamos ocho plagioclasas en el rango de An_{46} (andesina) y An_{55} (labradorita). Esta muestra presenta dos datos que se separan de la población principal, uno es oligoclasa y el otro es sanidino, casi en el extremo de la ortoclasa, y es posible que se trate de cristales accidentales. En la unidad Ptp3-IAG solo se analizaron tres plagioclasas andesina (An_{41}) con un contenido de K relativamente alto (3% a 5%) para este mineral.

Las plagioclasas de las unidades Ptp3-Cal y Ptp2-IAG son las más cálcicas y guardan similitud entre ellas. En la Ptp3-Cal se analizaron dieciséis plagioclasas las cuales clasifican en su totalidad como labradorita (An_{62-68}), mientras que en Ptp2-IAG el resultado de diez cristales de plagioclasas también indica labradorita (An_{56-66}).

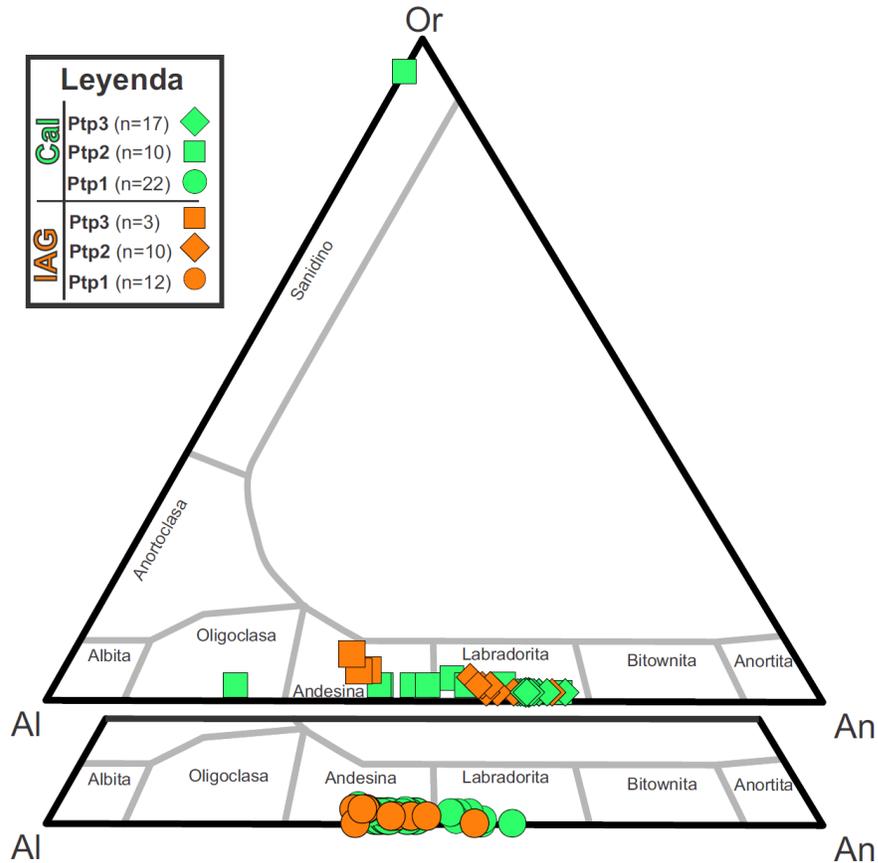


Figura 26 Diagrama de clasificación de plagioclasas de Ribbe (2018) con base en su contenido de K, Na y Ca. Or, Ortoclasa (100% de K); Al, Albita (100% de Na); An, Anortita (100% de Ca); Cal, Calamajué; IAG, Isla Ángel de la Guarda.

3.11.3. Diagramas ternarios de piroxenos

En este diagrama de clasificación se grafica el contenido de Ca, Mg y Fe de un piroxeno. El extremo inferior izquierdo es la clinoenstatita (100% de Mg o En_{100}) y en el inferior derecho tenemos la clinoferrosilita (100% de Fe o Fs_{100}). El extremo superior es la Wollastonita (100% de Ca o Wo_{100}), el cual no es un piroxeno sino un piroxenoide, sin embargo, es comúnmente usado en este diagrama para representar el extremo cálcico. En este trabajo se utilizará el extremo Wo para términos prácticos de la descripción (**Figura 27**).

Se analizaron dieciocho cristales de piroxeno en Ptp1-Cal, de los cuales catorce grafican en el campo de la clinoenstatita rica en Fe ($\sim Wo_3, En_{53}, Fs_{44}$), mientras los cuatro restantes son augitas ricas en Ca y Mg ($\sim Wo_{43}, En_{37}, Fs_{20}$). Para la unidad Ptp1-IAG de los nueve piroxenos medidos, ocho se clasifican como clinoenstatitas ricas en Fe ($\sim Wo_3, En_{53}, Fs_{44}$) y el restante como augita baja en Ca ($Wo_{28}, En_{44}, Fs_{28}$).

Para la unidad Ptp2-CAL la química de seis piroxenos los clasifica en el dominio de la clinoenstatita rica en Fe ($\sim\text{Wo}_2, \text{En}_{55}, \text{Fs}_{43}$), otros nueve son augitas ricas en Ca y Mg ($\sim\text{Wo}_{41}, \text{En}_{39}, \text{Fs}_{20}$) y otro dato grafica como augita. De unidad Ptp3-IAG solo fue identificado un piroxeno de tipo augita baja en Ca ($\sim\text{Wo}_{27}, \text{En}_{41}, \text{Fs}_{32}$).

En Ptp3-Cal se analizaron nueve piroxenos de tipo pigeonita ($\sim\text{Wo}_{13}, \text{En}_{71}, \text{Fs}_{16}$), similares a ocho piroxenos medidos en Ptp2-IAG ($\sim\text{Wo}_{14}, \text{En}_{69}, \text{Fs}_{17}$).

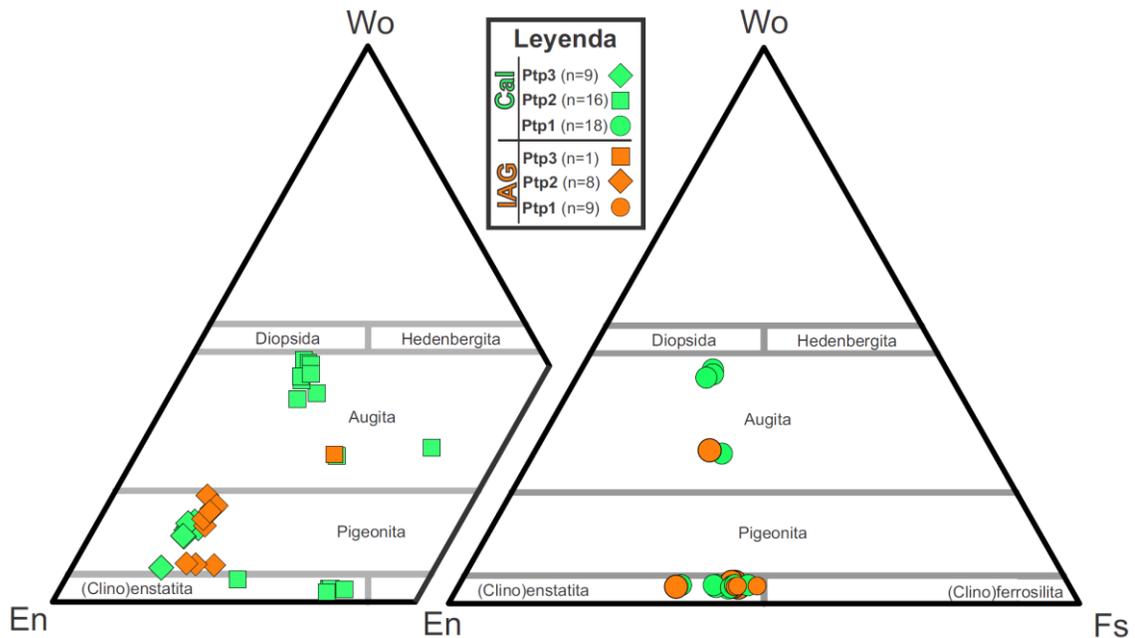


Figura 27 Diagrama ternario para clasificación de piroxenos con base en su contenido de Ca, Mg y Fe (Morimoto, 1988). Wo: Wollastonita (100% de Ca); En, enstatita (100% de Mg); Fs, Ferrosilita (100% de Fe); Cal, Calamajué; IAG, Isla Ángel de la Guarda

Capítulo 4. Discusión

En este capítulo se discutirán los resultados en diferentes tópicos: 1) Cronoestratigrafía; 2) Composición del volcanismo; 3) Análisis de la Cuenca Calamajué; y 4) Correlación de unidades entre la región de Calamajué y la cuenca central de Isla Ángel de la Guarda.

4.1. Cronoestratigrafía y deformación

La estratigrafía de la región de Calamajué representa dos eventos tectonomagmáticos mayores; uno es la actividad del arco Comondú del Mioceno Temprano y otro es el desarrollo del rift oblicuo o transtensivo que caracteriza actualmente al Golfo de California. Estos eventos están representados por dos secuencias separadas por una discordancia erosional y angular. La secuencia inferior contiene a las unidades volcánicas y sedimentarias acotadas entre ~ 28 y 19 Ma. La secuencia superior es de edad menor a ~2.6 Ma.

La secuencia inferior comienza con la unidad Os, compuesta de arcosas con facies subordinadas de conglomerado. Esta unidad sobreyace al basamento cristalino y contienen líticos volcánicos intermedios y félsicos que no están representados en Calamajué. Los zircones detríticos de Os son predominantemente del Cretácico, pero la población de zircones de ~28 Ma representa la edad máxima de depósito (**Figura 11**) y su fuente se atribuye al primer pulso de volcanismo silíceo del Oligoceno de la Sierra Madre Occidental (SMO), según las edades reportadas en Sonora y Chihuahua (Aranda-Gómez et al. 2000; Ferrari et al., 2007). Esta fuente en la SMO también explicaría la procedencia de los clastos volcánicos de dacita y riolita en Os, que posiblemente son también de edad Oligoceno. La población dominante de 97 Ma (Cretácico Tardío) es de fuente local y coincide con el rango de edades reportadas en el Cinturón Batolítico Peninsular del norte de Baja California (Schmidt et al., 2014; Ortega-Rivera, 2003).

El primer depósito volcánico en Calamajué es una toba riolítica (Otr) que incluye líticos accidentales de rocas metamórficas del basamento. Su espesor alcanza hasta 50 m pero tiene interrupciones que sugieren que la toba comprende varios pulsos explosivos consecutivos. La datación de esta unidad está en proceso, pero claramente esta unidad antecede al vulcanismo local y se interpreta como facies medias a distales (¿?) de flujos piroclásticos procedentes de la SMO.

La unidad Ms1 son depósitos aluviales con clastos de fuente local, ya que incluye clastos de Mb, que son flujos de lava basáltica que afloran en la franja costera y el margen sur de la cuenca (**Figura 5**). Ms1 también incluye clastos andesíticos y dacíticos de Md1. Estos depósitos presentan estratificación cruzada hamacada típica de eventos de corte y relleno de alto régimen de flujo (Cheel y Leckie, 1993). Estos depósitos aluviales son contemporáneos con lavas basálticas (Mb) en la zona. Sin embargo, no se pudo identificar si los depósitos aluviales están asociados con un relieve estructural o si se trata de la erosión del relieve volcánico.

En la región de Loreto, Umhoefer et al. (2001), describen la parte inferior del arco Comondú como un paquete de arenisca y conglomerado fluvial con intercalaciones de tobas y lavas basálticas, similar a lo reportado en este trabajo con las unidades Os, Otr, Ms1 y Mb.

El volcanismo de la secuencia inferior consiste en flujos de lavas basálticas (Mb) y andesíticas (Ma1 y Md). La lava andesítica Ma1 cuenta con una edad de 18.9 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hb), interpretada como edad de erupción de la lava y corona la secuencia inferior y es posiblemente de fuente cercana, aunque no se entraron diques alimentadores en la zona de estudio.

El domo de lava andesítica Md es una unidad local y se encuentra descansando sobre el basamento metamórfico, pero no se encontró otra relación estratigráfica que acote su edad de extrusión, sin embargo, edades de erupción de lavas dacíticas y andesíticas similares por su textura porfirítica y modo de extrusión ocurren en el norte de IAG en donde han sido reportadas edades de 17.7 ± 0.6 Ma (Ar-Ar, hb; Delgado-Argote, 2000), 15.6 ± 0.2 y 13.3 ± 0.2 Ma (Ar-Ar, hb; Martín-Barajas et al., 2008), mientras en la cuenca central de IAG, Hernández-Ramos (2018) reporta edades de cristalización de lavas andesíticas en 16.3 ± 0.4 Ma y 16.4 ± 0.2 Ma (U-Pb, zn). La edad de la unidad Md puede ser similar a estas edades, y las similitudes geoquímicas entre este domo y lavas andesíticas de IAG se discuten más adelante.

Los diques afaníticos Mdr encontrados cerca de la costa son de composición riolítica, están cortando al basamento y se considera que son parte de la actividad volcánica del Mioceno. El equivalente efusivo de estos diques no fue reconocido en el área de estudio, sin embargo, se ha reportado vulcanismo riolítico en la cuenca central de IAG con una edad de ~ 10 Ma (Hernández-Ramos, 2018).

La secuencia superior son depósitos aluviales conglomeráticos de fuente local y depósitos piroclásticos de caída libre. El primero de estos pulsos es la lapillita riolítica Ptp1, la cual cuenta con una edad de 2.6 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hb), interpretada como edad de erupción de la lava. La fuente de esta actividad volcánica estaría

ubicada al este en la zona de deformación del Canal de Ballenas y la cuenca Delfín Inferior (**Figura 1 y Figura**) y claramente están relacionadas con la tectónica transtensiva. Sin embargo, la zona de estudio no contiene unidades volcánicas del Plioceno Tardío y Plioceno que permitan definir el inicio de la deformación transtensional en la zona de estudio.

La secuencia inferior se encuentra cortada mayormente por fallas con rumbo NNW-SSE. En la ZE1 no se encontraron unidades de esta secuencia, más que Md, que no se encuentra cortada por fallas importantes. En la ZE2 la secuencia está cortada mayormente por fallas con rumbo NNW y el basculamiento de las capas es de 23° al WSW, además, algunas de estas fallas presentan estrías de movimiento dextral. Las fallas con mayor desplazamiento que cortan a esta secuencia se encuentran en la Ensenada Blanca, en la zona estructural 3 (ZE3) y son de rumbo ESE, basculando la secuencia al NNE aproximadamente 22° (ver sección B-B' y C-C' en Figura). Es posible que la acción de estas fallas exhumó los bloques coronados por Ma1 en la Ensenada Blanca. En el sur de la Cuenca Calamajué, en la ZE4 las capas de la Sinf están basculadas al NNE 19 y cortadas por fallas con rumbo NNW-SSE, similar a la ZE3.

La secuencia superior presenta un basculamiento de 16° al SSE en la ZE1 y en la ZE4 el basculamiento es de 13 al NNW. Al igual que la secuencia inferior, esta secuencia está basculada al WSW en la ZE2, pero solo 15°, es decir, hay una diferencia de 8° menos que en la Sinf, y está cortada por fallas NNW-SSE. En la ZE3 las fallas no presentan una dirección dominante y su orientación tiene gran dispersión, aunque en general son de rumbo NE-SW y el echado de las capas es de 19° al ESE. En esta zona se encuentra la Falla Calamajué que contra el relieve topográfico al norte de la cuenca y tiene estrías laterales. Aunque no fue posible estimar un desplazamiento de esta falla, su importancia se discutirá en el análisis de la cuenca. En la ZE4 la secuencia superior está basculada 13 al NNW y está cortada por fallas ~NNW-SSE.

En general, la región de Calamajué está afectada por fallas oblicuas con componente normal y movimiento dextral de rumbo ~NNW-SSE y con altos ángulos de echado. Estas fallas laterales tienen una orientación subparalela a los ~135° de rumbo de la Falla Canal de Ballenas (FCB) y las fallas de la Zona de Fracturas Volcanes (ZFV) ubicadas al SE y al NE de Calamajué, respectivamente. De manera general los datos de foliación metamórfica revelan un rumbo NNW-SSE de los planos, muy similar al rumbo promedio de las fallas afectando a la región. Esto podría significar que la foliación sirvió como planos de debilidad para el desarrollo de fallas neogénicas en esta región.

En la ZE 1 y ZE4, los conglomerados aluviales de la secuencia superior se encuentran basculadas al SSE y al NNW, respectivamente. Es posible que las fallas que controlan el basculamiento de los estratos en estas

zonas sean de rumbo ~E-W, oblicuas a la orientación de la FCB y a la ZFV y de orientación más similar a las estructuras de la Cuenca Delfín Inferior, las cuales son de rumbo NW-SE (Martín-Barajas et al., 2013).

La diferencia de basculamiento de 8° entre las secuencias inferior y superior en la ZE2 implica deformación previa a los ~2.6 Ma, que es la edad de la unidad de lapillita Ptp1 (Cal17-13) en la base de la secuencia superior. El hiato estratigráfico que existe entre la secuencia inferior y la secuencia superior representa el intervalo de tiempo de ~18 a 2.6 Ma, lo que no permite acotar la edad de la extensión temprana.

En regiones vecinas, como en el campo volcánico de San Luis Gonzaga al norte de Calamajué, el inicio de la extensión es posterior a ~14 Ma (Martín et al., 2000). En Isla Ángel de la Guarda la extensión temprana está acotada entre los 16 y 12 Ma (Hernández-Ramos, 2018), aunque la principal deformación en la isla es posterior a los 12 Ma y estaría asociada a la etapa transtensional del rift que activó la falla Tiburón al este de la isla (Aragón-Arreola y Martín-Barajas 2007; Mar-Hernández et al., 2011; Martín-Barajas et al., 2013)

4.2. Composición del volcanismo

Los flujos de lava basáltica (Mb) tienen una composición heterogénea y difieren en su fuente. Dos muestras de Mb muestran diferencias geoquímicas significativas con base en su contenido de óxidos mayores y de elementos traza. La muestra Cal18-11 (Mb) es un basalto subalcalino y se ubica por debajo de la curva de división de Irvine y Baragar (1971) en el diagrama TAS (**Figura 18**), está empobrecida en elementos incompatibles y REE ligeras. Sin embargo, la segunda muestra de Mb analizada por óxidos mayores y elementos traza (muestra Cal19-4) difiere y es una variedad alcalina de esta unidad con alto contenido en K₂O (~0.9%, wt%), P₂O₅ (~0.9%) y MgO (~12%), bajo contenido en Al₂O₅ (~13.5%) y está enriquecida en REE ligeras y elementos incompatibles (**Figura 18**, **Figura** y **Figura**). Esta variación en la fuente del volcanismo máfico asociado al arco Comondú también se observó en la Provincia Volcánica de Puertecitos (Martín-Barajas et al., 1995) en donde se reportan basaltos alcalinos del Mioceno Temprano atribuidos al arco Comondú (muestras VC-87-10 y VC-87-54). Estos basaltos alcalinos tienen contenidos similares de P₂O₅ (~0.7-0.8%), MgO (~13%) y Al₂O₅ (~13.5%) a la Mb (muestra Cal19-4), además de patrones de ETR muy fraccionados con valores de La_n/Yb_n ~20 (**Figura 28**). Estas mismas lavas basálticas de la PVP se fecharon por el método K/Ar con edades de ~17 Ma para la muestra VC-87-54 y de ~20 Ma para la muestra VC-87-10 (Stock, 1989). La extrusión de Mb en la región de Calamajué puede tener una edad similar debido

a que esa unidad está acotada entre 28 Ma y ~18 Ma que corresponden a la máxima de depositación de Os y la edad Ar-Ar en hornblenda de la andesita Ma1.

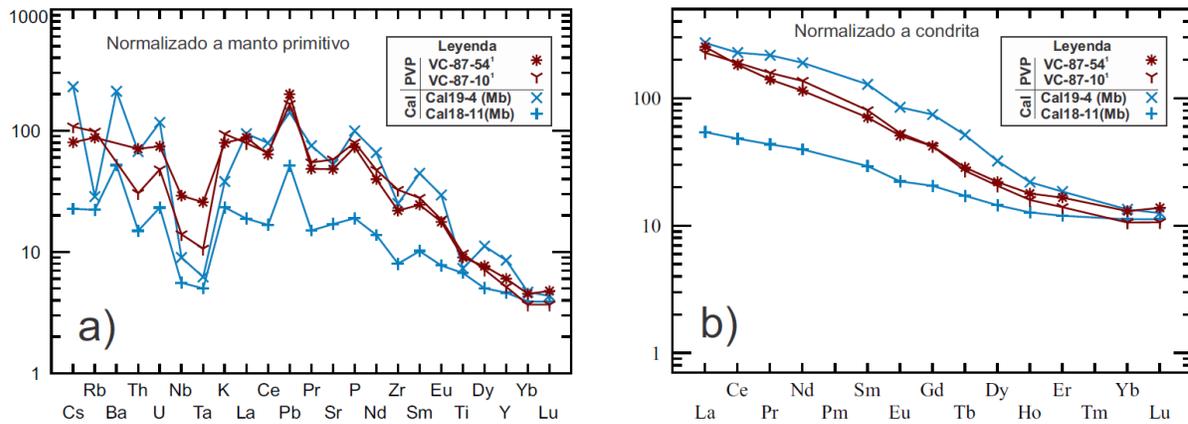


Figura 28 Diagramas multielementales y de REE de las lavas basálticas Mb de la región de Calamajué comparadas con dos lavas alcalinas de la Provincia Volcánica de Puertecitos (PVP). Nótese la diferencia entre las concentraciones de elementos trazas y REE de Cal18-11 (basalto subalcalino) con Cal19-4 (basalto alcalino), y el enriquecimiento de REE ligeras de ésta última muestra y de los basaltos alcalinos de la PVP. ¹Martín-Barajas et al. (1995).

La fuente de Mb no se identificó en el área de Calamajué, sin embargo, además de las lavas reportadas más al norte en PVP (Martín-Barajas et al., 1995), no hay reportes de vulcanismo basáltico del Mioceno Medio en regiones cercanas, por lo que se interpreta que su fuente debe ser local y posiblemente ubicada al este en el área sumergida que hoy ocupa la cuenca Delfín Inferior y/o el Canal de Ballenas.

La edad de la andesita Ma1 de 18.9 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hb) se interpreta como la edad de erupción y como la edad de la cima de la secuencia inferior en Calamajué. La composición química de Ma1 tiene similitud con la composición del basalto Mb, ambas son de alto contenido de K_2O según el diagrama de LeBas (Figura 18) y presenta un fraccionamiento pronunciado de ETR, con altos valores de La_n/Yb_n (~16), pero Ma1 no llega a ser alcalina, ya que se ubica por debajo de la línea de Irvine y Baragar (1971). Los elementos traza de esta unidad no muestran anomalías negativas en Ti, Eu o Sr, las cuales se asocian a cristalización fraccionada de rutilo y titanomagnetita para el Ti, y plagioclasa para el Eu y Sr (Rollinson, 1993).

En la región de San Luis Gonzaga, Martín Barajas et al. (2000) reportaron una traquiandesita basáltica enriquecida en tierras raras ligeras (LREE) con edad de ~15 Ma, un poco más joven que Mb y Ma1 en Calamajué y los basaltos alcalinos en PVP. Estos reportes indican que el magmático orogénico también

incluye diversidad en su fuente, ya que estos campos volcánicos del NW de la península tienen una composición geoquímica similar y se diferencian del volcanismo predominantemente calcoalcalino.

En el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), en la región Los Volcanes, Jalisco, Wallace y Carmichael (1992) también reportan volcanismo máfico a intermedio alcalino (traquibasaltos y traquiandesitas) con altos contenidos de LREE. Ellos explican que los magmas obtuvieron estas concentraciones al provenir de regiones del manto con fases mineralógicas ricas en elementos incompatibles, como flogopita, anfíbol y apatito. Righter y Rosas-Elguera (2001) proponen que los basaltos alcalinos del Campo Volcánico de Ayutla (CVM) son producto de fusión parcial por descompresión del manto astenosférico, explicando la descompresión por un flujo en la cuña del manto por acción de la placa subducida (*corner flow*). En ambos casos se menciona que el enriquecimiento de LREE en relación con HREE se puede deber a granate residual en el manto de donde derivan estos magmas, ya que este mineral retiene los HREE (Rollinson, 1993).

El caso de las lavas máficas ligeramente alcalinas en la PVP, SLG y Calamajué puede ser similar a los descritos en el CVM, sin embargo, se propone un análisis más completo en trabajo a futuro para hacer una interpretación del origen de estas lavas.

En los diagramas multielementales las muestras del volcanismo de arco (secuencia pre-rift) presentan anomalías negativas en Nb y Ta y positivas en Pb. Esto se asocia al proceso de fusión parcial de la cuña del manto en un sistema de subducción, donde los sedimentos subducidos junto con la placa ya cuentan con estas anomalías, por lo tanto, heredan estas características a los fundidos (Best, 2003).

En Calamajué el vulcanismo asociado al proceso de *rifting* es del Plioceno Tardío-Pleistoceno y es de tipo explosivo. Las lapilitas Ptp incluyen una composición de andesita, dacita y riolita. La riolita y la dacita muestran anomalías negativas en Eu y Sr, lo que sugiere cristalización fraccionada de la plagioclasa. La riolita muestra también anomalía negativa en P y Ti, que se asocia a la cristalización fraccionada del apatito y rutilo y titanomagnetita, respectivamente. La lapillita andesítica, por el contrario, no muestra valores bajos en ninguno de los elementos mencionados (**Figura 25**). También se observó que los valores de fraccionamiento de ETR totales son de $La_n/Yb_n \sim 6.2$ en la riolita, 5.5 en la dacita y 3.1 en la andesita. Estas características sugieren que el magma evolucionado es producto de la diferenciación a partir de un magma basáltico derivado del manto empobrecido durante el adelgazamiento o rompimiento de la corteza continental en la cuenca Delfín Inferior (Martín-Barajas et al., 2013; Persaud et al., 2003).

La anomalía negativa en Nb y Ta y positiva en Pb también se asocian a procesos de subducción (Best, 2003), y podrían ser el resultado de mezcla entre fundidos del manto con fundidos de la corteza continental (Martín-Barajas et al., 1995, 2000). Esta interpretación también se ha propuesto para explicar la geoquímica de elementos traza en lavas del Mioceno Medio en el noroeste de México (Ferrari et al., 2013, 2018; Bryan et al, 2014; Duque-Trujillo et al., 2015).

4.3. Análisis de la Cuenca Calamajué

El análisis de paleocorriente indica que la cuenca aluvial se encontraba por debajo del nivel base de erosión para finales del Mioceno, que es la edad inferida del depósito Ms2. Esta unidad aflora en el borde norte de la cuenca y la dirección de transporte es hacia el SE con base en la imbricación de clastos. Se puede inferir que el transporte es local y proviene de la Sierra Calamajué situada al norte. La sedimentación continuó con los depósitos aluviales de Ps3, que representan la mayor cobertura de la cuenca y se depositaron durante el Plioceno Tardío según la edad del lapilli riolítico Ptp1, fechado en 2.6 ± 0.1 Ma. Las rosetas de paleocorriente de Ps3 en el poniente de la Sierra Calamajué y en el norte de la Sierra La Asamblea presentan direcciones de transporte al SW y NW, respectivamente, lo que indica que la unidad Ps3 incluye abanicos aluviales formados al pie de las sierras circundantes y se incorporaron al drenaje principal en el centro de la Cuenca Calamajué. Ahí las rosetas indican un transporte al ENE hacia el Golfo de California saliendo por la Ensenada Blanca. En el NE de la Cuenca Calamajué las rosetas de Ps3 apuntan al N, hacia los altos topográficos de la Sierra Calamajué. Se interpreta que un bajo topográfico importante fue generado por la acción de la Falla Calamajué, la cual, a pesar de presentar estrías laterales, pudo tener una componente normal anteriormente (**Figura 16**).

Se infiere que el levantamiento del margen peninsular y la exhumación de la cuenca ocurrió durante el depósito de la unidad Ps4, ya que en contraste con el transporte de las unidades MS2 y Ps3 al S y ENE, respectivamente, la dirección de paleocorriente en Ps4 cambia drásticamente a una dirección al W. Estos sedimentos se incorporan al drenaje actual del arroyo Calamajué que fluye hacia el norte y desemboca en el puerto del mismo nombre (**Figura 2 y Figura 16**).

Se interpreta que la inversión en la dirección de paleocorriente ocurrió debido a un rebote elástico en el margen peninsular por la cizalla lateral de la Falla Canal de Ballenas, la cual se estima que se activó hace ~ 1.8 Ma según la edad de enfriamiento a partir de huellas de fisión en apatitos (Seiler et al., 2009). Es

posible que el rebote elástico haya cerrado el transporte aluvial por la Ensenada Blanca. Los bloques exhumados por fallas con rumbo NW-SE actualmente forman colinas coronadas por la lava Ma1 (ver secciones B-B' y C-C' en) que esta localmente cortada por arroyos abandonados. Se interpreta que el nuevo drenaje se abrió paso por el Arroyo Calamajué en dirección al norte, donde se ubica el Puerto Calamajué, erosionando los antiguos depósitos aluviales que contienen los horizontes de tefras pliocénicas. El hecho de que el drenaje hacia el Golfo de California por el Arroyo Calamajué sea relativamente reciente puede ser la razón por la que el registro de las unidades volcano-sedimentarias de la secuencia inferior (pre-rift) haya sido erosionado. El domo de lava Md, se interpreta que está alimentado por un cuello volcánico, y posiblemente la lava fluyó radialmente, pero no se conservaron en el registro estratigráfico (ver sección A-A' en **Figura 17**).

4.4. Correlación de unidades con la Isla Ángel de la Guarda

La reconstrucción de la extensión oblicua en el Golfo de California sugiere que Isla Ángel de la Guarda se separó de la península durante el Plioceno debido a la reubicación del límite principal de las placas Pacífico y Norteamérica. Esto ocurrió cuando la falla Canal de Ballenas inició su actividad y se abrió la cuenca Delfín Inferior (Seiler et al., 2010; Lonsdale, 1989). En esta reconstrucción, IAG se encontraba adyacente al margen de Calamajué y de San Luis Gonzaga (**Figura 1**, reconstrucción de Bennett et al., 2016), y uno de los objetivos de este trabajo es identificar unidades litológicas correlacionables entre la cuenca central de IAG y la región de Calamajué, lo que permitiría medir el desplazamiento finito a través de la falla Canal de Ballenas.

Se identificaron cuatro unidades potencialmente correlacionables: 1) La unidad sedimentaria prevolcánica denominada Os, 2) la toba riolítica del Oligoceno (Otr), 3) el domo andesítico Md y 4) la secuencia aluvial Ps3 con sus lapillitas de pómez interestratificadas (Ptp).

La unidad Os en Calamajué es una arcosa lítica y en la cuenca central de IAG se clasifica como una litarenita feldespática. Además, en Calamajué los fragmentos líticos son predominantemente volcánicos, mientras que en IAG son de origen metamórfico. A pesar de estas diferencias, el fechamiento de sus zircones detríticos indica una edad máxima de depósito similar para ambas unidades, siendo la población más joven del Oligoceno (28 Ma), con edades cretácicas predominantes. Así mismo, la unidad Ms1 en Calamajué, es contemporánea con el vulcanismo local que incluye a Md1 y Ma1. La secuencia definida como Ms1 en IAG

tiene una composición muy similar dominada por clastos de Md1 y Ma1, por lo que estas unidades posiblemente tuvieron sistemas de drenajes con vergencia opuesta hacia la zona del canal de Ballenas, no obstante, no se tienen datos de paleocorrientes que permitan hacer un análisis estadístico para definir la dirección de transporte.

La toba riolítica Otr en Calamajué sobreyace a la arcosa lítica Os. Esta toba es rica en microcristales de cuarzo, plagioclasa y biotita y cuenta con un espesor de hasta 50 m. En IAG se reportó una toba riolítica pumicítica similar, que fue fechada en ~ 23 Ma por el método Ar-Ar en biotitas (Hernández-Ramos, 2018; Cavazos, 2015), la cual se encuentra interestratificada en litarenitas feldespáticas prevolcánicas. La diferencia en espesores de este depósito piroclástico podría indicar que la toba en Calamajué se depositó en una depresión o paleo cauce y preservó mayor espesor que en IAG, en donde solo alcanza 1 a 2 m de espesor. Sin embargo, cuentan con la misma mineralogía, y la edad relativa de esta unidad en Calamajué es consistente con la edad de la toba en IAG, y está delimitada entre la edad máxima de depósito de Os (~ 28 Ma) y la edad de enfriamiento de la lava Ma1 (~ 19 Ma). Un concentrado de plagioclasa y uno de biotita de Otr se mandaron al laboratorio de geocronología de Argón del USGS en Menlo Park, California, sin embargo, sus resultados no se alcanzaron a incluir en esta tesis.

En la región de Calamajué el domo de lava andesítico Md se encuentra aislado del resto de las unidades de la secuencia inferior, por lo que su posición estratigráfica fue inferida estar por debajo o en la misma posición estratigráfica de Ma1. Además, por sus dimensiones se considera que esta lava es local, sin embargo, los diagramas multielementales y de concentración de REE muestran patrones subparalelos entre la muestra Cal17-15 (Md) con dos muestras de lava andesítica (IAG19-19 e IAG19-20) de la unidad Ma1 de IAG (16.4 ± 0.2 Ma método U-Pb en Zr; Hernández-Ramos, 2018). Las muestras tienen valores de fraccionamiento de La_n/Yb_n entre ~ 6 y ~ 8.7 y las mismas anomalías negativas en Nb y Ta y positivas en Pb, Sr y Ti, lo que sugiere que son eventos volcánicos relacionados y probablemente contemporáneos. Un concentrado de hornblenda de esta unidad está en proceso de fechamiento, pero no se incluyó como resultado en esta tesis.

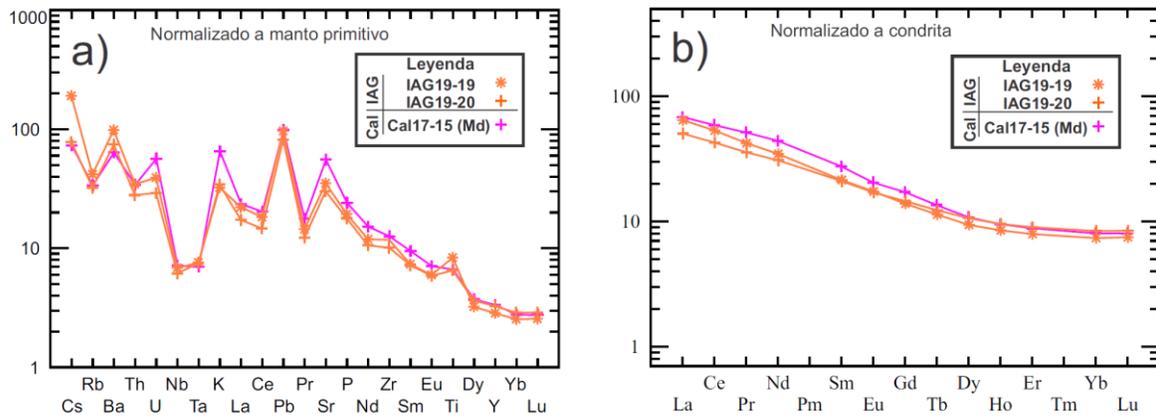


Figura 29 a) Aracnigramma de elementos traza de dos lavas andesíticas en la cuenca central de la Isla Ángel de la Guarda (IAG) y el domo de lava andesítico Md en la región de Calamajué (Cal); b) Concentración de REE normalizadas a condrita para las mismas unidades.

En la cuenca central de IAG, Cavazos-Álvarez (2015) fechó una toba pumicítica en 6.5 Ma y buscó correlacionar esta unidad con un pulso volcánico explosivo de la Provincia Volcánica de Puertecitos denominado Toba El Canelo (Nagy et al. 1999; Lewis, 1996) y con tobas de Mesa Cuadrada (Stock, 1989), las cuales tienen edades similares, sin embargo, la mineralogía de la toba en IAG incluye hornblenda, y las tobas El Canelo no, por lo que esta correlación no se concretó.

Las unidades volcánicas que presentan los mejores datos de correlación entre Calamajué y la isla Ángel de la Guarda son tres lapilitas reportadas en IAG y que son muy similares a las lapillitas interestratificadas en Ps3 de este trabajo. La lapillita de pómez Ptp1-Cal presenta hornblenda, plagioclasa y clinopiroxeno como minerales principales. De esta unidad se fechó un concentrado de hornblenda y se obtuvo una edad de 2.6 ± 0.1 Ma, lo que indica que los eventos explosivos son del Plioceno Tardío. En IAG una lapillita en la base de la secuencia aluvial dio una edad de 6.5 Ma, pero en Calamajué no se encontró registro volcánico de esa edad.

Se analizaron y compararon los resultados geoquímicos de tres lapilitas de ambas regiones (Cal e IAG). Estas tefras se interpretan como depósitos piroclásticos de caída libre de explosiones volcánicas plinianas, para el caso de los depósitos riolíticos y dacíticos, y vulcanianas para las andesitas, según la clasificación de Cas y Wright (1987). La nube de material extruido en estas explosiones puede alcanzar decenas de km de altura y su distribución generalmente está controlado por las corrientes de viento, las cuales arrastran

el material por las alturas hasta que pierden energía y se depositan por gravedad. También es posible que las explosiones hayan sido de tipo freatomagmáticas, en el caso de haber ocurrido en volcanes o fisuras submarinas. La búsqueda de microfósiles y/o la composición de sedimentos atrapados en las vesículas de las pómez podrían ser útiles en trabajo a futuro para determinar si la fuente se ubicaba dentro del océano.

Los análisis de microsonda electrónica presentan una dispersión importante en la concentración de óxidos mayores medidos en el mismo vidrio volcánico de una muestra de pómez. Estas diferencias se deben a la presencia de microcristales contenidos en el vidrio analizado, también influye la interacción del haz de la microsonda con las vesículas de las pómez, y/o la interacción del haz con el portaobjeto (**Figura 23**). Se considera que el análisis de roca total por FRX de las mismas muestras representa un resultado más homogéneo y representativo.

El porcentaje total de óxidos analizado por microsonda electrónica en las lapilitas llega a ser tan bajo como ~90% en algunos puntos de la muestra IAG18-3 (Anexo B), sin embargo, la pérdida por ignición (L.O.I.) medida por FRX en esta misma muestra es de 8.23%, por lo que se pueden justificar los valores bajos medidos por microsonda ya que ésta no detecta volátiles.

Los resultados geoquímicos de las lapillitas riolíticas en IAG y Cal son muy similares, además de la composición de sus microcristales, sugiriendo que se podría tratar de una misma fuente que alimentó los eventos volcánicos explosivos que depositaron tefras en ambas regiones. En la unidad Ptp1-IAG no fue reconocida hornblenda entre su mineralogía, por lo tanto, no se logró fechar esta roca para lograr una mejor correlación, sin embargo, en Calamajué se observó que la hornblenda parece concentrarse en la base del depósito y disminuir su proporción hacia la cima, lo que indicaría que el afloramiento en IAG podría corresponder a un horizonte del depósito donde no se concentró este mineral. Además, el espesor de esta unidad en Calamajué llega a ser de casi 5 m, mientras en IAG es de apenas 1 m.

Las lapilitas riolíticas (Ptp1-Cal y Ptp1-IAG) mostraron tener resultados geoquímicos muy parecidos en sus óxidos mayores (**Figura 23** y **Figura 24**). Los microcristales de plagioclasas en ambas muestras se clasifican como andesinas y labradoritas, mientras los piroxenos son de tipo clinoenstatita y augita. Los arcnigramas multielementales y de elementos traza (**Figura 25**) muestran comportamiento subparalelo con las mismas anomalías negativas (Nb, Ta, Ti, Eu) y positivas (K, Pb, Zr).

Las lapilitas dacíticas (Ptp2-Cal y Ptp3-IAG) también podrían tratarse de un mismo pulso volcánico representado en ambas regiones. La diferencia más importante mostrada en el arcnograma de

multielementos es una mayor concentración de fósforo en la muestra de IAG (IAG18-1) en comparación con Ptp2-Cal, sin embargo, la diferencia puede deberse a la movilidad del fósforo por efectos secundarios, como el intemperismo.

Las lapillitas andesíticas tienen diferencias geoquímicas importantes entre sí. La geoquímica de óxidos mayores es similar, pero el fraccionamiento de ETR totales en la muestra IAG18-2 (Ptp2-IAG) es de $La_n/Yb_n=4.51$, mayor que en la muestra Cal17-14a (Ptp3-Cal; $La_n/Yb_n=3.12$). A pesar de lo anterior, las firmas de elementos traza mostrados en la **Figura 25** tienen comportamientos muy similares y, a diferencia de las dacitas y riolitas, ambas muestras presentan piroxeno pigeonita. El comportamiento similar de elementos traza sugiere que los magmas de estas andesitas pudieran estar relacionados, sin embargo, no se trata de un mismo pulso volcánico, sino de eventos volcánicos de la misma composición y fuente representado en ambas regiones.

La correlación de las lapillitas (Ptp) ubicaría a la cuenca central de IAG aproximadamente adyacente a la región de Calamajué. Esto significaría un desplazamiento de IAG de ~ 100 km al SE con respecto a la península a través de la Falla Canal de Ballenas en los últimos ~ 2.6 Ma, marcados por la edad de Ptp1-Cal.

Existen reportes de otra unidad correlacionable entre la zona de Cataviña e IAG es la Toba de San Felipe (Tsf) que se ha estudiado en el norte de Baja California y el occidente de Sonora (Stock et al., 1999, 2013; Vidal-Solano et al, 2008; Olgúin-Villa, 2013), incluida en la Isla Ángel de la Guarda (Cavazos-Álvarez, 2015 y Hernández-Rámos, 2018). Esta toba se ha utilizado como marcador para reconstruir la ubicación de la península con respecto a la región de Sonora anterior al rift del Golfo de California. La correlación de la Tsf en la región de Cataviña y la cuenca central de IAG sugiere que ésta última se desplazó 130 km al SE con respecto a la península, desde la región de San Luis Gonzaga hace ~ 12 Ma (Cavazos-Álvarez, 2015; **Figura 30**).

En síntesis, la correlación de las unidades entre la península y la isla Ángel de la Guarda permite acotar el desplazamiento finito entre 100 y 130 km. Aunque se piensa que el inicio de la Falla Canal de Ballenas ocurrió en los últimos 1.8 Ma (Seiler et al., 2010), también es posible que hubo un desplazamiento relativo de IAG previo a la extrusión de las lapillitas en Calamajué y que está representado en la extensión de las cuencas Delfín Superior y Delfín Inferior. Lo anterior es consistente con los ~ 90 km de separación de corteza continental en las cuencas Delfín Superior y Delfín Inferior medido en la interpretación de perfiles sísmicos (Martin-Barajas et al., 2013; Téllez, 2018).

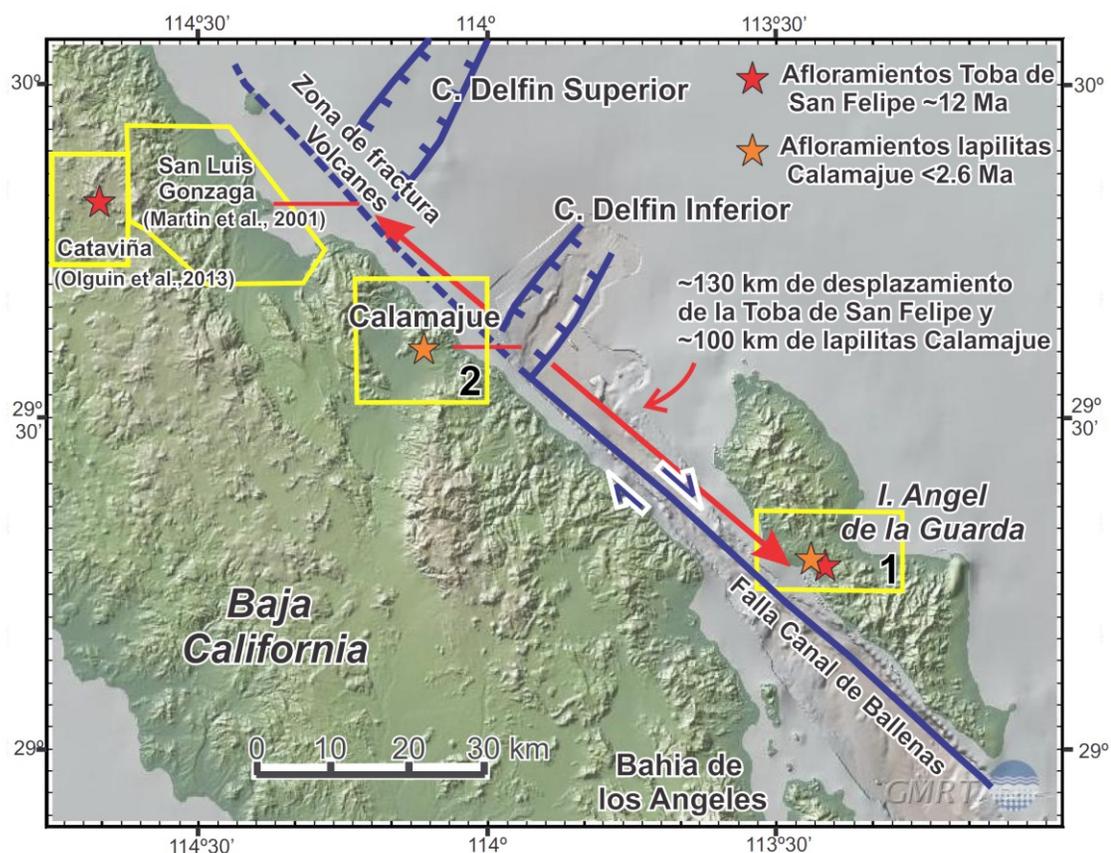


Figura 30 Mapa de la porción noroccidental de la PBC mostrando el desplazamiento estimado de la Isla Ángel de la Guarda con respecto a la península a través de afloramientos de la Toba de San Felipe y las lapilitas reportadas en este trabajo (editado de Stock et al., 2018). ¹Polígono de la cuenca central de IAG estudiado por Cavazos-Álvarez (2015) y Hernández-Ramos (2018). ²Polígono del área de estudio del presente trabajo.

Tanto la correlación de las lapilitas como la de la Toba de San Felipe pueden ser posibles en conjunto. El hecho de que IAG se encontrara adyacente a la región de San Luis Gonzaga para el tiempo en que la Toba de San Felipe fue depositada podría significar que hubo un desplazamiento de IAG previo a la extrusión de las lapilitas en Calamajue.

Capítulo 5. Conclusiones

La región de Calamajué registra dos eventos volcano-sedimentarios que abarcan del Mioceno Medio al Plio-Pleistoceno y que se encuentran cortadas mayormente por fallas con rumbo NNW-SSE, subparalelas a la zona de cizalla del Canal de Ballenas y a la Zona de Fracturas Volcanes. Estas unidades sobreyacen por discordancia a un basamento metasedimentario y de intrusivos tonalíticos. La primera relacionada a la secuencia de arco Comondú y la segunda a la transtensión del Golfo de California

La unidad Os corresponde a arcosas líticas con facies subordinadas de conglomerados y es la base de la secuencia inferior (pre-rift). Los circones detríticos de esta unidad muestran 4 poblaciones. La predominante es del Cretácico y se interpreta que corresponden a los intrusivos graníticos de Sonora, Chihuahua y Baja California. La población más joven es de 28 Ma (U-Pb, zr) y es contemporánea al volcanismo de la Sierra Madre Occidental en Sonora y Chihuahua. Esta edad se interpreta como la edad de máxima depositación. Esta unidad es anterior al volcanismo de la región y se correlaciona con la Formación Mesa en el norte de Baja California (Dorsey y Burns, 1994).

La secuencia continua con una toba riolítica (Otr) de biotita y plagioclasa, la cual se interpreta como facies medias a distales de volcanismo explosivo de la Sierra Madre Occidental. Por encima, siguió la depositación de las arcosas líticas Ms1, las cuales tienen firmas de circones detríticos similares a Os, sin embargo, Ms1 es contemporánea al volcanismo de la región. Las lavas basálticas Mb se encuentran interestratificadas en Ms1 y coronando a la Sinf está un flujo de lava andesítica Ma1 que cuenta con una edad de 18.9 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hb) interpretado como edad de erupción de la lava.

El domo exógeno de lava andesítica Md no tiene una relación estratigráfica que acote su edad de extrusión, sin embargo, la similitud geoquímica con lavas andesíticas de Isla Ángel de la Guarda (IAG) fechadas en ~ 16 Ma (Hernández-Ramos, 2018) proponen que podrían ser eventos contemporáneos con una fuente magmática relacionada.

La secuencia superior cuenta con conglomerados aluviales y al menos cuatro depósitos piroclásticos de caída libre de composición intermedia a félsica. La lapillita inferior Ptp1 cuenta con una edad de 2.6 ± 0.1 Ma (Ar-Ar, hb) interpretada como edad de erupción de la lava.

Las lavas de la secuencia inferior y superior tienen una afinidad calco-alcalina, sin embargo, la muestra Cal19-4 de Mb y la unidad Ma1 muestran valores altos de potasio y enriquecimiento en LREE y valores de

La/Yb entre 16 y 20. Lavas basálticas a intermedias con estas características han sido descritas en el oeste del Cinturón Volcánico Mexicano, explicando que se puede deber a la presencia de flogopita, anfíboles, apatito y/o granate en la fuente mantélica de la que derivan estos fundidos, sin embargo, se propone un mayor análisis de las lavas ligeramente alcalinas del noreste de la península para proponer un origen de las mismas.

Las lapillitas de riolita y dacita de la secuencia sin-rift muestran anomalías negativas en Eu, Sr, P y Ti, asociados a la cristalización fraccionada de la plagioclasa, para el Eu y Sr, el apatito para el P, y el rutilo y titanomagnetita para el Ti. Estas características sugieren que el magma evolucionado es producto de la diferenciación a partir de un magma basáltico derivado del manto empobrecido durante el adelgazamiento o rompimiento de la corteza continental en la cuenca Delfín Inferior (Martín-Barajas et al., 2013; Persaud et al., 2003).

El drenaje principal en la Cuenca Calamajué durante el Mioceno Tardío-Plioceno se interpreta que ocurría al Golfo de California (dirección NE), marcado por la dirección de paleocorriente de los conglomerados aluviales Ms2 y Ps3. La inversión en la dirección de paleocorriente de la unidad Ps4 al W se interpreta que es producto de la activación de la Falla Canal de Ballenas, la cual penetró la corteza continental y generó una respuesta isostática en el margen peninsular. Esto ocurrió después de la extrusión de las lapillitas (2.6 Ma) y el nuevo drenaje abrió paso por el NW del área de estudio para salir al Golfo de California por el Puerto Calamajué. Para obtener una fecha más exacta se propone realizar análisis de huellas de fisión en apatitos o circones.

Los afloramientos de la Toba de San Felipe en la región de Cataviña y la Isla Ángel de la Guarda (IAG) acotan el desplazamiento total de la última con respecto a la península en ~130 km, mientras la correlación de las lapillitas del Plio-Pleistoceno en Calamajué e IAG sugieren un desplazamiento finito de la Falla Canal de Ballenas en ~100 Km en los últimos 2.6 Ma. Esta deformación debe estar acomodada en las cuencas Delfín Inf. y Delfín Sup.

Literatura citada

- Aragón-Arreola, M., and Martín-Barajas, A., 2007, Westward migration of extensión in the northern Gulf of California, Mexico, *Geology*, 35(6), 571-574.
- Bas, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram, *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.
- Bennett, S.E.K., Darin, M.H., Dorsey, R.J., Skinner, L.A., Umhoefer, P.J., & Oskin, M.E., 2016, Animated tectonic reconstruction of the Lower Colorado River region: implications for Late Miocene to Present deformation. In *Going LOCO, Investigations along the Lower Colorado River: Desert Studies Center Desert Symposium Field Guide and Proceedings*, p. 73-86.
- Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., 2014, Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone, *Geology*, 42, 215-218.
- Beyer, Ross A., Oleg Alexandrov, and Scott McMichael, 2019, NeoGeographyToolkit/StereoPipeline: Ames Stereo Pipeline version 2.6.2. Zenodo, DOI: 10.5281/zenodo.3247734.
- Best, M. G., 2003, *Igneous and metamorphic petrology*, 2nd ed., Blackwell Science Ltd, p. 729.
- Bryan, S.E., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., López-Martínez, M., 2014, Pulling apart the mid to late cenozoic magmatic record of the Gulf of California: is there a comondu Arc, *Special Publications 385(1)*, Geological Society, London, 389-407, Rosalba.
- Campbell, M. y Crocker, J, 1993, *Geology west of the Canal de Las Ballenas, Baja California, Mexico, The prebatholithic stratigraphy of peninsular California: Geological Society of America Special Paper*, p. 61-76.
- Cas, R. A. F., & Wright, J. V., 1987, *Volcanic successions: Ancient and modern*, Allen and Unin, London, p. 129-174.
- Cavazos-Álvarez, J.A., 2015, *Estratigrafía de la cuenca central de la isla Ángel de la Guarda: evidencias del inicio de extensión en el Golfo de California*, Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Cheel, R. J., & Leckie, D. A., 1993, Hummocky cross-stratification, In *Sedimentology review 1*, Vol. 1, pp. 103-122, Blackwell.
- Curray, J.R. and Moore, D.G., 1984, Geologic history of the mouth of the Gulf of California, In: J.K. Crouch and S.B. Bachman (Editors), *Tectonics and Sedimentation Along the Californian Margin*. Pac. Sect. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., 38: 17-36.
- De Basabe-Delgado, J., 2002, *Regresión lineal con incertidumbre en todas las variables: aplicaciones en geocronología al cálculo de isócronas*, Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada, B.C., 86 pp.
- Delgado Argote, L.A., M. López-Martínez and del Carmen Perillat, M, 2000, Geologic reconnaissance and Miocene age of volcanism and associated fauna from sediments of Bahía de los Angeles, Baja California, central Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin Special Papers*, 334, 111-121.
- DLR, 2017, Agencia Espacial Alemana, Modelo de elevación TerraSAR-X/TanDEM-X de 12m de resolución. Licencia de uso científico a CICESE a través de propuesta DEM_GEOL1546.

- Dorsey, R.J., Burns, B.A., 1994, Regional stratigraphy, sedimentology and tectonic significance of Oligocene-Miocene sedimentary and volcanic rocks, northern Baja California, Mexico, *Sedimentary Geology*, 88, 231-251.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., López-Martínez, M., Lonsdale, P., Bryan, S.E., Kluesner, J., Piñero-Lajas, D., Solari, L., 2015, Timing of rifting in the southern Gulf of California and its conjugate margins: insights from the plutonic record, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 127 (5-6), 702-736.
- ESA, 2017, Agencia Espacial Europea, Imagen multispectral del satélite Sentinel 2 del mes de junio del 2017, Consultado en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- ESA, 2019, Agencia Espacial Europea, Bandas espectrales de Sentinel 2, Consultado 2019 en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload-resolution-and-swath>
- Faure, G., & Mensing, T. M., 2005, *Isotopes: principles and applications*, John Wiley & Sons.
- Ferrari L., 2004, Slab detachment control on volcanic pulse and mantle heterogeneity in Central Mexico, *Geology*, v. 32, p. 77-80.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., Solari, L., 2013, Late Oligocene to Middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, México: The beginning of the Gulf of California rift, *Geosphere*, 9(5), 1161-1200.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., López-Martínez, M., Silva-Fragoso, A., 2018, Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift, *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152.
- Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G.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.
- Gans, P.B., 1997, Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora - Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico, *Tectonics*, 16, 388-408.
- García, C.P., 2007, *Volcanismo y extensión durante el neógeno al sur de la provincia volcánica de Puertecitos, Baja California*, Tesis de maestría en Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, p. 112.
- Gastil, R. G., 1993, Prebatholithic history of peninsular California, *The prebatholithic stratigraphy of peninsular California: Geological Society of America Special Paper*, 279, p. 145-156.
- Gastil, R.G., Krummenacher, D., 1977, Reconnaissance geologic map of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahia Kino, GSA Map and Chart Series MC-16, *Geol. Soc.Am.* scale 1:150,000.
- Griffith, R., & Hoobs, J., 1993, *Geology of the southern Sierra Calamajue, Baja California Norte, Mexico*, *The prebatholithic stratigraphy of peninsular California: Geological Society of America Special Paper*, 279, p. 43-60
- Hausback, B.P., 1984, Cenozoic volcanic and tectonic Evolution of Baja California Sur, México. In: *Geology of the Baja California Peninsula* (Frizzell, V.A., ed.). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, 39, 219-236.

- Helenes-Escamilla, J., Carreño, A.L., and Carillo-Berumen, R.M., 2009, Middle to late Miocene chronostratigraphy and development of the northern Gulf of California, *Marine Micropaleontology*, v. 72, p. 10–25.
- Hernández-Ramos, J., 2018, Estratigrafía y estructura de la región centro-oriente de la Isla Ángel de la Guarda: Evidencias del inicio de la extensión en el Golfo de California, Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Hernández-Ramos, J., Martín, A., Stock, J., Weber, B., Cavazos, J. 2018, Estratigrafía y estructura de la región central de Isla Ángel de la Guarda: Evidencias del inicio de la extensión en el Golfo de California, Enviado a Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana; Puerto Vallarta, México.
- Irvine, T. N. J., & Baragar, W. R. A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.
- Lee, J., Miller, M.M., Crippen, R., Hacker, B. and Ledesma Vázquez, J., 1996, Middle Miocene extension in the Gulf Extensional Province, Baja California: Evidence from the southern Sierra Juarez, *Geological Society of America Bulletin*, 108(5) 505-525.
- Lewis, C.J., 1996, Stratigraphy and geochronology of Miocene and Pliocene volcanic rocks in the Sierra San Fermín and southern Sierra San Felipe, Baja California, Mexico, *Geofísica Internacional - México*, 35, 3-26.
- Lizarralde, D., Axen, G.J., Brown, H.E., Fletcher, J.M., González-Fernández, A., Harding, A.J., Holbrook, W S., Kent, G.M., Paramo, P., Sutherland, F., and Umhoefer, P. J., 2007, Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*, 448(7152), 466-469.
- Lonsdale, P., 1991, Structural Patterns of the Pacific Floor Offshore of Peninsular California: Chapter 1: Part III, *Regional Geophysics and Geology*.
- Mar-Hernández, J.E., 2011, Tectónica de la cuenca Tiburón a partir de sísmica de reflexión, Tesis de Maestría, Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Martin, A., Fletcher, J. M., Lopez-Martinez, M., & Mendoza-Borunda, R., 2000, Waning Miocene subduction and arc volcanism in Baja California: the San Luis Gonzaga volcanic field, *Tectonophysics*, 318(1-4), 27-51.
- Martín-Barajas, A., Stock, J. M., Layer, P., Hausback, B., Renne, P., and López- Martínez, M., 1995, Arc-rift transition volcanism in the Puertecitos volcanic province, northeastern Baja California, Mexico, *Geological Society of America Bulletin*, 107(4), 407-424.
- Martín-Barajas, A., Stock, J., López-Martínez, M., & Chapman, A., 2008, Estratigrafía volcánica del Neógeno en la mitad norte de Isla Ángel de la Guarda, En Primer Congreso sobre la Evolución Geológica y Ecológica del Noroeste de México, Instituto de Geología, Estación Regional Noroeste, UNAM, Hermosillo, Sonora.
- Martín-Barajas, A.M., González Escobar, M., Fletcher, J.M., Pacheco, M., Oskin, M., Dorsey, R., 2013, Thick deltaic sedimentation and detachment faulting delay the onset of continental rupture in the Northern Gulf of California: Analysis of seismic reflection profiles, *Tectonics*, 32(5), 1294-1311.
- Morimoto, N., 1988, Nomenclature of pyroxenes, *Mineralogy and Petrology*, 39(1), 55-76.
- Nagy, E.A., Grove, M., and Stock, J.M., 1999, Age and stratigraphic relationships of pre-and syn-rift volcanic deposits in the northern Puertecitos Volcanic Province, Baja California, Mexico, *Journal of volcanology and geothermal research*, 93(1), 1-30.

- Nieto-Samaniego, A. F., Alanís-Álvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., 1997, La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* s, v.14, p.13-25.
- Nourse, J.A., Anderson, T. H. and Silver, L.T., 1994, Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, northwestern Mexico, *Tectonics*, 13(5), 1161-118.
- Olguín-Villa, A.E., Vidal Solano, J.R., Stock, J.M., 2013, Petrography, geochemistry, petrofabric and paleomagnetism of the Tuff of San Felipe in the Catavina region, Baja California, Mexico, *Revista mexicana de ciencias geológicas* 30, 282–298.
- Olguín-Villa, A.E., Vidal-Solano, J.R., Stock, J.M., 2013, Petrografía, geoquímica, petrofábrica y paleomagnetismo de la Toba de San Felipe en la región de Cataviña, Baja California, México, *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 30(2), 282-298.
- Ortega-Rivera., A, 2003, Geochronological Constraints on the Tectonic History of the Peninsular Ranges Batholith of Alta and Baja California: Tectonic Implications for Western México. Ortega-Rivera, Amabel. In *Tectonic Evolution of northwestern Mexico and southwestern United States*, eds. Scott E. Johnson, Scott R. Paterson, John M. Fletcher, Gary H. Girty, David L. Kimbrough, and Arturo Martín-Barajas Geological Society of America, Special Paper 374: 297-336.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., Solari, L., 2013, Late Oligocene to Middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, México: The beginning of the Gulf of California rift, *Geosphere*, 9(5), 1161-1200.
- Oskin, M., Stock, J., Martín-Barajas, A., 2001. Rapid localization of Pacific North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*, 29, 459-462.
- Pearce, J. A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins.
- Peccerillo, A., & Taylor, S. R., 1976, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey, *Contributions to mineralogy and petrology*, 58(1), 63-81.
- Persaud, P., J. Stock, M. Steckler, A. Martín-Barajas, J. Diebold, A. González-Fernández, and G. Mountain, 2003, Active deformation and shallow structure of the Wagner Consag, and Delfin Basins, northern Gulf of California, Mexico, *J. Geophys. Res.*, 108(B7), 2355.
- Ribbe, P. H., 2018, *Feldspar mineralogy* (Vol. 2), Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Righter, K., & Rosas-Elguera, J., 2001, Alkaline lavas in the volcanic front of the western Mexican Volcanic Belt: geology and petrology of the Ayutla and Tapalpa volcanic fields, *Journal of Petrology*, 42(12), 2333-2361.
- Rollinson, H. R., 1993, *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*, Longman Scientific and Technical, London.
- Schmidt, K. L., Wetmore, P. H., Alsleben, H., and Paterson, S. R., 2014, Mesozoic tectonic evolution of the southern Peninsular Ranges batholith, Baja California, Mexico: Long-lived history of a collisional segment in the Mesozoic Cordilleran arc, *Geological Society of America Memoirs*, 211, 645-668.
- Schmidt, K.L., Wetmore, P.H., Johnson, S.E. and Paterson, S.R., 2002, Controls on orogenesis along an ocean-continent margin transition in the Jura-Cretaceous Peninsular Ranges batholiths. *Geological Society of America Special Paper*, 365, 49-71. pp.
- Seiler, C., Fletcher, J.M., Quigley, M.C., Gleadows, A.J.W., Khon, B.P., 2010, Neogene structural evolution of the Sierra San Felipe, Baja California: Evidence for proto-gulf transextension in the Gulf Extensional Province, *Tectonophysics*, 488, 87-109.

- Seiler, C., Gleadow, A.J.W., Fletcher, J.M. and Kohn, B.P., 2009, Thermal evolution of a sheared continental margin: Insights from the Ballenas transformin Baja California, Mexico *Earth and Planetary Science Letters*, 285, 61-74.
- Stock, J.M., 1989, Sequence and geochronology of Miocene rocks adjacent to the main gulf escarpment: southern Valle Chico, Baja California Norte, Mexico, *Geofisica Internacional*, 28(5), 851-896.
- 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(1), 99-115.
- Stock, J.M., and Hodges, K.V., 1990, Miocene to Recent structural development of an extensional accommodation zone, northeastern Baja California, Mexico, *Journal of structural geology*, 12(3), 315-328.
- Stock, J.M., Lewis, C.J., Nagy, E.A., 1999, The Tuff of San Felipe: an extensive middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico, *Journal of volcanology and geothermal research*, 93(1), p. 53-74.
- Sun, S. S., & McDonough, W. F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), p. 313-345.
- Téllez-Velázquez, G., 2018, Estructura y evolución de las cuencas Delfín Superior y Delfín Inferior: interpretación de perfiles de reflexión sísmica, Tesis de Maestría, Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Umhoefer, P.J., Darin, M.H., Bennett, S.E.K., Skinner, L.A., Dorsey, R.J., Oskin, M.E., 2018. Breaching of strike-slip faults and successive flooding of pull-apart basins to form the Gulf of California seaway from ca. 8–6 Ma. *Geology*, 46 (8), 695-698.
- Umhoefer, P.J., Dorsey, R.J., Willsey, S., Mayer, L., Renne, P., 2001, Stratigraphy and geochronology of the Comondú Group near Loreto, Baja California Sur, Mexico, *Sedimentary Geology*, 144, 125-147.
- Van-Wijk, J., Axen, G., & Abera, R., 2017, Initiation, evolution and extinction of pull-apart basins: Implications for opening of the Gulf of California, *Tectonophysics*, 719, 37-50.
- Vega-Granillo, R., 1996, La Sierra de Mazatán, Sonora, México: Geología y análisis estructural de un complejo metamórfico en la parte sur de la Provincia de Basin and Range. Tesis de Maestría en ciencias. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 128 p.
- Vidal-Solano, J.R., Lapierre, H., Stock, J.M., Demant, A., Paz-Moreno, F.A., Bosch, D., Brunet, P., Amortegui, A., 2008, Isotope geochemistry and petrogénesis of peralkaline Middle Miocene ignimbrites from central Sonora: relationship with continental break-up and the birth of the Gulf of California, *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 179(5), 453-464.
- Wallace, P., & Carmichael, S. E., 1992, Alkaline and calc-alkaline lavas near Los Volcanes, Jalisco, Mexico: geochemical diversity and its significance in volcanic arcs, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 111(4), 423-439.

Anexo A. Análisis de óxidos mayores y elementos trazas.

ID muestra	Calamajué											Isla Ángel de la Guarda				
	CAL19-4	CAL18-11	CAL17-11	Cal17-19	CAL17-15	CAL18-13	CAL17-21	CAL18-4	CAL17-14B	CAL17-14A	CAL18-5	IAG19-19	IAG19-20	IAG18-3	IAG18-2	IAG18-1
Unidad	Mb	Mb	Ma1	Ma1	Md	Mdr	Ptp1	Ptp2	Ptp2	Ptp3	Ptp4	Ma1	Ma1	Ptp1	Ptp2	Ptp3
Clasificación	B	B	A	A	A	R	R	D	D	A	R	A	A	R	A	D
UTM este	782138	784368	783673	775454	771988	780051	776323	782516	781057	781057	782516	255464	253307	263711	263711	263711
UTM norte	3273291	3274908	3278800	3276654	3283577	3278371	3280783	3280908	3278100	3278100	3280908	3249475	3251074	3240250	3240250	3240250
Latitud	29.56	29.57	29.61	29.59	29.65	29.60	29.63	29.63	29.60	29.60	29.63	29.35	29.36	29.27	29.27	29.27
Longitud	-114.09	-114.06	-114.07	-114.16	-114.19	-114.11	-114.15	-114.08	-114.10	-114.10	-114.08	-119.52	-119.54	-119.43	-119.43	-119.43
% Óxidos mayores (No normalizados)																
SiO ₂	45.45	49.27	58.27	57.61	61.00	72.64	68.44	61.13	61.98	56.64	67.19	59.64	57.13	67.74	56.22	60.95
TiO ₂	0.92	0.87	1.04	1.19	0.87	0.34	0.42	1.16	1.25	0.96	0.19	0.75	0.85	0.32	0.80	1.20
Al ₂ O ₃	13.14	14.78	16.25	16.62	16.88	14.74	14.30	14.62	14.70	16.24	11.84	17.06	18.11	13.36	15.47	15.39
FeOt	9.83	9.51	5.91	6.57	5.51	2.25	3.07	6.05	6.82	6.91	1.77	5.72	6.65	2.54	5.89	6.27
Mn ₂ O ₃	0.20	0.17	0.10	0.12	0.10	0.04	0.06	0.10	0.11	0.11	0.05	0.11	0.11	0.05	0.10	0.11
MgO	11.74	13.11	4.41	3.80	2.94	0.69	0.79	1.97	2.59	5.12	0.41	5.64	4.84	0.94	4.04	2.47
CaO	12.39	10.65	8.45	7.96	7.68	2.96	2.83	5.56	4.84	9.08	5.09	6.71	7.67	3.21	10.30	4.79
Na ₂ O	2.72	2.23	3.22	3.39	3.69	4.91	4.05	3.70	2.93	2.98	3.41	4.44	4.46	3.18	3.06	3.23
K ₂ O	1.11	0.70	2.18	2.54	1.98	2.22	2.98	1.93	2.07	0.88	3.61	0.99	1.05	3.21	1.00	1.86
P ₂ O ₅	0.92	0.18	0.32	0.45	0.23	0.11	0.07	0.31	0.16	0.15	0.04	0.21	0.17	0.06	0.14	0.28
L.O.I.	3.64	1.82	2.36	1.51	1.96	1.26	5.69	5.26	5.16	3.05	8.35	1.41	1.26	8.28	5.34	5.92
Elementos traza en partes por millón (ppm)																
Li	15.39	12.58	21.46	8.07	7.07	15.09	6.90		24.58	14.46		31.88	13.70	19.87	19.85	17.65
Be	2.55	0.80	1.65	2.12	1.27	1.16	1.68		1.42	0.70		1.17	1.14	1.66	0.95	1.32
Sc	32.42	37.34	16.87	17.87	10.05	4.53	6.62		15.83	22.39		11.70	15.58	4.88	16.90	11.51
V	250.96	252.33	150.39	168.97	92.62	13.37	23.50		150.04	147.90		96.49	141.31	9.09	124.93	89.90
Cr	684.52	911.45	152.29	126.49	104.17	61.59	5.55		11.73	112.96		250.90	112.82	3.68	23.50	7.51
Ni	279.99	320.73	24.61	18.48	8.32	1.62	1.71		5.44	47.81		63.31	33.97	1.34	14.72	3.12
Rb	18.06	14.05	28.16	45.54	21.46	48.79	87.57		59.70	11.35		26.63	20.63	114.43	31.76	50.82
Sr	1102.65	355.54	1941.48	1973.19	1170.68	407.89	244.81		306.89	380.65		744.64	637.55	186.60	383.47	302.71
Y	38.58	20.83	16.78	22.95	15.22	11.15	24.32		25.69	15.26		13.03	14.87	24.02	16.25	26.28
Zr	279.04	88.96	241.54	288.45	140.98	116.51	198.18		187.97	77.03		132.42	113.55	201.85	103.10	185.94
Nb	6.37	3.94	4.50	6.56	5.09	4.23	7.17		8.16	3.65		4.89	4.40	6.90	4.81	8.14
Cs	1.81	0.18	0.61	0.90	0.58	1.60	2.43		2.59	0.70		1.51	0.62	4.43	3.84	3.92
Ba	1461.64	359.74	481.07	667.63	446.44	754.76	956.51		659.69	229.87		694.22	525.71	969.24	434.41	591.47

La	64.43	12.84	31.35	40.75	16.19	14.07	20.96	18.63	6.55	15.26	11.92	20.82	10.26	18.14
Ce	139.49	29.47	74.01	93.30	36.00	28.17	42.68	39.41	14.52	32.58	26.07	42.18	23.30	38.49
Pr	20.64	4.13	9.66	12.75	4.88	3.25	5.03	4.77	2.07	4.01	3.39	4.91	2.90	4.80
Nd	88.58	18.53	38.26	50.10	20.57	12.39	19.39	19.34	9.48	16.16	14.37	18.76	12.13	19.90
Sm	19.63	4.48	6.79	9.24	4.20	2.34	4.18	4.44	2.47	3.27	3.21	4.02	2.87	4.61
Eu	4.92	1.29	1.83	2.41	1.19	0.67	0.98	1.16	0.87	1.01	0.99	0.85	0.90	1.25
Gd	15.30	4.22	5.03	6.96	3.52	2.01	3.92	4.31	2.73	2.85	2.98	3.76	2.98	4.52
Tb	1.92	0.64	0.67	0.92	0.51	0.30	0.64	0.71	0.44	0.42	0.46	0.63	0.47	0.73
Dy	8.17	3.67	3.22	4.37	2.74	1.81	3.88	4.26	2.81	2.39	2.70	3.79	2.97	4.38
Ho	1.24	0.72	0.59	0.78	0.54	0.37	0.79	0.86	0.58	0.48	0.54	0.78	0.61	0.88
Er	3.06	1.98	1.60	2.10	1.46	1.09	2.31	2.44	1.58	1.31	1.49	2.27	1.68	2.48
Yb	2.28	1.91	1.39	1.81	1.36	1.16	2.41	2.45	1.51	1.25	1.43	2.42	1.63	2.47
Lu	0.32	0.29	0.20	0.27	0.20	0.18	0.37	0.37	0.22	0.19	0.21	0.37	0.25	0.37
Hf	5.94	2.13	6.44	7.60	3.65	3.02	4.99	4.48	1.82	3.03	2.73	5.13	2.50	4.49
Ta	0.25	0.20	0.22	0.32	0.28	0.37	0.54	0.63	0.24	0.31	0.31	0.54	0.34	0.67
Pb	9.99	3.63	6.11	7.32	6.97	8.95	10.94	8.84	2.94	6.88	5.83	11.23	6.03	8.19
Th	5.69	1.26	4.40	5.53	2.90	4.10	7.37	5.72	1.31	2.95	2.39	7.95	2.81	5.07
U	2.44	0.48	1.45	1.82	1.19	2.30	2.17	1.54	0.35	0.83	0.61	2.44	0.87	1.47
B	8.03	7.49	9.14	9.31	7.47	9.59	10.04	9.33	6.26	8.69	9.36	10.14	11.14	9.88
Co	44.92	47.85	19.59	20.00	10.74	2.34	3.54	13.23	28.11	18.45	20.28	2.98	20.46	10.27
Cu	79.48	63.67	49.94	49.01	16.09	2.13	3.71	15.74	37.91	21.42	24.66	3.32	30.44	12.74
Ga	15.96	14.94	23.24	24.07	20.02	15.93	16.65	18.25	16.60	18.15	19.00	15.37	17.06	17.35
Mo	1.28	1.84	2.99	3.18	2.52	2.36	2.12	1.33	1.05	3.37	2.82	2.17	2.22	1.37
P	0.88	0.19	0.33	0.46	0.23	0.11	0.09	0.17	0.12	0.22	0.19	0.07	0.14	0.28
Sb	0.19	0.13	0.13	0.15	0.19	0.27	0.32	0.35	0.12	0.27	0.19	0.29	0.22	0.28
Sn	1.39	0.85	1.48	1.88	1.14	0.99	2.03	1.74	0.93	0.99	0.90	2.13	-0.11	1.65
Ti	0.88	0.84	1.01	1.15	0.75	0.36	0.42	1.15	0.89	0.71	0.80	0.31	0.83	1.07
Tl	0.59	0.06	0.19	0.20	0.13	0.31	0.58	0.37	0.06	0.38	0.13	0.96	0.25	0.37
W	0.50	0.33	0.30	0.82	0.30	0.93	0.45	0.70	1.80	0.35	0.68	0.60	0.31	0.33
Zn	92.03	69.10	70.11	79.58	61.14	44.73	48.27	76.01	57.61	61.63	65.08	45.47	61.89	68.51

Anexo B. Análisis geoquímico en vidrio volcánico, piroxenos y plagioclasas por microsonda (EPMA)

a) Lapillita Ptp3 de Calamajué (Cal17-14a)

% óxidos analizados por micro sonda de electrones EPMA (no normalizado)

Id	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
1	56.15	1.44	12.77	8.09	7.03	8.17	2.27	0.88	0.15	0.14	97.08
2	56.17	1.43	13.42	7.86	6.40	8.03	2.53	0.87	0.17	0.21	97.07
3	55.97	1.54	12.45	8.57	6.85	8.06	1.22	0.62	0.17	0.19	95.63
4	56.24	1.39	14.16	8.48	5.65	7.07	2.06	0.82	0.17	0.20	96.24
5	55.36	1.53	11.75	9.23	6.85	7.70	1.60	0.64	0.24	0.20	95.12
6	56.11	1.32	14.24	8.47	5.58	8.71	1.75	0.50	0.19	0.14	97.00
7	56.20	1.61	12.20	9.33	6.46	7.34	1.97	0.73	0.23	0.24	96.30
8	55.86	1.50	12.08	8.87	7.73	7.95	1.89	0.78	0.19	0.16	97.01
9	55.08	1.22	13.60	9.03	6.70	8.47	1.53	0.62	0.22	0.14	96.62
10	55.08	1.22	13.60	9.03	6.70	8.47	1.53	0.62	0.22	0.14	96.62

Composición de plagioclasas calculadas con base en 13 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	2.44	0.00	1.51	0.03	0.02	0.61	0.38	0.01	0.00	0.00	13.00
2	2.43	0.00	1.53	0.03	0.02	0.61	0.37	0.01	0.00	0.00	13.00
3	2.44	0.01	1.50	0.04	0.04	0.61	0.35	0.01	0.00	0.00	13.00
4	2.43	0.00	1.51	0.03	0.05	0.62	0.35	0.01	0.00	0.00	13.00
5	2.42	0.00	1.53	0.03	0.03	0.62	0.37	0.01	0.00	0.00	13.00
6	2.42	0.00	1.53	0.03	0.03	0.62	0.35	0.01	0.00	0.00	13.00
7	2.42	0.00	1.52	0.03	0.03	0.62	0.38	0.00	0.00	0.00	13.00
8	2.42	0.00	1.53	0.03	0.03	0.62	0.37	0.01	0.00	0.00	13.00
9	2.41	0.00	1.54	0.03	0.02	0.62	0.36	0.01	0.00	0.00	13.00
10	2.42	0.00	1.53	0.03	0.02	0.62	0.37	0.00	0.00	0.00	13.00
11	2.41	0.00	1.55	0.03	0.02	0.62	0.35	0.00	0.00	0.00	13.00
12	2.41	0.00	1.53	0.03	0.03	0.62	0.36	0.01	0.00	0.00	13.00
13	2.39	0.00	1.57	0.03	0.02	0.63	0.37	0.00	0.00	0.00	13.00
14	2.39	0.00	1.56	0.02	0.02	0.63	0.37	0.01	0.00	0.00	13.00
15	2.38	0.00	1.57	0.03	0.02	0.64	0.36	0.01	0.00	0.00	13.00
16	2.37	0.00	1.58	0.03	0.02	0.66	0.34	0.00	0.00	0.00	13.00
17	2.35	0.00	1.61	0.02	0.02	0.68	0.32	0.00	0.00	0.00	13.00

Composición de piroxenos calculados con base en 10 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	1.94	0.02	0.22	0.30	1.15	0.29	0.04	0.01	0.01	0.00	10.00
2	1.94	0.01	0.16	0.31	1.29	0.25	0.01	0.00	0.01	0.00	10.00
3	1.91	0.02	0.18	0.29	1.29	0.27	0.02	0.00	0.01	0.00	10.00
4	1.91	0.02	0.17	0.28	1.33	0.26	0.01	0.00	0.01	0.00	10.00
5	1.91	0.02	0.18	0.28	1.34	0.25	0.01	0.00	0.01	0.00	10.00
6	1.93	0.01	0.13	0.28	1.34	0.27	0.02	0.00	0.01	0.00	10.00
7	1.92	0.02	0.16	0.29	1.37	0.22	0.01	0.00	0.01	0.00	10.00
8	1.93	0.01	0.14	0.28	1.37	0.23	0.01	0.00	0.01	0.00	10.00
9	2.00	0.01	0.04	0.28	1.53	0.12	0.00	0.00	0.01	0.00	10.00

b) Lapillita Ptp2 de Calamajué (Cal17-14b)

% óxidos analizados por micro sonda de electrones EPMA (no normalizado)

Id	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
1	64.41	0.76	14.06	4.50	1.29	3.42	1.66	1.89	0.08	0.18	92.26
2	63.66	1.44	13.09	5.92	1.10	3.08	1.38	2.00	0.10	0.27	92.05
3	60.82	1.22	14.59	5.85	1.53	4.15	1.42	1.75	0.07	0.20	91.59
4	61.00	1.33	13.76	6.10	1.41	3.85	1.75	1.84	0.10	0.31	91.46
5	62.11	1.22	14.88	5.38	1.12	3.86	1.68	1.73	0.10	0.21	92.30
6	61.42	1.23	15.20	5.34	1.14	4.45	2.20	1.52	0.08	0.27	92.86
7	62.32	1.24	14.25	5.96	1.55	3.90	1.11	1.72	0.12	0.23	92.39
8	62.64	1.25	14.54	5.64	1.53	4.11	1.84	1.80	0.11	0.27	93.73
9	61.38	1.25	14.42	6.03	1.74	4.56	1.71	1.76	0.10	0.27	93.20
10	61.41	1.31	14.60	5.94	1.76	4.34	1.90	1.75	0.07	0.23	93.32
11	60.48	1.21	14.57	6.00	1.84	4.51	1.71	1.70	0.08	0.24	92.34
12	61.09	1.22	14.43	5.91	1.61	4.30	1.66	1.71	0.12	0.26	92.32

Composición de plagioclasas calculadas con base en 13 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	3.01	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.91	0.00	0.00	13.00
2	2.76	0.00	1.23	0.01	0.00	0.24	0.74	0.02	0.00	0.00	13.00
3	2.60	0.00	1.40	0.01	0.00	0.42	0.54	0.02	0.00	0.00	13.00
4	2.56	0.00	1.43	0.01	0.00	0.44	0.55	0.01	0.00	0.00	13.00
5	2.56	0.00	1.44	0.02	0.00	0.47	0.46	0.02	0.00	0.00	13.00
6	2.54	0.00	1.44	0.01	0.00	0.48	0.51	0.02	0.00	0.00	13.00
7	2.52	0.00	1.45	0.03	0.01	0.51	0.45	0.03	0.00	0.00	13.00
8	2.58	0.01	1.33	0.08	0.09	0.51	0.35	0.02	0.00	0.00	13.00
9	2.48	0.00	1.52	0.01	0.00	0.54	0.44	0.01	0.00	0.00	13.00
10	2.32	0.00	1.65	0.02	0.01	0.70	0.30	0.00	0.00	0.00	13.00

Composición de piroxenos calculados con base en 10 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	1.95	0.01	0.05	0.38	0.73	0.85	0.02	0.00	0.02	0.00	10.00
2	1.95	0.01	0.06	0.37	0.73	0.85	0.02	0.00	0.01	0.00	10.00
3	1.86	0.04	0.18	0.39	0.73	0.80	0.03	0.00	0.01	0.00	10.00
4	1.82	0.06	0.25	0.44	0.74	0.73	0.03	0.00	0.01	0.00	10.00
5	1.95	0.01	0.05	0.36	0.75	0.87	0.02	0.00	0.01	0.00	10.00
6	1.87	0.03	0.18	0.37	0.77	0.80	0.03	0.00	0.01	0.00	10.00
7	1.87	0.03	0.18	0.38	0.78	0.78	0.03	0.00	0.01	0.00	10.00
8	1.80	0.06	0.30	0.39	0.81	0.71	0.03	0.00	0.01	0.00	10.00
9	2.02	0.00	0.02	0.84	0.97	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
10	2.02	0.00	0.02	0.84	0.97	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
11	1.94	0.01	0.04	0.86	1.03	0.07	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
12	1.96	0.00	0.02	0.85	1.06	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
13	1.96	0.00	0.02	0.85	1.07	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
14	1.96	0.00	0.02	0.84	1.07	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
15	1.95	0.00	0.02	0.85	1.08	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
16	1.94	0.01	0.10	0.54	1.33	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	10.00

c) Lapillita Ptp3 de Calamajué (Ca17-16)

% óxidos analizados por micro sonda de electrones EPMA (no normalizado)

Id	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
1	68.23	0.25	13.46	2.07	0.34	1.68	4.21	3.15	0.05	0.06	93.50
2	67.64	0.23	13.26	2.14	0.34	1.56	4.21	3.07	0.08	0.06	92.60
3	67.41	0.26	13.43	2.02	0.31	1.81	4.29	3.12	0.05	0.05	92.76
4	68.02	0.23	13.41	2.02	0.38	1.67	3.91	3.24	0.04	0.05	92.98
5	68.03	0.30	13.25	2.04	0.32	1.66	4.20	3.14	0.02	0.02	93.00
6	67.80	0.31	13.24	2.08	0.34	1.52	3.79	3.26	0.06	0.12	92.51
7	68.25	0.34	13.28	2.06	0.30	1.59	4.15	3.08	0.06	0.00	93.12
8	68.51	0.25	13.34	2.11	0.29	1.78	4.11	3.17	0.05	0.06	93.67
9	67.94	0.32	13.31	1.99	0.26	1.66	4.12	3.11	0.09	0.08	92.90
10	67.92	0.27	13.15	2.02	0.32	1.75	4.28	3.08	0.01	0.08	92.89

Composición de plagioclasas calculadas con base en 13 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	2.65	0.00	1.35	0.01	0.00	0.38	0.57	0.02	0.00	0.00	13.00
2	2.60	0.00	1.39	0.01	0.00	0.41	0.56	0.02	0.00	0.00	13.00
3	2.61	0.00	1.38	0.01	0.00	0.41	0.56	0.02	0.00	0.00	13.00
4	2.59	0.00	1.39	0.01	0.00	0.42	0.56	0.02	0.00	0.00	13.00
5	2.59	0.00	1.40	0.01	0.00	0.42	0.54	0.02	0.00	0.00	13.00
6	2.59	0.00	1.41	0.01	0.00	0.42	0.54	0.02	0.00	0.00	13.00
7	2.56	0.00	1.42	0.01	0.00	0.44	0.55	0.02	0.00	0.00	13.00
8	2.57	0.00	1.41	0.01	0.00	0.45	0.53	0.02	0.00	0.00	13.00
9	2.56	0.00	1.42	0.01	0.00	0.45	0.53	0.02	0.00	0.00	13.00
10	2.55	0.00	1.43	0.01	0.00	0.46	0.52	0.01	0.00	0.00	13.00
11	2.52	0.00	1.48	0.01	0.00	0.51	0.46	0.01	0.00	0.00	13.00
12	2.51	0.00	1.47	0.01	0.00	0.51	0.48	0.01	0.00	0.00	13.00

Composición de piroxenos calculados con base en 10 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	1.98	0.01	0.05	0.39	0.70	0.84	0.02	0.00	0.01	0.00	10.00
2	1.97	0.01	0.05	0.40	0.71	0.83	0.02	0.00	0.01	0.00	10.00
3	1.95	0.01	0.05	0.40	0.71	0.84	0.02	0.00	0.01	0.00	10.00
4	1.75	0.08	0.44	0.51	0.73	0.47	0.17	0.03	0.01	0.00	10.00
5	1.97	0.01	0.04	0.39	0.74	0.81	0.02	0.00	0.02	0.00	10.00
6	2.00	0.00	0.02	0.90	0.99	0.06	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00

d) Lapillita Ptp3 de Calamajué (Cal17-16)

% óxidos analizados por micro sonda de electrones EPMA (no normalizado)

Id	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
1	68.12	0.27	13.27	2.04	0.31	1.68	4.05	3.23	0.03	0.05	93.05
2	67.87	0.25	13.15	2.03	0.30	1.73	4.12	3.17	0.10	0.07	92.81
3	69.04	0.29	13.71	2.01	0.33	1.62	4.41	3.17	0.06	0.10	94.74
4	68.05	0.23	13.28	2.00	0.30	1.71	3.90	3.24	0.04	0.10	92.84
5	66.65	0.18	13.15	2.14	0.34	1.73	4.22	3.22	0.01	0.07	91.72
6	66.30	0.26	13.01	2.17	0.32	1.80	3.74	3.14	0.02	0.11	90.87
7	67.65	0.23	13.23	2.07	0.33	1.63	4.39	3.12	0.08	0.06	92.78
8	68.53	0.32	13.32	1.87	0.29	1.68	4.04	3.27	0.04	0.08	93.44
9	68.03	0.21	13.20	1.89	0.29	1.55	4.33	3.16	0.04	0.09	92.80
10	68.16	0.25	13.32	2.01	0.30	1.64	4.09	3.17	0.03	0.04	93.01

Composición de plagioclasas calculadas con base en 13 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	2.50	0.00	1.50	0.01	0.00	0.52	0.45	0.01	0.00	0.00	13.00
2	2.49	0.00	1.50	0.01	0.00	0.52	0.47	0.01	0.00	0.00	13.00
3	2.49	0.00	1.50	0.01	0.00	0.52	0.46	0.01	0.00	0.00	13.00
4	2.49	0.00	1.50	0.01	0.00	0.53	0.46	0.01	0.00	0.00	13.00
5	2.46	0.00	1.52	0.02	0.00	0.53	0.46	0.01	0.00	0.00	13.00
6	2.47	0.00	1.50	0.01	0.00	0.54	0.47	0.01	0.00	0.00	13.00
7	2.47	0.00	1.50	0.01	0.00	0.55	0.45	0.01	0.00	0.00	13.00
8	2.45	0.00	1.54	0.02	0.00	0.56	0.42	0.01	0.00	0.00	13.00
9	2.45	0.00	1.52	0.02	0.00	0.57	0.43	0.01	0.00	0.00	13.00
10	2.41	0.00	1.56	0.02	0.00	0.61	0.39	0.01	0.00	0.00	13.00

Composición de piroxenos calculados con base en 10 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	1.98	0.01	0.03	0.85	1.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
2	1.98	0.00	0.03	0.86	1.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
3	1.98	0.01	0.02	0.86	1.01	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
4	1.97	0.01	0.02	0.86	1.02	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
5	1.98	0.00	0.02	0.85	1.03	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00
6	1.99	0.00	0.02	0.86	1.03	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
7	1.99	0.00	0.02	0.83	1.04	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
8	1.99	0.01	0.03	0.84	1.04	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00
9	1.94	0.00	0.02	0.86	1.06	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
10	1.97	0.01	0.04	0.80	1.08	0.06	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00
11	1.99	0.00	0.03	0.80	1.10	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00
12	1.98	0.01	0.03	0.70	1.21	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00

e) Lapillita Ptp3 de IAG (IAG18-1)

% óxidos analizados por micro sonda de electrones EPMA (no normalizado)

Id	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
1	60.92	1.27	15.19	5.85	1.94	4.01	2.23	1.97	0.13	0.39	93.90
2	60.62	1.34	15.25	5.92	1.96	4.02	1.95	1.86	0.14	0.35	93.42
3	60.60	1.22	15.32	5.93	1.94	4.29	2.08	1.95	0.11	0.31	93.74
4	60.50	1.22	14.89	6.15	1.94	4.30	2.00	1.81	0.10	0.35	93.25
5	60.86	1.18	14.95	5.76	1.93	3.73	2.13	1.90	0.08	0.30	92.82
6	60.53	1.30	15.14	6.14	1.96	4.27	2.73	1.66	0.12	0.35	94.20
7	60.38	1.24	15.64	5.64	1.91	4.57	2.63	1.97	0.09	0.36	94.42
8	59.60	1.17	15.11	5.74	1.93	4.15	2.10	1.79	0.10	0.37	92.06
9	59.80	1.23	15.32	5.65	1.93	4.26	2.28	1.73	0.09	0.32	92.61
10	59.89	1.26	15.54	5.87	2.00	4.72	2.76	1.90	0.11	0.33	94.38
11	60.50	1.21	15.20	4.94	1.65	3.84	2.22	1.90	0.07	0.38	91.90

Composición de plagioclasas calculadas con base en 13 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	2.77	0.02	1.11	0.11	0.06	0.33	0.50	0.05	0.00	0.01	13.00
2	2.72	0.01	1.21	0.07	0.04	0.37	0.50	0.04	0.00	0.01	13.00
3	2.68	0.01	1.25	0.06	0.02	0.38	0.54	0.03	0.00	0.01	13.00

Composición de piroxenos calculados con base en 10 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	2.16	0.05	0.54	0.30	0.45	0.35	0.14	0.04	0.01	0.01	10.00

f) Lapillita Ptp2 de IAG (IAG18-2)

% óxidos analizados por micro sonda de electrones EPMA (no normalizado)

Id	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
1	59.12	1.37	13.39	7.81	3.13	7.13	2.78	0.85	0.15	0.20	95.93
2	59.19	1.35	15.41	6.78	2.59	6.81	3.34	0.81	0.15	0.22	96.65
3	59.32	1.58	13.03	7.89	3.09	5.58	2.60	1.08	0.16	0.19	94.52
4	60.28	1.55	13.13	7.26	3.08	5.48	2.18	1.22	0.18	0.21	94.57
5	59.79	1.57	13.06	7.84	3.26	5.44	2.05	1.15	0.14	0.26	94.57
6	59.94	1.20	16.59	5.99	2.43	7.03	3.34	0.86	0.11	0.15	97.63
7	59.32	1.57	12.62	7.43	3.81	5.71	2.03	1.13	0.17	0.22	94.01
8	58.27	1.61	12.32	7.23	3.13	5.32	1.88	1.13	0.14	0.24	91.26
9	58.28	1.40	15.26	6.89	2.57	6.24	3.16	0.94	0.09	0.19	95.03
10	60.29	1.65	12.74	8.22	3.09	5.28	1.89	1.15	0.14	0.24	94.68

Composición de plagioclasas calculadas con base en 13 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	2.58	0.02	1.33	0.08	0.06	0.49	0.39	0.02	0.00	0.00	13.00
2	2.49	0.00	1.47	0.03	0.01	0.55	0.43	0.01	0.00	0.00	13.00
3	2.48	0.00	1.47	0.03	0.02	0.56	0.42	0.01	0.00	0.00	13.00
4	2.50	0.01	1.42	0.04	0.05	0.56	0.40	0.01	0.00	0.00	13.00
5	2.47	0.00	1.50	0.02	0.02	0.57	0.42	0.01	0.00	0.00	13.00
6	2.45	0.00	1.50	0.03	0.01	0.59	0.40	0.01	0.00	0.00	13.00
7	2.44	0.00	1.52	0.03	0.02	0.60	0.38	0.00	0.00	0.00	13.00
8	2.42	0.00	1.53	0.03	0.02	0.61	0.39	0.01	0.00	0.00	13.00
9	2.42	0.00	1.54	0.02	0.02	0.62	0.37	0.00	0.00	0.00	13.00
10	2.38	0.00	1.58	0.02	0.01	0.65	0.33	0.00	0.00	0.00	13.00

Composición de piroxenos calculados con base en 10 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	1.91	0.01	0.35	0.29	1.04	0.29	0.07	0.00	0.01	0.00	10.00
2	1.95	0.01	0.27	0.30	1.15	0.23	0.04	0.00	0.01	0.00	10.00
3	1.90	0.02	0.24	0.31	1.17	0.29	0.04	0.00	0.01	0.00	10.00
4	1.92	0.01	0.21	0.30	1.23	0.28	0.03	0.00	0.01	0.00	10.00
5	1.90	0.02	0.15	0.29	1.24	0.38	0.01	0.00	0.01	0.00	10.00
6	1.98	0.01	0.04	0.44	1.38	0.13	0.00	0.00	0.01	0.00	10.00
7	1.97	0.01	0.12	0.33	1.38	0.14	0.01	0.00	0.01	0.00	10.00
8	1.96	0.01	0.10	0.37	1.39	0.14	0.01	0.00	0.01	0.00	10.00

g) Lapillita Ptp1 de IAG (IAG18-3)

% óxidos analizados por micro sonda de electrones EPMA (no normalizado)

Id	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
1	67.29	0.30	13.04	2.13	0.27	1.65	2.78	3.40	0.03	0.09	90.97
2	67.72	0.26	12.95	2.03	0.23	1.55	4.08	3.55	0.05	0.01	92.42
3	67.46	0.23	12.99	1.95	0.26	1.48	3.24	3.36	0.09	0.08	91.14
4	66.50	0.30	12.83	1.98	0.28	1.61	3.09	3.32	0.05	0.03	90.00
5	67.24	0.21	12.93	1.93	0.25	1.62	3.23	3.53	0.04	0.05	91.02
6	67.24	0.23	12.84	1.98	0.29	1.59	3.26	3.39	0.06	0.10	90.97
7	66.72	0.27	12.85	1.97	0.28	1.68	3.06	3.20	0.06	0.04	90.13
8	67.82	0.24	13.12	2.03	0.27	1.59	2.94	3.21	0.06	0.04	91.33
9	67.09	0.25	13.14	1.96	0.30	1.54	2.93	3.19	0.03	0.09	90.52
10	66.56	0.27	12.94	1.98	0.28	1.68	3.21	3.37	0.00	0.02	90.32
11	67.31	0.15	13.05	1.92	0.27	1.66	3.34	3.59	0.07	0.01	91.38

Composición de plagioclasas calculadas con base en 13 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	2.63	0.00	1.37	0.01	0.00	0.38	0.57	0.02	0.00	0.00	13.00
2	2.64	0.00	1.37	0.01	0.00	0.39	0.55	0.02	0.00	0.00	13.00
3	2.63	0.00	1.37	0.01	0.00	0.39	0.56	0.02	0.00	0.00	13.00
4	2.62	0.00	1.39	0.01	0.00	0.39	0.55	0.02	0.00	0.00	13.00
5	2.61	0.00	1.39	0.00	0.00	0.40	0.59	0.01	0.00	0.00	13.00
6	2.59	0.00	1.41	0.01	0.00	0.43	0.54	0.02	0.00	0.00	13.00
7	2.57	0.00	1.42	0.01	0.00	0.44	0.53	0.02	0.00	0.00	13.00
8	2.56	0.00	1.42	0.01	0.00	0.46	0.54	0.02	0.00	0.00	13.00
9	2.57	0.00	1.42	0.01	0.00	0.46	0.50	0.02	0.00	0.00	13.00
10	2.55	0.00	1.44	0.01	0.00	0.47	0.51	0.02	0.00	0.00	13.00
11	2.53	0.00	1.46	0.01	0.00	0.49	0.49	0.02	0.00	0.00	13.00
12	2.45	0.00	1.54	0.02	0.00	0.55	0.43	0.01	0.00	0.00	13.00

Composición de piroxenos calculados con base en 10 átomos de oxígeno

Id	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Total
1	1.72	0.10	0.48	0.47	0.75	0.48	0.18	0.02	0.01	0.00	10.00
2	1.98	0.00	0.02	0.91	0.94	0.06	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
3	1.97	0.00	0.02	0.87	1.02	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00
4	1.97	0.00	0.03	0.86	1.03	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
5	1.96	0.00	0.03	0.85	1.03	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
6	1.95	0.01	0.02	0.88	1.03	0.06	0.00	0.00	0.03	0.00	10.00
7	1.93	0.01	0.05	0.87	1.04	0.07	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00
8	1.94	0.01	0.03	0.85	1.05	0.07	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00
9	1.98	0.01	0.02	0.67	1.22	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	10.00

Anexo C. Análisis de geocronología U-Pb.

a) Arcosas líticas Os (Cal18-01)

Id	Concentraciones					Relaciones							Edades (Ma)					Conc.	
	U [ppm]	Pb [ppm]	Th [ppm]	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2 σ	rho	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2 σ	%
1	460	2	656	11262	1.43	0.0253	0.0041	0.0039	0.0002	0.28	0.0466	0.0072	25	4	25	1	29	369	86
2	168	1	104	4120	0.62	0.0254	0.0062	0.0039	0.0002	0.25	0.0467	0.0111	25	6	25	2	36	567	70
3	264	1	163	6552	0.62	0.0256	0.0031	0.0040	0.0002	0.33	0.0467	0.0054	26	3	26	1	32	278	79
4	173	1	59	4479	0.34	0.0268	0.0040	0.0042	0.0002	0.29	0.0468	0.0067	27	4	27	1	37	341	72
5	192	1	284	5040	1.48	0.0271	0.0041	0.0042	0.0002	0.28	0.0467	0.0067	27	4	27	1	31	345	87
6	221	1	238	5922	1.08	0.0276	0.0084	0.0043	0.0003	0.25	0.0466	0.0137	28	8	28	2	30	704	91
7	122	1	93	45	0.76	0.0284	0.0068	0.0044	0.0003	0.25	0.0468	0.0109	28	7	28	2	37	557	77
8	99	0	57	2848	0.58	0.0307	0.0189	0.0046	0.0007	0.23	0.0484	0.0289	31	19	30	4	121	1408	24
9	482	2	386	53	0.80	0.0310	0.0045	0.0048	0.0002	0.31	0.0465	0.0064	31	4	31	1	23	329	137
10	74	0	39	7	0.53	0.0313	0.0130	0.0049	0.0005	0.23	0.0466	0.0188	31	13	31	3	29	966	107
11	193	2	76	497	0.39	0.0729	0.0058	0.0112	0.0004	0.45	0.0474	0.0034	71	6	71	3	69	170	103
12	324	4	97	22709	0.30	0.0742	0.0058	0.0113	0.0004	0.45	0.0478	0.0033	73	6	72	3	91	165	79
13	348	4	251	68	0.72	0.0753	0.0050	0.0115	0.0004	0.52	0.0475	0.0027	74	5	74	3	72	136	102
14	346	4	248	24922	0.72	0.0760	0.0048	0.0116	0.0004	0.54	0.0477	0.0025	74	5	74	3	83	126	89
15	190	2	80	13995	0.42	0.0775	0.0053	0.0118	0.0004	0.49	0.0476	0.0029	76	5	76	3	78	143	96
16	267	3	67	19704	0.25	0.0779	0.0108	0.0119	0.0005	0.32	0.0476	0.0062	76	11	76	3	81	311	93
17	1400	17	454	434	0.32	0.0802	0.0040	0.0122	0.0004	0.66	0.0476	0.0018	78	4	78	3	80	88	98
18	146	2	55	31	0.38	0.0815	0.0107	0.0124	0.0005	0.32	0.0477	0.0059	80	10	79	3	86	294	92
19	15	0	7	1	0.48	0.0820	0.0196	0.0125	0.0008	0.26	0.0475	0.0110	80	19	80	5	72	549	112
20	489	6	332	168	0.68	0.0845	0.0051	0.0129	0.0004	0.57	0.0477	0.0023	82	5	82	3	83	116	99
21	189	2	106	15190	0.56	0.0848	0.0077	0.0129	0.0005	0.41	0.0476	0.0039	83	7	83	3	80	196	104
22	664	9	261	106	0.39	0.0860	0.0053	0.0131	0.0004	0.54	0.0477	0.0025	84	5	84	3	85	123	99
23	363	5	102	29703	0.28	0.0865	0.0050	0.0131	0.0004	0.57	0.0478	0.0023	84	5	84	3	87	113	97
24	209	3	89	17143	0.42	0.0864	0.0124	0.0132	0.0006	0.31	0.0477	0.0065	84	12	84	4	82	324	103
25	115	2	34	319	0.30	0.0868	0.0131	0.0132	0.0006	0.30	0.0477	0.0068	84	13	85	4	83	341	102
26	199	3	71	24	0.36	0.0907	0.0115	0.0137	0.0006	0.33	0.0480	0.0057	88	11	88	4	98	283	90
27	255	4	56	221	0.22	0.0929	0.0074	0.0139	0.0005	0.45	0.0484	0.0034	90	7	89	3	118	167	76
28	81	1	25	7030	0.31	0.0917	0.0162	0.0139	0.0007	0.28	0.0477	0.0081	89	16	89	4	85	401	105
29	191	3	67	16660	0.35	0.0927	0.0072	0.0140	0.0005	0.46	0.0479	0.0033	90	7	90	3	95	162	94
30	173	2	51	15130	0.30	0.0933	0.0102	0.0141	0.0006	0.37	0.0481	0.0049	91	10	90	4	104	240	86
31	199	3	66	213	0.33	0.0931	0.0073	0.0141	0.0005	0.45	0.0480	0.0034	90	7	90	3	100	167	90
32	675	10	233	432	0.35	0.0941	0.0068	0.0143	0.0005	0.48	0.0479	0.0030	91	7	91	3	92	150	99
33	607	9	219	539	0.36	0.0948	0.0048	0.0143	0.0005	0.63	0.0481	0.0019	92	5	91	3	106	93	87
34	233	3	62	79	0.27	0.0952	0.0081	0.0143	0.0005	0.43	0.0483	0.0037	92	8	92	3	112	182	82

35	360	5	78	73	0.22	0.0956	0.0085	0.0144	0.0005	0.42	0.0480	0.0039	93	8	92	3	101	190	91
36	1217	18	269	110129	0.22	0.0960	0.0044	0.0145	0.0005	0.73	0.0479	0.0015	93	4	93	3	96	74	97
37	102	1	29	9209	0.29	0.0958	0.0164	0.0146	0.0007	0.29	0.0477	0.0078	93	16	93	5	86	389	108
38	226	3	83	20608	0.37	0.0970	0.0073	0.0146	0.0005	0.47	0.0481	0.0032	94	7	94	3	105	156	89
39	202	3	60	1592	0.30	0.0969	0.0074	0.0146	0.0005	0.47	0.0480	0.0032	94	7	94	3	98	160	95
40	283	4	40	228	0.14	0.0973	0.0058	0.0147	0.0005	0.57	0.0479	0.0023	94	6	94	3	94	115	101
41	238	4	68	21850	0.28	0.0975	0.0093	0.0148	0.0006	0.40	0.0479	0.0042	94	9	95	4	93	208	101
42	236	3	127	21758	0.54	0.0977	0.0060	0.0148	0.0005	0.55	0.0480	0.0025	95	6	95	3	97	121	98
43	125	2	41	240	0.33	0.0985	0.0124	0.0148	0.0006	0.33	0.0482	0.0057	95	12	95	4	109	281	87
44	179	3	50	94	0.28	0.0982	0.0111	0.0149	0.0006	0.36	0.0479	0.0050	95	11	95	4	93	249	102
45	167	2	54	164	0.32	0.0989	0.0069	0.0149	0.0005	0.50	0.0482	0.0029	96	7	95	3	109	143	88
46	647	10	127	519	0.20	0.1004	0.0064	0.0149	0.0005	0.53	0.0489	0.0026	97	6	95	3	142	126	67
47	222	3	59	73	0.27	0.0985	0.0085	0.0149	0.0005	0.42	0.0479	0.0038	95	8	95	3	96	186	99
48	205	3	49	19049	0.24	0.0987	0.0074	0.0150	0.0005	0.46	0.0479	0.0032	96	7	96	3	94	158	102
49	566	8	50	187	0.09	0.0991	0.0055	0.0150	0.0005	0.61	0.0479	0.0021	96	5	96	3	96	104	100
50	170	3	85	16227	0.50	0.1010	0.0110	0.0153	0.0006	0.36	0.0480	0.0049	98	11	98	4	97	241	100
51	105	2	58	10002	0.55	0.1019	0.0123	0.0153	0.0006	0.33	0.0483	0.0055	99	12	98	4	113	269	87
52	113	2	65	10799	0.58	0.1015	0.0117	0.0153	0.0006	0.35	0.0480	0.0052	98	11	98	4	101	256	97
53	497	8	166	47531	0.33	0.1015	0.0063	0.0153	0.0005	0.55	0.0480	0.0025	98	6	98	3	100	122	98
54	149	2	37	250	0.25	0.1016	0.0075	0.0154	0.0005	0.47	0.0480	0.0031	98	7	98	3	97	155	101
55	97	2	30	12	0.30	0.1030	0.0173	0.0155	0.0008	0.29	0.0483	0.0078	100	17	99	5	114	380	86
56	68	1	29	6557	0.43	0.1028	0.0148	0.0155	0.0007	0.31	0.0480	0.0066	99	14	99	4	99	323	101
57	440	7	114	42717	0.26	0.1028	0.0081	0.0156	0.0006	0.46	0.0479	0.0034	99	8	100	4	94	166	106
58	241	4	97	23420	0.40	0.1031	0.0062	0.0156	0.0005	0.55	0.0480	0.0024	100	6	100	3	98	119	101
59	287	4	72	91	0.25	0.1041	0.0163	0.0156	0.0007	0.30	0.0484	0.0072	101	16	100	5	116	353	86
60	606	9	202	220	0.33	0.1039	0.0059	0.0157	0.0005	0.59	0.0481	0.0022	100	6	100	3	105	108	96
61	123	2	28	12037	0.22	0.1049	0.0164	0.0157	0.0007	0.30	0.0486	0.0072	101	16	100	5	128	350	78
62	327	5	120	215	0.37	0.1052	0.0056	0.0158	0.0005	0.62	0.0485	0.0020	102	5	101	3	121	97	83
63	183	3	57	18008	0.31	0.1045	0.0070	0.0158	0.0005	0.51	0.0481	0.0028	101	7	101	3	103	136	98
64	129	2	62	12681	0.48	0.1059	0.0108	0.0158	0.0006	0.38	0.0487	0.0046	102	10	101	4	132	222	76
65	104	2	54	10336	0.52	0.1052	0.0126	0.0159	0.0007	0.35	0.0480	0.0054	102	12	102	4	100	266	101
66	84	1	36	23	0.43	0.1058	0.0299	0.0159	0.0011	0.25	0.0482	0.0132	102	29	102	7	110	646	93
67	406	6	157	40492	0.39	0.1065	0.0055	0.0160	0.0005	0.63	0.0482	0.0019	103	5	102	3	111	94	93
68	305	5	107	30560	0.35	0.1062	0.0088	0.0160	0.0006	0.44	0.0480	0.0036	103	8	103	4	101	176	102
69	88	1	29	8873	0.33	0.1073	0.0232	0.0161	0.0009	0.27	0.0484	0.0101	103	22	103	6	117	491	88
70	77	1	16	7726	0.21	0.1081	0.0215	0.0162	0.0009	0.27	0.0484	0.0093	104	21	103	6	121	450	86
71	24	0	9	2428	0.38	0.1071	0.0324	0.0162	0.0012	0.24	0.0480	0.0141	103	31	103	7	100	695	103
72	226	4	155	22951	0.68	0.1081	0.0071	0.0163	0.0006	0.53	0.0482	0.0027	104	7	104	4	109	131	96
73	284	5	72	160	0.25	0.1081	0.0073	0.0163	0.0006	0.50	0.0481	0.0028	104	7	104	4	102	139	103
74	75	1	14	28	0.19	0.1085	0.0205	0.0164	0.0009	0.28	0.0481	0.0087	105	20	105	5	102	430	103
75	134	2	31	27	0.23	0.1095	0.0135	0.0165	0.0007	0.33	0.0482	0.0056	105	13	105	4	111	275	95

76	34	1	12	634	0.34	0.1098	0.0163	0.0165	0.0007	0.30	0.0482	0.0068	106	16	106	5	111	334	95
77	159	3	25	16466	0.15	0.1103	0.0145	0.0166	0.0007	0.33	0.0482	0.0060	106	14	106	5	109	294	97
78	85	1	31	8870	0.36	0.1108	0.0277	0.0168	0.0011	0.26	0.0478	0.0115	107	27	107	7	91	572	118
79	1265	21	316	216	0.25	0.1119	0.0047	0.0169	0.0005	0.76	0.0481	0.0013	108	5	108	3	102	65	106
80	24	0	12	35	0.48	0.1121	0.0542	0.0170	0.0018	0.22	0.0479	0.0226	108	52	108	12	95	1116	114
81	107	2	56	61	0.53	0.1133	0.0151	0.0171	0.0007	0.33	0.0482	0.0061	109	15	109	5	108	298	101
82	86	1	25	9276	0.29	0.1148	0.0129	0.0172	0.0007	0.35	0.0484	0.0051	110	12	110	4	118	248	93
83	147	3	61	15885	0.42	0.1150	0.0088	0.0173	0.0006	0.47	0.0482	0.0032	111	8	111	4	111	159	100
84	332	6	103	35938	0.31	0.1153	0.0084	0.0174	0.0006	0.47	0.0481	0.0031	111	8	111	4	106	152	105
85	301	5	154	32865	0.51	0.1166	0.0071	0.0175	0.0006	0.56	0.0483	0.0024	112	7	112	4	114	119	99
86	218	4	56	395	0.26	0.1186	0.0119	0.0177	0.0007	0.38	0.0486	0.0045	114	11	113	4	129	218	88
87	929	16	309	102592	0.33	0.1176	0.0074	0.0177	0.0006	0.54	0.0481	0.0025	113	7	113	4	105	125	108
88	109	2	35	12109	0.32	0.1184	0.0164	0.0178	0.0008	0.32	0.0482	0.0064	114	16	114	5	111	311	102
89	135	2	43	153	0.32	0.1197	0.0152	0.0180	0.0008	0.33	0.0482	0.0058	115	15	115	5	110	282	105
90	160	3	52	205	0.32	0.1201	0.0092	0.0181	0.0006	0.46	0.0482	0.0033	115	9	115	4	111	161	104
91	151	3	36	17018	0.24	0.1205	0.0095	0.0181	0.0006	0.45	0.0483	0.0034	116	9	116	4	112	165	104
92	133	2	47	85	0.35	0.1219	0.0221	0.0184	0.0009	0.28	0.0482	0.0084	117	21	117	6	108	410	109
93	109	2	45	46	0.42	0.1229	0.0108	0.0185	0.0007	0.42	0.0483	0.0039	118	10	118	4	115	188	102
94	220	4	105	487	0.48	0.1366	0.0081	0.0203	0.0007	0.57	0.0489	0.0024	130	8	129	4	143	114	91
95	83	2	18	10597	0.22	0.1369	0.0178	0.0204	0.0009	0.33	0.0487	0.0060	130	17	130	6	132	288	99
96	256	5	104	113	0.41	0.1385	0.0074	0.0206	0.0007	0.62	0.0488	0.0020	132	7	131	4	139	98	94
97	317	7	122	340	0.39	0.1391	0.0071	0.0208	0.0007	0.64	0.0484	0.0019	132	7	133	4	121	92	110
98	209	5	83	28434	0.40	0.1461	0.0082	0.0218	0.0007	0.59	0.0486	0.0022	138	8	139	5	131	106	106
99	334	8	117	172	0.35	0.1515	0.0080	0.0225	0.0007	0.62	0.0489	0.0020	143	8	143	5	142	97	101
100	264	6	81	39231	0.31	0.1625	0.0132	0.0239	0.0009	0.44	0.0494	0.0036	153	12	152	5	165	170	92
101	232	6	49	35267	0.21	0.1654	0.0116	0.0244	0.0008	0.49	0.0492	0.0030	155	11	155	5	159	143	97
102	77	2	111	38	1.44	0.1710	0.0202	0.0252	0.0010	0.35	0.0492	0.0054	160	19	160	7	158	259	102
103	382	10	62	856	0.16	0.1782	0.0087	0.0262	0.0009	0.67	0.0493	0.0018	166	8	167	5	164	85	102
104	296	8	175	112	0.59	0.1797	0.0113	0.0264	0.0009	0.54	0.0494	0.0026	168	11	168	6	167	124	101
105	64	2	65	10565	1.01	0.1800	0.0182	0.0265	0.0010	0.38	0.0494	0.0046	168	17	168	6	164	218	102
106	161	4	125	26996	0.78	0.1857	0.0130	0.0270	0.0009	0.50	0.0499	0.0030	173	12	172	6	189	141	91
107	102	3	54	98	0.53	0.2158	0.0193	0.0312	0.0012	0.42	0.0502	0.0041	198	18	198	7	206	188	96
108	142	5	38	178	0.27	0.2231	0.0177	0.0323	0.0012	0.45	0.0502	0.0036	204	16	205	7	203	165	101
109	49	8	27	145	0.55	1.7322	0.1150	0.1626	0.0058	0.54	0.0773	0.0043	1021	68	971	35	1128	111	86
110	325	61	66	2808	0.20	2.0116	0.0789	0.1888	0.0061	0.82	0.0773	0.0017	1119	44	1115	36	1128	45	99
111	77	24	31	146414	0.40	4.4281	0.1768	0.3042	0.0098	0.81	0.1056	0.0025	1718	69	1712	55	1724	43	99

^aU and Pb concentrations and Th/U ratios are calculated relative to GJ-1 reference zircon

^bCorrected for background and within-run Pb/U fractionation and normalised to reference zircon GJ-1 (ID-TIMS values/measured value); ²⁰⁷Pb/²³⁵U calculated using (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)/(²³⁸U/²⁰⁶Pb * 1/137.88)

^cRho is the error correlation defined as the quotient of the propagated errors of the ²⁰⁶Pb/²³⁸U and the ²⁰⁷/²³⁵U ratio

^dQuadratic addition of within-run errors (2 SD) and daily reproducibility of GJ-1 (2 SD)

^eCorrected for mass-bias by normalising to GJ-1 reference zircon (~0.6 per atomic mass unit) and common Pb using the model Pb composition of Stacey & Kramers (1975)

b) Arcosas líticas Ms1 (Cal18-03)

Id	Concentraciones					RATIOS							Edades (Ma)					Conc.	
	U [ppm]	Pb [ppm]	Th [ppm]	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2 σ	rho	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2 σ	%
1	137	0	89	2817	0.65	0.022	0.009	0.00339	0.00032	0.23	0.04621	0.01838	22	9	22	2	9	957	254
2	130	0	76	12	0.59	0.023	0.007	0.00342	0.00026	0.24	0.04772	0.01492	23	7	22	2	85	742	26
3	312	1	122	7346	0.39	0.025	0.004	0.00385	0.00018	0.31	0.04635	0.00672	25	4	25	1	16	348	156
4	231	1	118	5859	0.51	0.027	0.004	0.00425	0.00020	0.31	0.04642	0.00666	27	4	27	1	19	345	140
5	148	1	58	4243	0.39	0.031	0.009	0.00470	0.00032	0.24	0.04717	0.01290	31	9	30	2	58	652	52
6	160	1	72	4517	0.45	0.030	0.005	0.00472	0.00024	0.29	0.04654	0.00772	30	5	30	2	26	398	118
7	316	2	198	16	0.63	0.032	0.004	0.00489	0.00022	0.33	0.04714	0.00608	32	4	31	1	56	308	56
8	443	2	279	13186	0.63	0.032	0.003	0.00494	0.00020	0.38	0.04677	0.00456	32	3	32	1	37	233	85
9	232	1	98	7136	0.42	0.033	0.005	0.00506	0.00024	0.28	0.04689	0.00750	33	5	33	2	44	382	75
10	364	2	234	48	0.64	0.035	0.003	0.00540	0.00018	0.44	0.04668	0.00322	35	3	35	1	33	165	106
11	260	1	138	8723	0.53	0.036	0.004	0.00558	0.00022	0.38	0.04683	0.00448	36	4	36	1	41	229	88
12	325	2	209	21	0.64	0.037	0.005	0.00571	0.00024	0.31	0.04711	0.00604	37	5	37	2	55	306	67
13	244	3	154	30	0.63	0.072	0.008	0.01094	0.00044	0.37	0.04771	0.00486	71	8	70	3	85	242	83
14	212	2	81	14121	0.38	0.073	0.008	0.01106	0.00044	0.37	0.04797	0.00484	72	8	71	3	98	239	73
15	178	2	84	71	0.47	0.074	0.011	0.01124	0.00050	0.30	0.04778	0.00666	73	11	72	3	88	330	82
16	304	3	161	477	0.53	0.074	0.005	0.01130	0.00038	0.53	0.04736	0.00254	72	5	72	2	67	128	107
17	268	3	164	18181	0.61	0.074	0.010	0.01136	0.00048	0.33	0.04727	0.00576	73	9	73	3	63	290	116
18	181	2	77	36	0.43	0.076	0.012	0.01143	0.00056	0.30	0.04797	0.00740	74	12	73	4	98	365	75
19	623	7	258	43223	0.41	0.075	0.004	0.01149	0.00038	0.67	0.04730	0.00174	73	4	74	2	64	88	114
20	287	3	87	89	0.30	0.077	0.006	0.01168	0.00042	0.45	0.04799	0.00344	76	6	75	3	99	170	76
21	272	3	131	19252	0.48	0.078	0.008	0.01179	0.00046	0.38	0.04779	0.00460	76	8	76	3	89	228	85
22	345	4	116	24919	0.34	0.078	0.004	0.01194	0.00040	0.58	0.04722	0.00220	76	4	77	3	60	111	127
23	187	2	42	13600	0.22	0.079	0.010	0.01201	0.00052	0.33	0.04761	0.00596	77	10	77	3	80	297	96
24	216	3	47	15815	0.22	0.079	0.006	0.01204	0.00044	0.45	0.04756	0.00344	77	6	77	3	77	172	100
25	404	5	261	29752	0.64	0.080	0.005	0.01212	0.00042	0.54	0.04774	0.00260	78	5	78	3	86	129	90
26	174	2	151	12707	0.86	0.079	0.009	0.01213	0.00048	0.37	0.04751	0.00478	78	8	78	3	75	239	104
27	350	4	86	26144	0.24	0.080	0.005	0.01230	0.00042	0.52	0.04736	0.00268	78	5	79	3	67	135	117
28	70	1	30	5204	0.42	0.081	0.012	0.01234	0.00056	0.31	0.04784	0.00658	79	12	79	4	91	326	87
29	305	4	94	22842	0.31	0.082	0.007	0.01244	0.00046	0.42	0.04763	0.00384	80	7	80	3	81	191	98
30	489	6	210	124	0.43	0.084	0.005	0.01280	0.00044	0.58	0.04774	0.00228	82	5	82	3	86	113	95
31	448	6	107	36031	0.24	0.087	0.006	0.01327	0.00046	0.52	0.04770	0.00270	85	6	85	3	84	134	101
32	259	3	65	20969	0.25	0.087	0.010	0.01331	0.00054	0.34	0.04767	0.00532	85	10	85	3	83	265	103
33	498	7	191	40251	0.38	0.089	0.007	0.01344	0.00048	0.46	0.04791	0.00326	86	7	86	3	95	161	91
34	168	2	64	82	0.38	0.088	0.008	0.01344	0.00050	0.43	0.04771	0.00378	86	8	86	3	85	188	101
35	181	2	75	14727	0.41	0.089	0.011	0.01348	0.00056	0.35	0.04764	0.00532	86	10	86	4	81	265	106

36	605	8	228	50037	0.38	0.091	0.006	0.01384	0.00048	0.57	0.04750	0.00238	88	5	89	3	74	119	119
37	154	2	93	304	0.60	0.093	0.014	0.01388	0.00064	0.31	0.04836	0.00680	90	13	89	4	117	332	76
38	314	4	133	26358	0.42	0.092	0.006	0.01389	0.00048	0.55	0.04778	0.00252	89	6	89	3	88	125	101
39	172	2	92	14345	0.53	0.092	0.009	0.01390	0.00054	0.39	0.04814	0.00438	90	9	89	3	106	215	84
40	152	2	71	13029	0.47	0.094	0.012	0.01414	0.00060	0.33	0.04812	0.00588	91	12	91	4	105	289	86
41	918	13	183	136	0.20	0.094	0.006	0.01421	0.00050	0.54	0.04799	0.00266	91	6	91	3	99	131	92
42	274	4	88	23680	0.32	0.094	0.006	0.01423	0.00050	0.51	0.04794	0.00284	91	6	91	3	96	140	95
43	775	11	239	761	0.31	0.095	0.004	0.01437	0.00048	0.71	0.04781	0.00158	92	4	92	3	90	78	102
44	231	3	69	138	0.30	0.096	0.006	0.01452	0.00050	0.56	0.04815	0.00244	93	6	93	3	107	120	87
45	1184	17	210	104675	0.18	0.097	0.005	0.01455	0.00048	0.69	0.04825	0.00168	94	4	93	3	112	82	83
46	197	3	62	46	0.31	0.098	0.010	0.01462	0.00058	0.38	0.04843	0.00474	95	10	94	4	120	231	78
47	88	1	37	21	0.42	0.097	0.014	0.01467	0.00066	0.31	0.04786	0.00672	94	14	94	4	92	333	102
48	62	1	16	37	0.26	0.097	0.015	0.01469	0.00070	0.31	0.04787	0.00704	94	15	94	4	93	348	101
49	291	4	96	26195	0.33	0.097	0.006	0.01477	0.00050	0.53	0.04787	0.00258	94	6	95	3	93	128	102
50	365	5	147	32571	0.40	0.099	0.008	0.01480	0.00054	0.47	0.04838	0.00336	96	7	95	3	118	164	80
51	373	6	60	100	0.16	0.098	0.005	0.01482	0.00050	0.63	0.04792	0.00200	95	5	95	3	95	99	99
52	231	3	106	20607	0.46	0.098	0.009	0.01482	0.00056	0.42	0.04802	0.00390	95	9	95	4	100	192	95
53	182	3	54	16290	0.30	0.098	0.008	0.01484	0.00054	0.43	0.04792	0.00364	95	8	95	3	95	180	100
54	519	8	78	599	0.15	0.098	0.005	0.01487	0.00050	0.63	0.04802	0.00198	95	5	95	3	100	98	95
55	248	4	36	22641	0.15	0.099	0.010	0.01499	0.00058	0.38	0.04796	0.00450	96	10	96	4	97	222	99
56	155	2	53	279	0.34	0.102	0.008	0.01532	0.00056	0.44	0.04811	0.00354	98	8	98	4	105	174	94
57	102	2	39	68	0.38	0.102	0.012	0.01542	0.00064	0.35	0.04792	0.00530	99	12	99	4	95	262	103
58	178	3	72	16585	0.40	0.102	0.009	0.01548	0.00056	0.42	0.04787	0.00374	99	9	99	4	93	185	107
59	233	4	73	2015	0.31	0.103	0.007	0.01557	0.00054	0.50	0.04799	0.00286	100	7	100	3	99	141	101
60	156	2	72	63	0.47	0.104	0.018	0.01563	0.00080	0.29	0.04831	0.00814	101	18	100	5	114	398	87
61	97	2	26	9217	0.27	0.104	0.014	0.01569	0.00068	0.33	0.04794	0.00594	100	13	100	4	96	293	104
62	101	2	21	737	0.21	0.105	0.011	0.01572	0.00062	0.38	0.04848	0.00464	101	11	101	4	123	225	82
63	248	4	61	23510	0.25	0.105	0.008	0.01577	0.00056	0.45	0.04832	0.00340	101	8	101	4	115	166	88
64	257	4	70	24848	0.27	0.105	0.008	0.01585	0.00056	0.46	0.04806	0.00328	101	8	101	4	102	161	99
65	60	1	10	121	0.17	0.105	0.017	0.01593	0.00076	0.29	0.04784	0.00748	101	17	102	5	91	370	112
66	95	2	18	46	0.19	0.106	0.009	0.01594	0.00058	0.43	0.04821	0.00364	102	9	102	4	110	178	93
67	507	8	157	2952	0.31	0.107	0.007	0.01604	0.00056	0.50	0.04826	0.00292	103	7	103	4	112	143	92
68	182	3	62	17790	0.34	0.107	0.008	0.01606	0.00058	0.46	0.04818	0.00332	103	8	103	4	108	163	95
69	86	1	25	8323	0.29	0.106	0.014	0.01609	0.00070	0.33	0.04788	0.00602	103	14	103	4	93	298	110
70	205	3	50	20101	0.24	0.108	0.016	0.01610	0.00074	0.30	0.04860	0.00698	104	16	103	5	129	338	80
71	59	1	15	5729	0.25	0.112	0.037	0.01614	0.00134	0.25	0.05016	0.01632	107	36	103	9	202	755	51
72	132	2	46	13025	0.35	0.108	0.008	0.01619	0.00056	0.50	0.04820	0.00292	104	7	104	4	109	143	95
73	108	2	52	10445	0.48	0.108	0.012	0.01621	0.00066	0.36	0.04820	0.00516	104	12	104	4	109	253	95
74	57	1	26	5575	0.45	0.108	0.013	0.01638	0.00068	0.34	0.04802	0.00556	105	13	105	4	100	274	104
75	743	12	222	361	0.30	0.109	0.005	0.01639	0.00054	0.65	0.04815	0.00184	105	5	105	3	107	90	98

76	197	3	67	401	0.34	0.109	0.009	0.01644	0.00060	0.44	0.04805	0.00356	105	9	105	4	102	175	103
77	329	6	144	33363	0.44	0.111	0.008	0.01674	0.00060	0.48	0.04825	0.00312	107	8	107	4	112	153	96
78	47	1	16	4784	0.33	0.113	0.015	0.01682	0.00074	0.33	0.04852	0.00612	108	14	108	5	125	297	86
79	446	8	146	45655	0.33	0.112	0.009	0.01687	0.00060	0.47	0.04806	0.00324	108	8	108	4	102	159	105
80	72	1	23	14	0.32	0.113	0.020	0.01689	0.00086	0.29	0.04838	0.00822	108	19	108	5	118	401	92
81	165	3	56	59	0.34	0.112	0.019	0.01704	0.00084	0.29	0.04757	0.00784	108	19	109	5	78	391	140
82	269	5	147	52	0.55	0.114	0.008	0.01715	0.00060	0.47	0.04813	0.00316	109	8	110	4	106	155	104
83	65	1	22	6690	0.33	0.114	0.017	0.01722	0.00078	0.31	0.04820	0.00668	110	16	110	5	109	327	101
84	127	2	61	622	0.48	0.116	0.012	0.01746	0.00068	0.37	0.04813	0.00468	111	12	112	4	106	230	106
85	153	3	44	94	0.29	0.117	0.007	0.01761	0.00060	0.54	0.04811	0.00258	112	7	113	4	105	127	108
86	55	1	15	5859	0.27	0.117	0.021	0.01766	0.00092	0.29	0.04811	0.00840	112	20	113	6	105	413	108
87	202	4	57	21335	0.28	0.118	0.009	0.01771	0.00064	0.46	0.04837	0.00334	113	9	113	4	117	163	96
88	382	7	237	41249	0.62	0.120	0.007	0.01803	0.00062	0.61	0.04827	0.00218	115	7	115	4	113	107	102
89	141	3	60	17184	0.42	0.137	0.011	0.02037	0.00074	0.47	0.04870	0.00332	130	10	130	5	133	160	97
90	175	4	55	160	0.32	0.138	0.013	0.02049	0.00076	0.40	0.04892	0.00414	131	12	131	5	144	199	91
91	164	3	48	21109	0.29	0.142	0.009	0.02108	0.00072	0.54	0.04876	0.00258	135	8	134	5	136	124	99
92	51	1	9	43	0.18	0.142	0.017	0.02114	0.00088	0.34	0.04883	0.00558	135	16	135	6	140	268	97
93	355	8	208	46051	0.58	0.143	0.007	0.02133	0.00070	0.66	0.04872	0.00180	136	7	136	4	134	87	101
94	203	4	80	26220	0.39	0.145	0.014	0.02160	0.00084	0.39	0.04868	0.00446	137	14	138	5	132	215	104
95	213	5	50	28282	0.23	0.147	0.011	0.02185	0.00078	0.48	0.04877	0.00318	139	10	139	5	137	153	102
96	261	6	29	653	0.11	0.151	0.008	0.02238	0.00074	0.63	0.04901	0.00202	143	8	143	5	148	97	96
97	105	2	28	108	0.27	0.152	0.016	0.02246	0.00090	0.38	0.04898	0.00476	143	15	143	6	147	228	97
98	152	3	71	20741	0.47	0.151	0.018	0.02247	0.00092	0.34	0.04859	0.00550	142	17	143	6	128	266	112
99	220	5	100	114	0.46	0.155	0.009	0.02300	0.00078	0.61	0.04898	0.00214	147	8	147	5	147	102	100
100	310	7	127	42583	0.41	0.156	0.011	0.02304	0.00082	0.49	0.04910	0.00310	147	11	147	5	153	148	96
101	151	3	30	31	0.20	0.157	0.018	0.02321	0.00096	0.36	0.04900	0.00522	148	17	148	6	148	250	100
102	134	3	98	158	0.73	0.176	0.023	0.02574	0.00110	0.33	0.04950	0.00606	164	21	164	7	172	286	95
103	44	1	9	27	0.21	0.178	0.035	0.02597	0.00144	0.28	0.04982	0.00942	167	33	165	9	187	440	89
104	238	6	87	37512	0.36	0.179	0.012	0.02637	0.00092	0.54	0.04936	0.00270	168	11	168	6	165	128	102
105	237	6	88	149	0.37	0.181	0.013	0.02656	0.00092	0.49	0.04932	0.00304	169	12	169	6	163	144	104
106	69	2	67	11058	0.97	0.183	0.016	0.02666	0.00098	0.43	0.04975	0.00380	171	14	170	6	183	178	93
107	47	10	28	57618	0.59	2.200	0.117	0.20066	0.00682	0.64	0.07952	0.00324	1181	63	1179	40	1185	80	99
108	62	13	33	171	0.54	2.192	0.094	0.20124	0.00658	0.76	0.07900	0.00220	1179	51	1182	39	1172	55	101
109	45	9	23	54248	0.51	2.203	0.103	0.20222	0.00680	0.72	0.07901	0.00258	1182	55	1187	40	1172	65	101

^aU and Pb concentrations and Th/U ratios are calculated relative to GJ-1 reference zircon

^bCorrected for background and within-run Pb/U fractionation and normalised to reference zircon GJ-1 (ID-TIMS values/measured value); ²⁰⁷Pb/²³⁵U calculated using (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)/(²³⁸U/²⁰⁶Pb * 1/137.88)

^cRho is the error correlation defined as the quotient of the propagated errors of the ²⁰⁶Pb/²³⁸U and the ²⁰⁷/²³⁵U ratio

^dQuadratic addition of within-run errors (2 SD) and daily reproducibility of GJ-1 (2 SD)

^eCorrected for mass-bias by normalising to GJ-1 reference zircon (~0.6 per atomic mass unit) and common Pb using the model Pb composition of Stacey & Kramers (1975)

Anexo D. Análisis de geocronología por método Ar-Ar

a) Lava andesítica Ma1 (Cal17-19)

Pasos	Pwr (Watts)	³⁹ Ar x 10 ⁻⁶	% ³⁹ Ar	% ³⁹ Ar _{acum}	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar _K	2 σ	Edad (Ma)	2 σ	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	
1	0.30	979	0.19	0.19	2.20	0.72	19.96	6.53	4.77	310	1.28	
2	0.65	2631	0.52	0.71	1.85	0.29	16.80	2.61	10.77	331	2.51	
3	0.90	975	0.19	0.90	1.68	0.70	15.24	6.35	4.33	309	1.84	
4	1.10	2490	0.49	1.39	1.99	0.20	18.09	1.81	42.24	512	2.74	
5*	1.50	22553	4.44	5.83	2.10	0.03	19.04	0.25	71.02	1020	2.84	
6*	1.85	37792	7.43	13.26	2.07	0.02	18.75	0.15	80.39	1507	3.18	
7*	2.10	84942	16.71	29.97	2.09	1.00	18.94	3.00	82.93	1732	3.14	
8*	2.30	124790	24.54	54.51	2.08	0.01	18.84	0.08	86.33	2161	3.24	
9*	2.60	111235	21.88	76.38	2.07	0.01	18.74	0.08	88.63	2598	3.22	
10*	3.00	86827	17.08	93.46	2.09	0.01	18.95	0.07	93.80	4763	3.13	
11	4.00	33281	6.54	100.00	2.02	0.02	18.32	0.16	87.89	2440	3.74	
*Pasos usados para calcular la edad por isócrona							t=18.9±0.1 Ma	MSWD=1.1	n=6			

b) Lapillita de pómez Ptp1-Cal (Cal17-13)

Primer experimento

Pasos	Pwr (Watts)	³⁹ Ar x 10 ⁻⁶	% ³⁹ Ar	% ³⁹ Ar _{acum}	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar _K	2 σ	t (Ma)	2 σ	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K
1	0.45	38833	15.63	15.63	0.19	0.07	1.75	0.65	1.78	301	0.25
2	0.90	73083	29.41	45.04	0.38	0.04	3.48	0.37	6.21	315	0.74
3	1.35	38140	15.32	60.36	0.42	0.03	3.84	0.28	13.66	342	3.17
4	1.70	42327	16.94	77.30	0.59	0.02	5.41	0.19	35.96	461	8.65
5	2.00	31071	12.43	89.73	0.32	0.03	2.95	0.24	27.10	405	9.96
6	2.30	15435	6.17	95.90	0.24	0.04	2.18	0.36	26.14	400	11.02
7	2.80	4364	1.75	97.65	0.26	0.11	2.35	0.97	16.67	355	9.86
8	4.40	5893	2.35	100.00	0.30	0.11	2.72	0.99	9.06	325	12.35

Segundo experimento

Pasos	Pwr (Watts)	³⁹ Ar x 10 ⁻⁶	% ³⁹ Ar	% ³⁹ Ar _{acum}	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar _K	2 σ	t (Ma)	2 σ	% ⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K	
1	0.40	20979	4.48	4.48	0.28	0.08	2.58	0.69	3.23	305	0.40	
2	0.65	50336	10.76	15.24	0.32	0.02	2.91	0.22	11.11	332	0.34	
3	0.87	27202	5.81	21.05	0.37	0.03	3.35	0.24	21.07	374	0.70	
4	1.12	43197	9.22	30.27	0.33	0.02	2.98	0.18	22.83	383	3.24	
5*	1.35	60689	12.92	43.19	0.29	0.02	2.67	0.15	26.36	401	6.77	
6*	1.55	81207	17.27	60.45	0.29	0.01	2.60	0.13	29.87	421	8.22	
7*	1.75	47013	9.99	70.45	0.27	0.02	2.50	0.16	31.53	432	8.80	
8*	2.10	64047	13.61	84.05	0.27	0.02	2.48	0.15	29.36	418	9.58	
9*	2.50	46856	9.95	94.01	0.26	0.02	2.35	0.15	42.96	518	9.63	
10*	4.00	28269	5.99	100.00	0.26	0.03	2.39	0.30	13.71	342	13.38	
*Pasos usados para calcular la edad de meseta							t=2.6±0.1 Ma	MSWD=1	n=6			

Anexo E. Ubicación y descripción de muestras recolectadas

Muestra	Este	Norte	Latitud	Longitud	Unidad	Descripción
CAL17-1	778657	3279831	29.617	-114.122	Pzm	Esquisto de secuencia metasedimentaria.
CAL17-2	778748	3279807	29.617	-114.121	Pzm	Roca metavolcánica de tonalidad verde (epidota).
CAL17-3	777922	3279378	29.613	-114.130	Otr	Depósito color rosado compuesto por Lm (10%) depositados en una matriz de ceniza volcánica (90%). Líticos metamórficos (filitas>cuarcita>mármol) angulosos y baja esfericidad, con un tamaño de <5 cm. Matriz rica en bt>qz.
CAL17-4	777925	3279360	29.613	-114.130	Ms1	Depósito sedimentario color oscuro soportado en un matriz arenosa, compuesto en un 60% por Lv (máficos>félsicos) redondeados con un tamaño de <3 cm. Dispuesto en estratos de 30-50 cm con gradación normal, se clasifica como conglomerado polimictico.
CAL17-5	775630	3276809	29.591	-114.154	Ma1	Lava andesítica gris oscuro porfídica con fenocristales de hbl>>pl.
CAL17-6	775630	3276809	29.591	-114.154	Ma1	Lava andesítica gris beige micro-porfídica con fenocristales de hbl>>pl. Xenolitos de color amarillo.
CAL17-7	778961	3279101	29.611	-114.119	Os	Alternancia de areniscas de estratificación cruzada y conglomerados polimicticos. La muestra corresponde a un horizonte de areniscas con matriz tobacea.
CAL17-8	779881	3279215	29.611	-114.110	Otr	Parte superior de Otr. Depósito piroclástico color blanco con estratificación cruzada, muestra un espesor de 1.5 m.
CAL17-9	780968	3278586	29.605	-114.099	Os	Depósito epiclástico, consta de: matriz arenosa (60%)>Lv (félsicos; 35%)>minerales (qz y bt; 5%). Se clasifica como arenisca conglomerática con estratificación cruzada.
CAL17-10	781015	3278354	29.603	-114.098	Ptp1	Tefra pumicítica blanca. Compuesta por fragmentos esféricos de pómez>> líticos volcánicos (Ma1).
CAL17-11	783673	3278799	29.607	-114.071	Ma1	Lava andesítica porfídica de hbl.
CAL17-12	783212	3279155	29.61	-114.076	Os	Arenisca de grano grueso subyace a toba rosada Otr.
CAL17-13	780293	3277909	29.6	-114.106	Ptp1	Tefra pumicítica blanca inferior, fragmentos de pómez rica en hb>>líticos volcánicos (Ma1). Complemento y equivalente a CAL17-10.
CAL17-14a y b	781057	3278099	29.601	-114.098	Ptp2 y 3	Tefra pumicítica verde. Consiste en dos lapilitas de pómez verde-negra-rojiza muy vesiculares bien clasificadas con <10% de matriz de ceniza volcánica. Cal17-14a es la superior y Cal17-14b la inferior
CAL17-15	771988	3283577	29.652	-114.190	Md	Roca color rojizo de textura porfídica compuesta en 20% de cristales inmersos en una matriz desvitrificada (80%). Su proporción mineralógica consta de hbl>bt=pl=qz. hbl: fenocristales subhedrales 8 mm de tamaño, muestran orientación de flujo, bt: cristales subhedrales 2 mm de tamaño, qz: minerales anhedrales 2 mm de tamaño y pl: minerales subhedrales 3 mm de tamaño.
CAL17-16	772953	3286624	29.68	-114.180	Ptp1	Tefra pumicítica blanca rica en Lv, compuesta de: pómez (70%)>matriz (20%)>Lv (10%). Pómez: fragmentos redondeados de <4 cm de tamaño, ricos en hbl juvenil. Matriz: ceniza volcánica. Lv: líticos accidentales (andesíticos>>graníticos).
CAL17-17	773018	3286618	29.68	-114.179	Ptp2	Tefra pumicítica verde. Complemento de CAL17-14 (AM), corresponde a tefra verde inferior.
CAL17-18	773356	3286714	29.68	-114.175	Ptp1	Tefra pumicítica blanca. Depósito piroclástico de caída libre sin matriz, pómez>>líticos volcánicos.
CAL17-19	775454	3276653	29.589	-114.156	Ma1	Lava andesítica verde-café porfídica, consta de 20% de cristales depositados en una matriz desvitrificada, proporción mineralógica hbl>>pl.
CAL17-20	776951	3281132	29.629	-114.140	Otr	Depósito color rosado compuesto por: matriz (75%)>>líticos (15%)>pómez (10). Matriz de ceniza volcánica. Líticos: accidentales subangulosos con un tamaño de <5 cm, Lm(cuarcitas-filitas)>>Lv(andesitas) =Lp(tonalitas). Pómez: frag. redondeados de 5-15 cm.

CAL17-21	776323	3280783	29.626	-114.146	Ptp1	Lapillita blanca (inferior) de caída sin matriz de ceniza, 95% pómez, 5% líticos (Lv>Lp), 4-5 m de espesor.
CAL17-22	776363	3281434	29.632	-114.146	Otr	Roca color beige-rosado compuesta por: matriz (75%)>>pómez (15%)>líticos (10%)>cristales (2%). Matriz: Ceniza volcánica piro-consolidada. Pómez: Fragmentos parcialmente colapsados. Líticos: Lm>>Lp=Lv. Cristales: qz, bt y pl, 1-2 mm de diámetro. Presenta estructuras de flames, así como diferentes grados de soldamiento (más soldado en la parte media de la vertical).
CAL18-01	785096	3279381	29.612	-114.056	Os	Estratos de ~20-15 cm de espesor de arenisca pobremente consolidada compuesta por arenas de grano grueso a medio. Lv dacíticos>Lv pomez>Lv andesíticos.
CAL18-02	785096	3279381	29.612	-114.056	Otr	Toba con matriz 90% de matriz de ceniza volcánica pobremente consolidado con un contenido de líticos de 10%: Lv pómez(.5-2cm) > Xls(Bio>Qz>Hbl) > Lm(Esq). La base del depósito se encuentra más soldada.
CAL18-03	784579	3279032	29.609	-114.062	Ms1	Arenisca de grano medio a grueso con un espesor de, al menos, 10 mts. Presenta estratificación cruzada en los 8 mts más superiores de la secuencia.
CAL18-04	782516	3280908	29.626	-114.082	Ptp2	Tefra pumicítica verde. Deposito piroclástico de caída libre estratificado con ~1.5 m de espesor mínimo. 40% de matriz vs 60% de pómez; matriz de ceniza volcánica y líticos volcánicos de ~1 cm de diámetro; pómez redondeadas con diámetros máximos de ~1 cm.
CAL18-05	782516	3280908	29.626	-114.082	Ptp4	Tefra pumicítica blanca. Depósito de ~90 cm de espesor. 25% de matriz de ceniza volcánica vs 75% de pómez; pómez de color blanco con diámetro máximo de ~3cm.
CAL18-06	782351	3280982	29.627	-114.084	Pzm	Muestra de cuarcita tomada de Pzm.
CAL18-07	782794	3281058	29.627	-114.079	Brecha de falla	Brechas de falla en forma de diques cortando a Otr compuestas por clastos angulosos de Pzm (filitas) de hasta 20 cm de diámetro; 40% de matriz vs 60% de clastos.
CAL18-08	782102	3278351	29.603	-114.087	Ptp2	Tefra pumicítica verde. Deposito piroclástico de caída libre de 1 m de espesor; 15% de matriz de ceniza volcánica vs 85% de pómez de color verde afaníticas. Diámetro máximo de pómez de ~2.5cm, diámetro promedio de ~.8 cm.
CAL18-09	781670	3278359	29.603	-114.092	Ptp1	Tefra pumicítica blanca. Cinta de ~3m de espesor de una lapillita de pómez depositada en una matriz de ceniza volcánica; este depósito cuenta con una base de ceniza volcánica con abundancia de xls de hbl (10%), conforme se aproxima a la cima los fragmentos de pómez son más abundantes, hasta ocupar un 80% de la roca.
CAL18-10	785815	3277826	29.598	-114.049	Mb	Lava de color gris oscuro con textura micro porfídica; contiene un 10% de xls depositada en una matriz fina. Los cristales corresponden a plagioclasas y piroxenos.
CAL18-11	784368	3274908	29.572	-114.065	Mb	Lava basáltica porfídica de olivino con matriz de microcristales de px y plg.
CAL18-12	786036	3277754	29.597	-114.047	Kgr	Roca de tonalidad gris. Textura del intrusivo fanerítica; Xls de Plg=Qz=Hbl>Bio; Plg cristales subhedrales de ~.4cm, Qz cristales anhedrales ~.3cm, Hbl cristales subhedrales ~.8cm, Bio cristales subhedrales ~.5cm
CAL18-13	786036	3277754	29.597	-114.047	Mda	Dique color gris afanítico de 1 m de espesor cortando a Kgr.
CAL18-14	781341	3282635	29.642	-114.094	Pzm	Muestra de carbonatos intercalados con cuarcitas tomada en contacto con Kgr.
CAL18-15	787924	3273971	29.562	-114.028	Kgr	Roca intrusiva de color gris con textura fanerítica; Cristales de Qz=Plg>Ort=Óxidos de Fe
CAL18-16	790276	3273622	29.559	-114.004	Pzm	Metalaba o metasill dentro de esquistos de Pzm.
CAL18-17	787695	3276249	29.583	-114.030	Kgr	Roca intrusiva de textura fanerítica y composición intermedia. Plg=Ferromagnesianos>> Qz
CAL18-18	783988	3273576	29.56	-114.069	Ptp1	Tefra pumicítica blanca de ~80cm de espesor con un ~10% de líticos accidentales. Presenta un arreglo granodecreciente con pómez de ~1.5cm de diámetro. La muestra corresponde a la base de la unidad.
CAL18-19	783988	3273576	29.56	-114.069	Ptp4	Tefra pumicítica blanca superior con espesor ~50 cm. Presenta ~15% de líticos accidentales; sus pómez son de un tamaño máximo de ~2 cm y un tamaño promedio de ~.5cm
CAL19-01	773325	3287031	29.683	-114.176	Pzm	Dique afanítico ~andesítico de ~1 m de espesor cortando a esquistos de Pzm.
CAL19-02	780210	3278509	29.605	-114.107	Otr	Depósito de color beige/rosa de ceniza volcánica. Al menos 6 m de espesor. Matriz de ceniza 80%, 10% de Lm accidentales y xls, y 10% de pómez de ~5cm sin colapsar. Las pómez contienen xls de bio>plg.

CAL19-03	780318	3272488	29.551	-114.107	Otr	Facie soldada de Otr. Toba de color ~morado/rosa compuesta por un 90% de ceniza volcánica soldada, 5% de pómez desplomada, 5% de líticos metamórficos y xls accidentales en matriz. Carbonatos se encuentran rellenando fracturas de la roca.
CAL19-04	782138	3273291	29.557	-114.088	Mb	Lava basáltica equivalente a CAL18-11. Roca con textura microporfidica de olivino en matriz fina de px y plg
CAL19-05	782138	3273291	29.557	-114.088	Os	Muestra equivalente a CAL18-01. Paquete de al menos 8 m de espesor, presenta estratificación cruzada. Consiste en estratos de arenas de grano grueso, mal seleccionadas. Presenta facies subordinadas de conglomerados con Lv félsicos bien redondeados.
CAL19-06	784697	3275977	29.581	-114.061	Os	Nódulos de arcillas en areniscas de grano grueso de Os.
CAL19-07	784811	3275303	29.575	-114.060	Ms1	Arenisca de grano medio de unidad Ms1. Presenta estratificación cruzada y horizontes con nódulos de arcillas.
CAL19-08	784769	3275808	29.58	-114.060	Otr	Miembro superior de Otr. Toba rosada con 85% de matriz de ceniza, 10% de xls de biotita y plagioclasas y 5% de líticos accidentales de Pzm
CAL19-09	784811	3275303	29.575	-114.060	Otr	Primer pulso de Otr. Toba rosada con 80% de matriz de ceniza, 10% de xls de biotita y plagioclasas y 10% de líticos accidentales de Pzm.
CAL19-10	782698	3276616	29.587	-114.082	Ps3	Facie de areniscas de grano grueso dispuestas en laminaciones. Estratos poco consolidados.
CAL19-11	774259	3283183	29.648	-114.167	Md	Montículo de ~40 m de espesor de roca color gris/morado con textura microporfidica. ~10% de xls inmersos en una matriz vítrea. Hbl(euhedral de ~1mm) > Plg(subhedral ~2mm) = Bt(subhedral ~.5mm). Flujo de lava dacítica/ andesítica.