

GEOLOGÍA DE LA HOJA MONTERREY – 3247 I

ESCALA 1:50 000

ISBN: 978-9977-50-151-2

Departamento de Investigación

Dirección de Geología y Minas

MINAE



Geól. Martín Rojas Barrantes

Diciembre 2019

INDICE

ÍNDICE	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	9
1. RESUMEN.....	11
2. INTRODUCCIÓN	13
2.1 Antecedentes y justificación del proyecto	13
2.2 Marco geográfico.....	14
2.2.1 Ubicación	14
2.2.2 Población.....	14
2.2.3 Aspectos climáticos.....	16
2.2.4 Hidrografía	16
2.2.5 Suelos	16
2.2.6 Vegetación.....	18
2.3 Contexto tectónico y geológico regional	21
2.3.1 Ubicación geotectónica	21
2.3.2 Contexto Geológico Regional	23
2.3.3 Formación Venado	23
2.3.4 Grupo Aguacate.....	24
2.3.5 Formación Monteverde	25
2.4 Geomorfología.....	27
2.4.1 Superficies plano onduladas.....	28
2.4.2 Superficies irregulares y onduladas.....	28
2.4.3 Laderas de montaña.....	28

2.4.4	Laderas de valles	28
2.4.5	Valles de depositación y fondos de valle	29
2.4.6	Valle intermontano	29
2.4.7	Superficies de ruptura.....	29
2.4.8	Depósitos de deslizamiento.....	29
2.5	Metodología de trabajo.....	31
3.	ESTRATIGRAFÍA.....	37
3.1	Mioceno Medio – Superior.....	37
3.1.1	Sedimentación clástica y carbonatada [Formación Venado (Nfmv)]	37
3.2	Mioceno Superior	54
3.2.1	Grupo Aguacate (β Nag , $\alpha\beta$ Nag , ζ , β).....	54
3.3	Plioceno	63
3.3.1	Sedimentación de colmatación de cuenca (a-luN)	63
3.4	Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior.....	68
3.4.1	Unidad indiferenciada (igNQpt).....	68
3.5	Pleistoceno Inferior.....	74
3.5.1	Formación Monteverde (α - β Qmv)	74
3.5.2	Formación Buena Vista (lhQpt)	80
3.6	Holoceno.....	84
3.6.1	Unidad de tobas, tobas de lapilli y lapillitas del volcán Arenal (tQho)	84
3.6.2	Terrazas aluviales Nivel 1 (alQho).....	86
4.	PETROLOGÍA ÍGNEA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA	90
4.1	Introducción.....	90
4.2	Lavas del Grupo Aguacate (β Nag , $\alpha\beta$ Nag , ζ , β).....	90
4.3	Ignimbritas (igNQpt)	92

4.4	Unidad de tobas, tobas de lapilli y lapillitas del volcán Arenal (tQho).....	92
5.	TECTÓNICA	108
5.1	Sistema de fallas inversas E-O y pliegues asociados	113
5.2	Fallas normales asociadas al fallamiento inverso.....	119
5.3	Sistema de fallas de desplazamiento de rumbo y lineamientos asociados	122
5.4	Sistema de fallas de desplazamiento de rumbo dextral y lineamientos asociados	122
5.5	Sistema de fallas de desplazamiento de rumbo sinistral y lineamientos asociados	124
5.6	Diaclasas.....	126
6.	HISTORIA GEOLÓGICA.....	128
7.	GEOLOGÍA ECONÓMICA	130
7.1	Rocas ígneas	130
7.2	Hidrogeología.....	130
7.3	Hidrocarburos	132
8.	RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS	135
8.1	Minerales metálicos / no metálicos	135
8.2	Recursos energéticos	135
9.	HIDROGEOLOGÍA.....	137
10.	PUNTOS DE INTERÉS GEOLÓGICO	138
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	140

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mapa de ubicación de la Hoja Monterrey.....	15
Figura 2.2 Subórdenes de suelos en la Hoja Monterrey.....	18
Figura 2.3 Tipos de vegetación presente en la Hoja Monterrey.....	20
Figura 2.4 Deformación tectónica del Mioceno Medio – Tardío según Mescua et al., 2017	22
Figura 2.5 Mapa de formas del terreno de la Hoja Monterrey.....	30
Figura 3.1 Secuencia sedimentaria de la Formación Venado.	39
Figura 3.2 Sedimentos de la Formación Venado con presencia de fósiles.	40
Figura 3.3 Sedimentos de la Formación Venado mostrando la influencia tectónica en el área.	41
Figura 3.4 Secuencia de la Formación Venado en zona de falla inversa.	41
Figura 3.5 Rocas carbonatadas de la Formación Venado.	42
Figura 3.6 Areniscas calcáreas de la Formación Venado en zona de falla.	43
Figura 3.7 Sedimentos de la Formación Venado en zona de falla.	44
Figura 3.8 Microscopía de los sedimentos de la Formación Venado (My172).	45
Figura 3.9 Microscopía de los sedimentos de la Formación Venado (My611).....	46
Figura 3.10 Geocronología U-Pb en zirrones detríticos (My475).....	48
Figura 3.11 Geocronología U-Pb en zirrones detríticos (My611).....	50
Figura 3.12 Geocronología U-Pb en zirrones detríticos (P1s, Pozo Pataste).	52
Figura 3.13 Geocronología U-Pb en zirrones detríticos (T1s, Pozo Tonjibe).	53
Figura 3.14 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (dacitas con disyunción columnar).	57
Figura 3.15 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (andesitas basálticas).	57
Figura 3.16 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (basaltos).....	58
Figura 3.17 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (traquiandesita basáltica).	58
Figura 3.18 Microscopía de una dacita en el sitio My212.	59

Figura 3.19 Microscopía de una andesita basáltica en el sitio My444.....	59
Figura 3.20 Microscopía de un basalto en el sitio My374.	60
Figura 3.21 Microscopía de una diabasa en el sitio My321.....	60
Figura 3.22 Determinación mineralógica mediante microsonda en una dacita (My265).	61
Figura 3.23 Determinación mineralógica mediante microsonda en un basalto (My321).	61
Figura 3.24 Geocronología U-Pb en zircones (T2i, Pozo Tonjibe).	62
Figura 3.25 Sedimentos de colmatación de cuenca en el sitio My550.	65
Figura 3.26 Depósitos epiclásticos del Plio-Pleistoceno en el sitio My356.	65
Figura 3.27 Microscopía de los sedimentos de colmatación de cuenca (My568).	66
Figura 3.28 Microscopía de los sedimentos de colmatación de cuenca (My731).	66
Figura 3.29 Sedimentos de colmatación de cuenca en el sitio My598.	67
Figura 3.30 Corriente de densidad piroclástica en el sitio My411.....	70
Figura 3.31 Corriente de densidad piroclástica en el sitio My629.....	70
Figura 3.32 Corriente de densidad piroclástica en el sitio My380.....	71
Figura 3.33 Microscopía de una ignimbrita en el sitio My417.	71
Figura 3.34 Microscopía de una ignimbrita en los sitios My229 y My476.	72
Figura 3.35 Microscopía de una ignimbrita en el sitio My380.	72
Figura 3.36 Determinación mineralógica mediante microsonda de una ignimbrita (My476).	73
Figura 3.37 Depósitos de la Formación Monteverde (My132 y My133).	76
Figura 3.38 Depósitos de la Formación Monteverde (My160 y My651).	76
Figura 3.39 Depósitos de la Formación Monteverde en el sitio My379.	77
Figura 3.40 Microscopía de una andesita de la Formación Monteverde del sitio My379.	77
Figura 3.41 Depósitos piroclásticos de la Formación Monteverde (tobas).....	78
Figura 3.42 Depósitos piroclásticos de la Formación Monteverde (tobas de lapilli).....	78
Figura 3.43 Depósitos volcanosedimentarios de la Formación Monteverde (brechas).	79

Figura 3.44 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Monteverde (brechas).....	79
Figura 3.45 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista (brechas).	81
Figura 3.46 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista (brechas).	81
Figura 3.47 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista (brechas).	82
Figura 3.48 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista (sedimentos).....	82
Figura 3.49 Sedimentos epivolcánicos de la Formación Buena (areanas, limos y arcillas).	83
Figura 3.50 Sedimentos epivolcánicos de la Formación Buena Vista (brechas y sedimentos).	83
Figura 3.51 Sedimentos epivolcánicos de la Formación Buena Vista (arenas).	84
Figura 3.52 Unidad de tobas, tobas de lapilli y lapillitas del volcán Arenal (My238).	85
Figura 3.53 Unidad de tobas, tobas de lapilli y lapillitas del volcán Arenal (My243).	85
Figura 3.54 Terrazas aluviales Nivel 1 (terrazas litológicas de suelos lateríticos y paleoaluviones). .	87
Figura 3.55 Terrazas aluviales Nivel 1 (paleoaluviones).....	87
Figura 3.56 Terrazas aluviales Nivel 2.....	88
Figura 3.57 Depósitos epivolcánicos de los volcanes Arenal y Chato.	88
Figura 3.58 Tefras recientes y depósitos piroclásticos de la actividad histórica del volcán Arenal. ...	89
Figura 3.59 Tefras recientes y depósitos piroclásticos de la actividad histórica del volcán Arenal. ...	89
Figura 4.1 Diagramas de clasificación geoquímica de las rocas ígneas del área de estudio.....	94
Figura 4.2 Diagramas spider de multielementos normalizado a NMORB y REE normalizados a condritos de las rocas ígneas	95
Figura 4.3 Diagramas de variación de óxidos mayores de las rocas ígneas.	96
Figura 4.4 Diagramas de variación de elementos traza de las rocas ígneas.....	97
Figura 4.5 Diagrama de multielementos normalizado al manto primitivo.	98
Figura 4.6 Estimación de la composición a partir de los elementos incompatibles (Zr/SiO ₂ , Nb/Y)....	99
Figura 4.7 A) Diagramas de clasificación geoquímica de las ignimbritas.....	100
Figura 4.8 Diagramas de variación de óxidos mayores de las ignimbritas	101

Figura 4.9 Diagramas de variación de elementos traza de las ignimbritas.	102
Figura 4.10 Diagramas spider de multielementos normalizado a NMORB y REE normalizados a condritos de las ignimbritas.....	103
Figura 4.11 Diagramas de clasificación geoquímica de las tefras del volcán Arenal.....	104
Figura 4.12 Diagramas de variación de óxidos mayores de las tefras del volcán Arenal.....	105
Figura 4.13 Diagramas de variación de elementos traza de las tefras del volcán Arenal.....	106
Figura 4.14 A) Diagramas spider de multielementos normalizado a NMORB y REE normalizados a condritos de las tefras del volcán Arenal.....	107
Figura 5.1 Direcciones de buzamientos en red estereográfica de la Formación Venado.	111
Figura 5.2 Direcciones de rumbo y buzamientos de las fallas medidas en el área de estudio.	112
Figura 5.3 Depósitos sedimentarios de la Formación Venado en el sitio My573.....	114
Figura 5.4 Depósitos sedimentarios de la Formación Venado en el sitio My359.....	114
Figura 5.5 Depósitos volcánicos del Neógeno en zona de falla.....	115
Figura 5.6 Depósitos sedimentarios (Formación Venado) y volcánicos (Formación Grifo Alto) en zona de falla.	115
Figura 5.7 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate) en la cuenca del río Nilo. ...	116
Figura 5.8 Deslizamiento en depósitos volcánicos de la Formación Monteverde (zona de falla inversa en el sitio My381)	116
Figura 5.9 Depósitos volcánicos de la Formación Monteverde en el sitio My645.....	117
Figura 5.10 Depósitos volcánicos de la Formación Monteverde en el sitio My652.....	117
Figura 5.11 Depósitos volcánicos de la Formación Monteverde en el sitio My667.....	118
Figura 5.12 Depósitos holocénicos (paleoaluviones) en el río La Muerte.....	118
Figura 5.13 Depósitos holocénicos (paleoaluviones) en el río La Muerte.....	118
Figura 5.14 A) Fallas normales afectando los sedimentos de la Formación Venado	120
Figura 5.15 Depósitos sedimentarios del Neógeno (Formación Venado).....	120
Figura 5.16 Análisis cinemático y solución focal de la falla medida en el sitio My172.	121

Figura 5.17 Depósitos volcanoclásticos del Pleistoceno siendo afectados por fallas de desplazamiento de rumbo dextral (sitio My434 quebrada Catarata).....	123
Figura 5.18 Análisis cinemático y solución focal de la falla medida en el sitio My434.	123
Figura 5.19 Depósitos volcanoclásticos del Pleistoceno siendo afectados por fallas de desplazamiento de rumbo sinistral (sitio My275 río Nilo).....	124
Figura 5.20 Análisis cinemático y solución focal de la falla medida en el sitio My275.	125
Figura 5.21 Depósitos volcánicos y sedimentarios siendo afectados por diaclasas de alto ángulo (sitios My262 río Nilo y My441 río La Muerte).....	127
Figura 5.22 Direcciones de rumbo y buzamientos en red estereográfica de las diaclasas medidas en el área de estudio.	127
Figura 7.1 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto en el sitio My467. Muestra las características de muy alta dureza y resistencia de esta litología.....	133
Figura 7.2 Manifestaciones de agua subterránea en el sitio My728.	133
Figura 7.3 Suamos y saturación del suelo producto del drenaje de escorrentías sub-superficiales (sitio My735, noroeste de Jicarito).....	134
Figura 7.4 Drenajes de escorrentía sub-superficiales que forman pequeños manantiales (sitio My740, sureste de Jicarito).....	134
Figura 10.1 Dacitas con estructura típica de disyunción columnar de un cuerpo hipabisal (Sitio My265, margen derecha del río Nilo).....	139

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Muestras seleccionadas para los diferentes análisis en la Hoja Monterrey	36
Tabla 4.1 Muestras seleccionadas para análisis químicos de la Hoja Monterrey.....	93
Tabla 5.1 Fallas activas medidas durante el trabajo de campo en el área de estudio.....	110
Tabla 7.1 Registro de pozos utilizados para extracción de agua subterránea en la Hoja Monterrey (Fuente: AyA)	131

Tabla 8.1 Sitios de roca ígnea que puede ser de interés económico para la explotación de agregados..... 136

1. RESUMEN

La Hoja Monterrey se ubica en la transición del arco volcánico de Tilarán y la Cuenca de San Carlos. Es un área tectónicamente activa, principalmente en el sector suroeste de la hoja, donde hay mayor exposición y evidencias de fallamiento activo. La base de la secuencia estratigráfica está constituida por el vulcanismo antiguo del Grupo Aguacate. Sobre este vulcanismo e interdigitado con este se tienen los sedimentos clásticos y rocas carbonatadas de ambiente marino somero a litoral de la Formación Venado (Mioceno Medio – Superior). Aflora principalmente en las cuencas de los ríos La Muerte, Pataste y Jicarito. Una discordancia angular en el límite Mioceno – Plioceno marca el cambio a una sedimentación de colmatación de cuenca, constituida por areniscas, limolitas y lutitas. Esta discordancia se asocia posiblemente al evento tectónico regional documentado a finales del Mioceno e inicios del Plioceno.

La secuencia sedimentaria se interpreta ha sido interrumpida por una actividad magmática subvolcánica del Mioceno Superior asociado a la Formación Grifo Alto del Grupo Aguacate, correspondiente con una serie de cuerpos ígneos (dacitas, andesitas basálticas, traquiandesitas basálticas y basaltos) que afloran en diferentes sitios del sector suroeste de la hoja, cuencas altas de los ríos Nilo, Jicarito, Pataste y Purgatorio, y cuenca media del río La Muerte. En algunos sitios la secuencia sedimentaria se interpreta ha sido sobrecorrida por este vulcanismo. Esta actividad magmática es posible está relacionada con la deformación tectónica de la cuenca durante el Mioceno Medio - Superior.

El vulcanismo del Plioceno Superior – Pleistoceno corresponde con una corriente de densidad piroclástica concentrada (ignimbrita), la cual aflora de forma restringida en el sector oeste de la hoja (Quebrada Pavas y río La Muerte).

El vulcanismo del Pleistoceno Inferior está representado por la Formación Monteverde, que aflora en la mayor parte del área de la hoja y está constituida principalmente por coladas de lava de andesitas hasta basaltos muy meteorizadas, que forman en su mayor parte suelos residuales (lateritas) de color café pardo a rojizo, con remanentes de bloques aislados de lava. También se incluyen depósitos volcaniclásticos de tobas y brechas volcano sedimentarias subordinados. Los depósitos volcaniclásticos de la Formación Buena Vista constituida por flujos de lahar que forman brechas volcánicas muy endurecidas y sedimentos epivolcánicos asociados. Afloran principalmente en la cuenca del río Arenal y cuencas menores de los ríos Jicarito, Pataste y Purgatorio.

Los depósitos recientes holocénicos están constituidos por 5 unidades: 1) Depósitos aluviales antiguos y recientes de gravas, arenas y limos; 2) Tobas, tobas de lapilli y lapilitas del volcán Arenal; 3) Depósitos epivolcánicos del Arenal y Chato (bloques, gravas, arenas y limos); 4) Tefras del volcán Arenal; 5) Depósitos fluviales (arenas, gravas y bloques).

Asumiendo el espesor de sedimentos volcanogénicos perforados en el pozo Pataste (815 m en PCIAC/RECOPE, 1987; 728 m en Pizarro, 1993) y las elevaciones relativas a la que aflora la secuencia sedimentaria, se estima un espesor de la secuencia sedimentaria de 1200 metros. Este espesor de sedimentos cercano al arco volcánico de Tilarán, resulta en el inicio de una cuenca extensional anterior al Mioceno Medio.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Antecedentes y justificación del proyecto

El cuadrante de la Hoja Monterrey forma parte de la hoja número 3247-I del Instituto Geográfico Nacional, y representa el mapa geológico consecutivo número 28 de las 133 hojas del país a escala 1:50000. El proyecto forma parte del trabajo que por ley le asigna el Estado a la Dirección de Geología y Minas sobre el cartografiado geológico del país a escala 1:50000.

Estudios geológicos anteriores en el área y zona de empate de las Hojas Monterrey y Arenal, se incluyen los de Taylor (1966) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el cual realiza un reconocimiento del área de Venado con el fin de identificar vetas de lignito; Malavassi & Madrigal (1970) de la Dirección de Geología, Minas y Petróleo (DGMP), realizan un reconocimiento geológico de la zona norte de Costa Rica; Obando (1986) de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) realiza un estudio la estratigrafía de la Formación Venado y rocas sobreyacentes del Mioceno al Reciente; Calvo & Bolz (1987) de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) y la Universidad Técnica de Berlín, realizan el estudio de la secuencia sedimentaria de la Formación Venado y su ambiente de depositación. Sen Gupta et al (1986) estudian la edad de sedimentación volcániclastrica de la sección superior de la Formación Venado basado en foraminíferos bentónicos. También se incluye la revisión del mapa geológico de Costa Rica a escala 1:400000 de Denyer & Alvarado (2007) y el Atlas Tectónico de Costa Rica de Denyer et al. (2003). Más recientemente Ulloa et al. (2011) realizan un estudio de las zonas kársticas de Costa Rica en relación a su descripción, clasificación y aspectos geológicos incluyendo las cavernas de Venado.

Durante la década de los 80, el área de la Hoja Monterrey en las cercanías del pueblo de Pataste, fue de interés en las campañas de exploración de hidrocarburos de RECOPE. El interés surgió a raíz del estudio de las cuencas sedimentarias para tal fin y de las manifestaciones de petróleo y gas en superficie en el área, para lo cual se inició una campaña de levantamiento de líneas de reflexión sísmica y la perforación de los pozos Pataste N°1 (1979 m), Monterrey N°1 (620 m) y Monterrey N°2 (320 m) de PCIAC/RECOPE (1987-1988). De este proyecto se incluyen también otros informes y documentos internos de RECOPE como Rockwell D.W. & Associates/RECOPE (1985); Western Alas International/RECOPE (1988); Keating (1985) y Barboza & Segura (1998). Otros estudios de la Cuenca de San Carlos corresponden con Astorga et al. (1991), Astorga (1992), Ballesteros et al. (1995), Barboza, et al. (1997), Gazel et al. (2005) y Porras et al. (En preparación).

Actualmente el Departamento de Investigación de la Dirección de Geología y Minas, inició la puesta en marcha en el 2006 el plan de cartografiado geológico del país a escala 1:50000, en marzo del 2014 se inicia el estudio de la geología superficial de la Hoja Monterrey con estudiantes de la práctica geológica de la Escuela Centroamericana de Geología, donde se obtiene un total de 120 puntos con información litológica.

2.2 Marco geográfico

2.2.1 Ubicación

El área de estudio se encuentra ubicada en la región Huetar Norte de Costa Rica, específicamente en las coordenadas geográficas extremas 10°39'55,009"N - 84°44'52,986"O y 10°29'55,045"N - 84°29'52,991"O. En el sistema de coordenadas CRTM05 oficial para el país, se localiza entre las longitudes 418118 - 445513 y las latitudes 1160934 – 1179422 (Figura 2.1).

Considerando la división política administrativa la hoja Monterrey se encuentra en su totalidad en la provincia de Alajuela y comprende segmentos de tres cantones, Guatuso, Los Chiles y San Carlos, siendo este último quien conforma la mayoría del territorio. A escala de distrito el área de estudio intersecta un total de siete unidades, San Rafael de Guatuso, San Jorge de Los Chiles, Monterrey, Venado, Fortuna, Cutris y Pocosol de San Carlos.

2.2.2 Población

La hoja Monterrey se encuentra ocupada por pequeños poblados rurales de muy baja densidad que se distribuyen de manera irregular en toda el área de estudio, específicamente en el distrito de Monterrey se incluyen las comunidades de Monterrey, Mirador, Montelimar, Cedros, Santa Marta, Santo Domingo, Pataste Arriba, San Antonio, San Andrés, Maquencal, Bajillo, Delicias, Chambacú, Caño Ciego, San Miguel y Orquidea.

En el distrito de Pocosol se resaltan las poblaciones de Esterito, Estero, Estrella, Buenos Aires, San Diego, Nieves, Ángeles, Juanilama, Jazmín, Santa Rosa, Fátima, Santa María y Acapulco. Para la zona referente al distrito de Venado se ubica Santa Eulalia, La Esperanza, Linda Vista, Delicias, Jicarito y Puerto Seco.

En el límite sur de la hoja, se localizan dos asentamientos pertenecientes al distrito de Fortuna que serían Álamo y La Palma, y en el límite norte, Finca la Garita y Pataste del distrito de San Rafael de Guatuso, así como también Colonia París del distrito de San Jorge de Los Chiles.

Todas estas poblaciones se pueden considerar de muy baja densidad, dentro de las actividades productivas predominan los sectores primarios de la economía, siendo sobre todo la ganadería y la agricultura extensiva de piña, caña de azúcar y otros tubérculos los principales ingresos para la región.

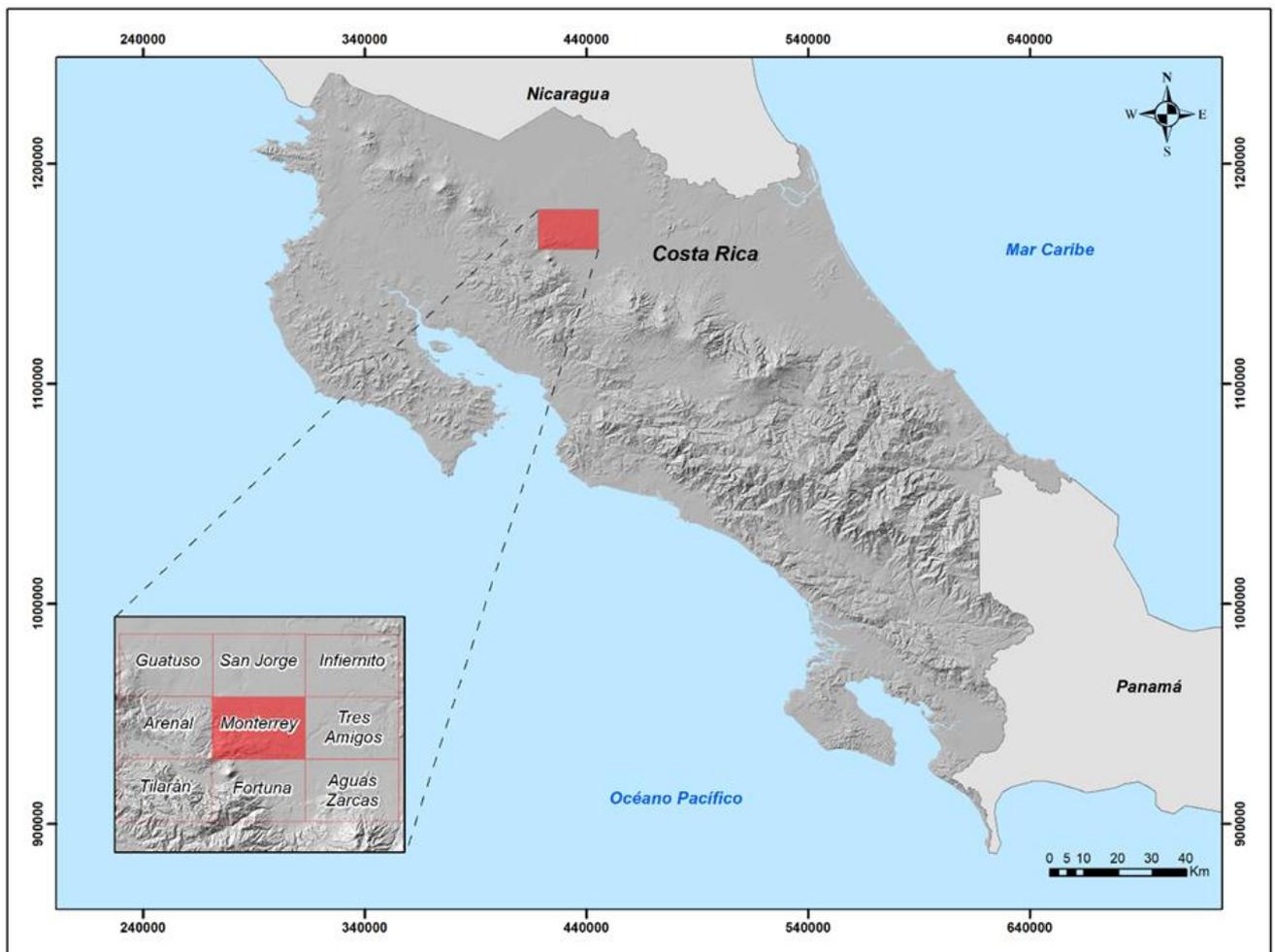


Figura 2.1 Mapa de ubicación de la Hoja Monterrey

2.2.3 Aspectos climáticos

La Hoja Monterrey se ubica en su totalidad en la vertiente del caribe, específicamente al norte del país entre las llanuras de San Carlos y las llanuras de Los Guatusos, forma parte de la región climática Atlántica de Costa Rica. En esta área de estudio la temperatura mínima se estima en 21°C, con una media de 25° y una máxima 30°C; además posee altos índices de humedad relativa cercanos al 86%. (Bermudez, 2005)

La precipitación anual ronda en promedio los 2985 mm anuales, con áreas desde los 5000 mm hasta los 2000 mm, sin una época seca marcada pues se caracteriza por tener precipitaciones durante todos los meses del año. (IMN, 2009).

2.2.4 Hidrografía

Como se mencionó anteriormente, la Hoja Monterrey se localiza en la vertiente atlántica del país, forma parte de las grandes cuencas binacionales del río San Juan y del Lago de Nicaragua. Se encuentra regado por las microcuencas del río La Muerte y Jicarito de la subcuenca del río Cucharón; Pataste y Caño Ciego afluentes de la subcuenca del río Frio; Chambacú, Acapulco y Quebrada Santa María pertenecientes a la subcuenca del río Pocosol; así como el río Arenal y las quebradas Estero y Esterito, pertenecientes a la subcuenca del río San Carlos.

El área se caracteriza por los patrones de drenaje dendríticos, esto quiere que la hidrografía se encuentra en función de los afluentes primarios y secundarios que se distribuyen y bifurcan en múltiples direcciones y ángulos.

2.2.5 Suelos

Considerando el mapa de suelos de Costa Rica del año 2013, en escala 1:200.000, elaborado por la Universidad de Costa Rica, la Asociación Costarricense de las Ciencias del Suelo y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuario, del Ministerio de Agricultura y Ganadería, se definen la presencia de cinco ordenes de suelo sobre el área referente a la hoja Monterrey, los cuales son andisoles, entisoles, inceptisoles, ultisoles y una combinación entre andisoles y ultisoles (Figura 2.2).

El orden de los andisoles se encuentra en un 2,1% del área de estudio y se compone por el suborden udands, los cuales se definen como andisoles propios de climas húmedos, se localizan sobre la cuenca alta del río Arenal.

Udands que tienen, en la mitad o más de cada pedón, un horizonte plácico dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo mineral o de la parte superior de una capa orgánica con propiedades ándicas de suelo, cualquiera que esté más somera.” (USDA & NRCS, 2006)

En el orden de los entisoles se encuentra un 2,5% del área de la hoja Monterrey, específicamente poseen el suborden orthents, el cual se caracteriza por ser una capa delgada de material relacionada con procesos erosivos recientes en zonas donde los minerales meteorizables no se encuentran presentes. Este tipo de suelo se encuentra localizado sobre la cuenca alta del río Arenal.

Orthents que tienen en años normales, una temperatura media anual del suelo de 0°C o más fría y una temperatura media del suelo de verano que es de 8°C o más fría si no existe un horizonte O, o es de 5°C o más fría si existe un horizonte O” (USDA & NRCS, 2006)

Los inceptisoles corresponden al tercer orden de suelos, comprenden un 4,3% del área total, distribuido en dos subórdenes distintos, los suelos aquepts con un pequeño porcentaje menor al 0,1% y los suelos udepts equivalente al 4,2% del área. El suborden aquepts posee la característica de ser un suelo inceptisol que posee presencia de agua muy cerca de la superficie, se localiza específicamente sobre el límite sureste de la hoja Monterrey

Los aquepts, son inceptisoles que tienen un epipedón plaggen o antrópico” (USDA & NRCS, 2006)

Mientras que los udepts son inceptisoles característicos de climas húmedos, se encuentran específicamente sobre la cuenca media y baja del río arenal y la cuenca baja del río Pataste en el borde noroeste del área de estudio.

Udepts que tienen un horizonte sulfúrico que tiene su límite superior dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral” (USDA & NRCS, 2006)

Los suelos de orden ultisol comprenden la mayor parte del área equivalente a un 69,1% de la hoja Monterrey. En relación al suborden estos ultisoles son del tipo udults, los cuales son característicos de climas con alta humedad. Están localizados sobre la cuenca baja de los ríos La Muerte y Jicarito, cuenca media y baja del río Pataste, Purgatorio, Arenal y la quebrada Esterito, así como casi la totalidad de la cuenca del río Chambacú, Caño Ciego, Pocosol, Acapulco quebrada Santa María y quebrada Estero.

Udults que tienen uno o más horizontes dentro de los 150 cm de la superficie del suelo mineral en los cuales la plintita forma una fase continua o constituye la mitad o más del volumen” (USDA & NRCS, 2006)

El último orden de suelos a describir corresponde a la combinación de andisoles y ultisoles, estos equivalen al 21,8% de la hoja Monterrey. En el suborden se destaca la presencia de andisoles udults descritos anteriormente, así como ultisoles de tipo humults que poseen la característica de estar bien drenados y con presencia de gran cantidad de materia orgánica.

Los humults son otros ultisoles que tienen un régimen de humedad údico (USDA & NRCS, 2006). Este tipo de suelos se encuentran sobre las cuencas medias y bajas de río La Muerte y Arenal, la cuenca alta y media del río Jicarito y Pataste, así como la cuenca alta del río Purgatorio, Chambacú, Pocosol y quebrada Esterito.

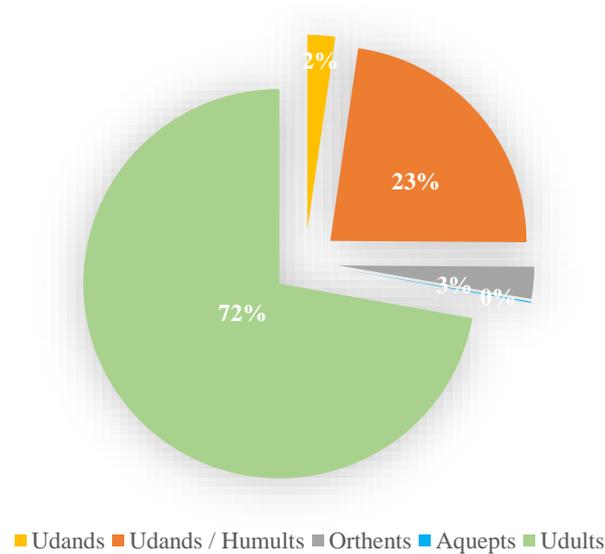


Figura 2.2 Subórdenes de suelos en la Hoja Monterrey

Fuente:

UCR, ACCS, INTA, 2013

2.2.6 Vegetación

Con respecto al mapa de zonas de vida de Holdridge, se localizan en la hoja Monterrey cuatro diferentes tipos, así como tres unidades de transición (Figura 2.3), las cuales se detallan a continuación:

- Bosque pluvial premontano (bp-P): corresponde apenas a un 1% de la hoja Monterrey, se localiza en las cuencas altas de los ríos La Muerte, Pataste y Arenal. Son bosques con precipitaciones entre 4000 y 8000 mm anuales entre los 600 y 1200 msnm del tipo perennifolio (siempre verde el

bosque nunca pierde sus hojas por la cantidad de agua presente), con mucha densidad y diversidad de especies que pueden superar hasta 30 metros de altura. (Quesada, 2007)

- Bosque muy húmedo premontano (bmh-P): es equivalente a un 7% del área de estudio, se localiza entre los 600 y 1200 msnm se caracteriza por precipitaciones entre 2000 y 4000 mm anuales, se encuentra en las cuencas altas de los ríos Arenal, Purgatorio, Pataste, Jicarito y La Muerte.

- Bosque muy húmedo tropical (bmh-T): este tipo de bosque se localiza específicamente entre la cuenca alta y media del río La Muerte y equivale a un 1% del área de interés, se caracteriza por precipitaciones que van entre los 4000 mm y 6000 mm anuales en zonas menores a los 600 msnm. Se considera perennifolio, pues el patrón climático es bien definido con la presencia únicamente de pequeños periodos de disminución de lluvia. Se consideran bosques muy diversos donde algunas especies pueden sobrepasar los 50 metros de altura. (Quesada, 2007)

- Bosque húmedo tropical (bh-T): corresponde al 9% de la hoja Monterrey, son zonas donde la precipitación anual se encuentra entre 1800 y 4000 mm y las elevaciones no superan los 600 msnm, posee una pequeña estación seca que puede ir desde los 0 hasta los 5 meses, hay presencia de sotobosque con especies perennifolias. (Quesada, 2007)

- Bosque muy húmedo tropical transición a premontano (bmh-T12): este tipo de vegetación se localiza en un 17% del área de estudio, específicamente en las cuencas altas del río Arenal, Pataste, Jicarito y La Muerte. Las precipitaciones se estiman entre 4000 y 8000 mm anuales con elevaciones aproximadas a los 600 msnm o superior.

- Bosque muy húmedo premontano transición a basal (bmh-P6): esta zona de vida es la más predominante en el área de estudio pues se extiende en el 59% del total, se desarrolla en sitios con precipitaciones entre 2000 y 4000 mm anuales, con elevaciones aproximadas a los 600 msnm o menos.

Se extiende por las cuencas medias y bajas de los ríos La Muerte, Jicarito, Pataste, Purgatorio y Arenal, en la cuenca alta de la Quebrada Esterito y del río Pocosol, Chambacú y Caño Ciego.

- Bosque húmedo tropical transición a perhúmedo: tipo de bosque predominante en las cuencas de los ríos Chambacú, Pocosol, Acapulco, Quebrada Esterito, Quebrada Estero y Quebrada Santamaría, localizados en el sector este de la hoja Monterrey. Se caracteriza por crecer en zonas de precipitación de entre los 2000 a los 4000 mm anuales en el piso altitudinal basal por debajo de los 600 msnm.

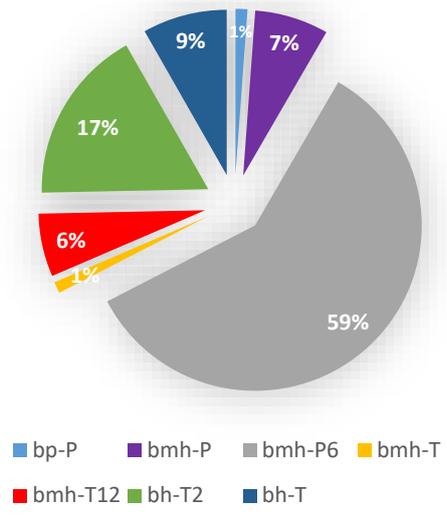


Figura 2.3 Tipos de vegetación presente en la Hoja Monterrey

2.3 Contexto tectónico y geológico regional

2.3.1 Ubicación geotectónica

Costa Rica se encuentra en el suroeste de la Placa Caribe y el Noreste de la trinchera centroamericana. La subducción de la placa Coco debajo de la placa Caribe (Protti, 1995; DeMets, 2001), ha desarrollado una deformación significativa a lo largo del tiempo (Morell et al., 2012; Mescua et al., 2017).

La cuenca de San Carlos es una cuenca extensional intra-arco localizada en el norte de Costa Rica (Astorga et al., 1991) (Figura 1). Las deformaciones tectónicas detectadas en la cuenca de San Carlos después de la campaña de exploración de hidrocarburos de 1970-1990 se han atribuido a fallas normales con grábenes típicos de una cuenca de rift, con depositación de sedimentos carbonatados y clásticos marinos Cenozoicos y deformación contraccional de fallas inversas (Western Atlas International/RECOPE, 1988; Astorga et al., 1991; Ballesteros et al., 1995; Barboza et al., 1997; Barboza & Segura, 1998; Denyer y Alvarado, 2007). Esta serie de estructuras de fallas normales o lístricas e inversas orientadas NO – SE y E – O, muestran continuidad en relación a la estructura del graben de Nicaragua. El fallamiento normal muestra un patrón de fallas de horst-grabens y estructuras relacionadas con un sistema deltaico del Mioceno (por ejemplo, Astorga, 1992; Barboza, et. al., 1997; Ballesteros et al., 1995).

La interpretación de los reflectores acústicos a partir de sísmica de reflexión (Barboza & Segura, 1998), en conjunto con la información estratigráfica, dataciones paleontológicas y sismogramas sintéticos de los pozos Pataste N°1 y Tonjibe N°1 (PCIAC/RECOPE, 1987-88), interpretan los límites entre la secuencia de sedimentación clástica y carbonatada del Mesozoico y el Cenozoico, como cambios en las secuencias de sedimentación, discordancias y eventos tectónicos de la cuenca. Así mismo, interpretan mediante un perfil geo-sísmico entre los pozos Pataste N°1 y Tonjibe N°1, un régimen tectónico transpresivo durante el Mioceno – Plioceno.

Durante el Mioceno Medio-Superior ocurriría una importante reorganización tectónica, donde el inicio de la convergencia ortogonal desencadenó un periodo contraccional en todo el territorio de Costa Rica (Mescua et al., 2017). De acuerdo con Ballesteros et al. (1995), la contracción en la cuenca de San Carlos fue recurrente durante el Neógeno tardío, aunque faltan limitaciones precisas. En la Península de Nicoya y Guanacaste, una fase de contracción del Mioceno tardío ha sido ampliamente documentada, con una deformación menguante hasta los 8 Ma (Alvarado & Gans, 2012; Gillot et al., 1994). Durante este periodo, se desarrolló un patrón complejo de fallas inversas y plegamiento con rumbo dominante E-W (Astorga et al., 1991, Barboza et al., 1995; Gazel et al., 2005). Estos

corrimientos con tendencias E-W, podría ser el resultado de una rotación local de estrés o de la reactivación de estructuras preexistentes (Mescua et al., 2017).

En la actualidad, el antearco norte de Costa Rica exhibe fallas de rumbo paralelas al margen y un movimiento de “*sliver*” en el antearco (Montero et al.2017) que corta la cuenca de San Carlos en su margen Oeste. En esta región, los sistemas de fallas están separados por una faja de corteza alargada, que abarca la región entre el arco volcánico activo y la zona de subducción (Montero et al.2017).

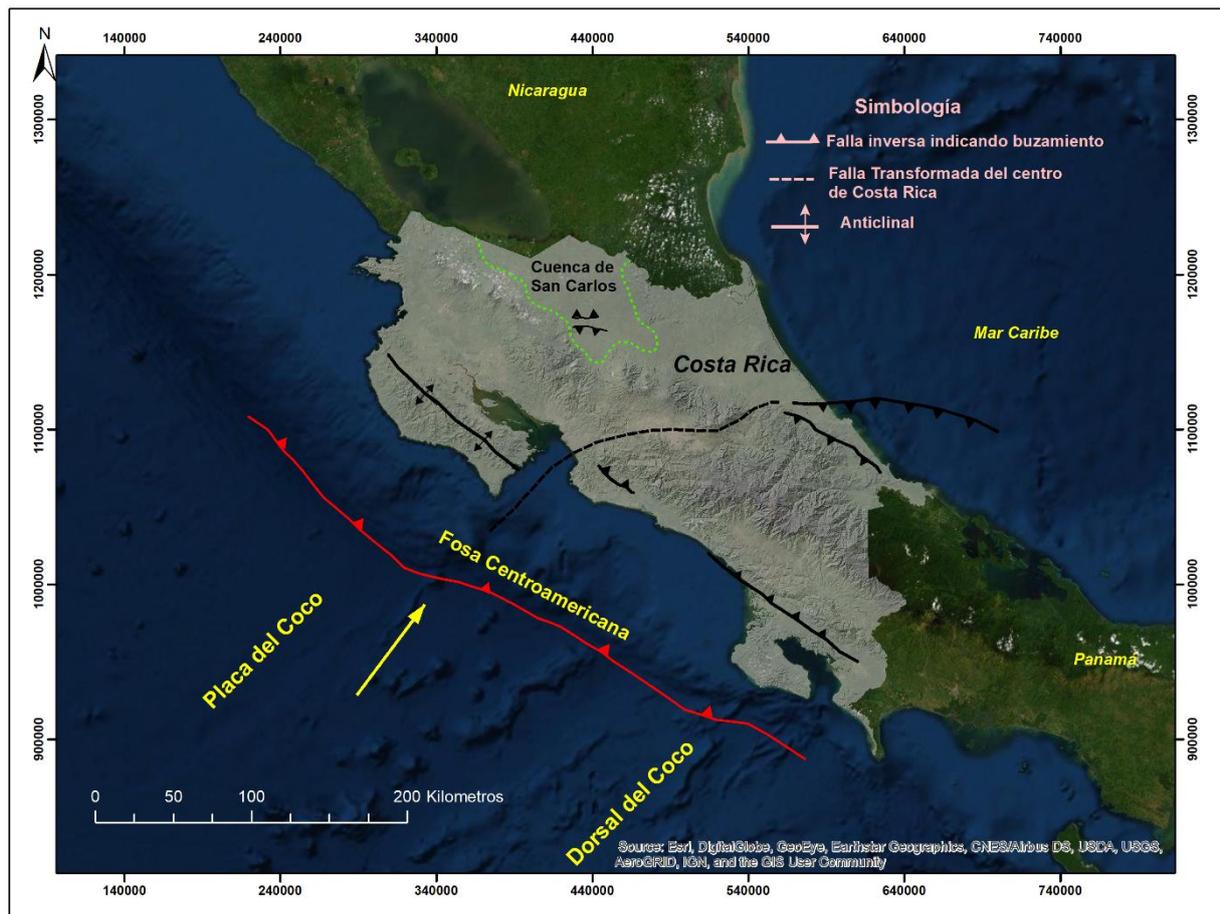


Figura 2.4 Deformación tectónica del Mioceno Medio – Tardío, indicando el régimen compresivo desarrollado en el Mioceno en todo Costa Rica como resultado de un cambio en la dirección de convergencia de la placa Cocos de oblicua a ortogonal hace 19 Ma, resultando en una deformación contraccional de la placa superior (Mescua et al., 2017 basado también en Gursky, 1988; Denyer & Alvarado, 2007 y Morell, 2016).

2.3.2 Contexto Geológico Regional

2.3.2.1 Basamento Mesozoico

El basamento sobre el cual se depositaron los sedimentos clásticos y carbonatados del Paleógeno y Neógeno de la Cuenca de San Carlos, se denominó por primera vez como Complejo de Nicoya por los geólogos de la Compañía Petrolera de Costa Rica en 1952 (Dengo, 1962). Complejo ultrabásico serpentizado correlacionable con las peridotitas de Santa Elena, ha sido reportado en el pozo Tonjibe (1925 m) en la Hoja San Jorge y al norte de la Hoja Pocosol. La cobertura sedimentaria del Cretácico Superior se asocia a la Formación Loma Chumico (depósitos de pedernales y brechas sedimentarias de una cuenca marina profunda sin influencia terrígena), que se depositan mientras el arco inicial estaba cerca de un margen divergente (spreading ridge) (Pizarro, 1993; Barboza et al., 1997; Calvo y Bolz, 1994; Pindell y Kennan, 2001).

2.3.2.2 Cobertura sedimentaria del Cenozoico

Se ha calculado un espesor de sedimentos en el rango de los 5000 – 6000 metros para la Cuenca de San Carlos – Limón Norte, e inclusive podría exceder los 7000 metros (Rockwell D.W. & Associates/RECOPE, 1985; Western Alas International/RECOPE, 1988). Correlación directa con la Cuenca de Limón a partir de sísmica de reflexión, sugiere una cuenca mayor cuya depositación ocurrió más o menos continua durante el Paleógeno y Neógeno, afectada por el magmatismo del Oligoceno – Mioceno y cubierta por depósitos volcánicos del Plioceno al Reciente (Van de Kamp, 1985).

Estas unidades muestran fuertes variaciones de espesor a lo largo de la cuenca de San Carlos, de modo que puede estar ausente en algunas áreas o tener kilómetros de espesor en los depósitos de la cuenca. Su límite basal generalmente no está bien expuesto y cuando está presente puede corresponder a una inconformidad regional (Astorga et al., 1991).

El área de la Hoja Monterrey se ubica dentro de la transición de la cordillera de Tilarán y la Cuenca de San Carlos, por tanto, engloba formaciones geológicas del arco interno magmático representado por el vulcanismo del Neógeno (Grupo Aguacate) y Cuaternario (Formación Monteverde), y el inicio de la Cuenca de San Carlos representada por la sedimentación clástica sin-tectónica del Paleógeno – Neógeno y sin-orogénica del Plioceno – Cuaternario de una cuenca intraarco.

2.3.3 Formación Venado

Según los datos del pozo Pataste N°1, los sedimentos volcanogénicos pertenecientes a la Formación Venado, sobreyacen las vulcanitas que se han correlacionado con el Grupo Aguacate. Taylor (1966)

realiza el reconocimiento de varias vetas de lignito al noroeste del pueblo de Venado, cerca de la Quebrada Cantanurio, donde describe la presencia de areniscas y limolitas con intercalación de lentes de lignito y lentes de lutita. En la Quebrada El Danto, en el río La Muerte aguas abajo de la desembocadura del río Nilo, reporta la presencia de estratos fosilíferos y las calizas del río La Muerte cerca de Venado.

Malavassi & Madrigal (1970) fueron los primeros en denominar la Formación Venado, asociándola a un ambiente de estero o marisma y constituida por calizas (calcarenitas), lutitas, limolitas y areniscas, con faunas de astrácodos, bivalvos y foraminíferos. Es sobreyacida discordantemente por basaltos de la Formación Aguacate y le asignan una edad de Mioceno Medio – Tardío.

Obando (1986) define la Formación Venado constituida por calizas, lutitas, areniscas tobáceas, brechas, conglomerados y abundantes horizontes de carbón de edad Mioceno Medio – Tardío. Indica la fuerte influencia volcánica durante toda la depositación de los sedimentos silicoclásticos que componen en su mayoría la formación. Aflora bien expuesta a lo largo de los cauces de los ríos La Muerte, Burío, Pataste, Jicarito, quebrada El Túnel y quebradas menores del área.

Calvo y Bolz (1987) interpretan la secuencia sedimentaria de Venado como dos sistemas deposicionales bien definidos: uno de Laguna o Retrobarra y otro de Barra Arenosa Carbonatada. El primero constituido por alternancias de tobetas, lumaquelas, areniscas fosilíferas y lentes de carbón; el segundo constituido principalmente por detrito de moluscos y balánidos. El sistema se sitúa en el interlitoral hasta sublitoral vinculado a una emersión temporal, con direcciones de corriente y transporte generalizado hacia el sureste interpretando la orientación de la barra con rumbo noreste – suroeste. Además lo asocian a un estuario tropical de tipo atlántico epicontinental, de edad Mioceno Medio, con un importante aporte volcaniclástico e influencia fluvial.

Ulloa et al. (2011) describen las calizas de la Formación Venado caracterizada por presencia de microfósiles de moluscos, equinodermos, dientes de tiburón e icnofósiles, y el desarrollo de una zona kárstica de 26 cavernas principalmente horizontales dominado por fracturas y estratificación, con un área aproximada de 21 km², donde se registran estalactitas, estalagmitas, columnas, flowstones y en un sector menonitas o bolas de yeso.

2.3.4 Grupo Aguacate

Dengo (1962) describe la “Formación Aguacate” formada por coladas de basalto y andesita, aglomerados y tobas que se presentan de forma estratificada y cortadas por diques de basalto, y de posible edad Mioceno Superior al Plioceno.

Madrigal & Malavasi (1970) se refieren a los cerros de Tilarán, Jamaical, cabeceras de San Lorenzo y Peñas Blancas formados por basaltos y aglomerados volcánicos para referirse a la Formación Aguacate Mio-Pliocénica. Chávez y Sáenz (1974) consideran la Formación Aguacate de origen principalmente volcánica compuesta por stocks de basaltos, brechas, aglomerados, sedimentos lacustres y frecuentes intercalaciones tobáceas. Por otro lado, Arauz (1983) reconoce a esta formación como lavas y brechas andesíticas con alteración propilítica. También reconoce tobas estratificadas y con laminación paralela intercaladas con las lavas andesíticas antes mencionadas. Cigolini & Chaves (1986) describen al Serie Volcánica de Aguacate en la Cordillera de Tilarán (parte central norte del cinturón de oro) como una secuencia de flujos de lava andesítica, cuyas partes externas están representadas por aglomerados volcánicos con brechas sintectónicas asociadas y flujos subordinados de lava andesítica y diques. El vulcanismo post-deformación que originó la fase de basculamiento en el límite Mioceno – Plioceno (7,3 Ma) y que se extendió hasta hace 3,3 Ma, es representado por la Formación Grifo Alto con el inicio de la migración al NE del arco magmático, el cual es representado por lavas, brechas e ignimbritas (Denyer & Arias, 1991; Alvarado & Gans, 2012).

Kussmaul (2000) se refiere al antiguo arco volcánico entre Tilarán y Puriscal constituido principalmente por lavas basálticas y andesíticas, depósitos de flujos piroclásticos, brechas, tobas y sedimentos volcanoclásticos, cortados por pequeños diques intrusivos y extrusivos de composición basáltica, la mayoría de las rocas con alteración hidrotermal fuerte, como una unidad litoestratigráfica que incluye todas las rocas volcánicas post-Cretácico y pre-Cuaternario de Costa Rica.

Kycl et al. (2006) se refiere al Grupo Aguacate en las Hojas Miramar, Chapernal y Juntas a una serie de lavas de composición basáltica hasta andesitas basálticas, andesitas columnares que algunos autores las correlacionan como Aguacate Superior, más recientes que la alteración hidrotermal aurífera, sin embargo, los autores sugieren que no son más recientes y la muestran como una secuencia diferente muy poco alterada y más ácidas. También incluyen litologías de brechas volcánicas (basalto andesitas) intercalando capas de lava andesíticas y tobas de lapilli. También incluyen sedimentos volcanoclásticos de tobas o tobitas, cuerpos intrusivos e hipoabisales ácidos, doleritas, basaltos cortando rocas volcanoclásticas, granitos del intrusivo Guacimal, gabros, dioritas e ignimbritas.

2.3.5 Formación Monteverde

Malavasi & Madrigal (1970) hacen referencia a la Formación Volcánica Piroclástica de Cote Plio-Cuaternaria en toda la zona norte y noreste de la laguna Arenal donde mencionan la presencia de material piroclástico constituido por cenizas, tobas, arenas y lapillis

Chaves & Sáenz (1974) indican que esta formación yace discordante con la Formación Aguacate, y que las lavas que componen esta formación ocurrieron a lo largo de fisuras recurrentemente. La describe como una intercalación de lavas andesitas y tobas de composición andesítica y riódacítica, con formación de lateritas sobre lavas (sección tipo en Montevideo).

Arauz (1983) se refiere a lavas latíandesíticas con intercalaciones de tobas que sobreyacen al Grupo Aguacate. Localmente define lavas andesíticas como bloques muy frescos con un elevado contenido de hipersteno, que a su vez la ausencia de alteración hidrotermal son criterios para asociarlas a la Formación Monteverde. La edad es del Plio-Pleistoceno.

Cigolini & Chaves (1986) se refiere a la Formación Monteverde como un magmatismo calco-alcalino que fue reactivado a finales del Plioceno y que progresivamente se desarrolla hasta el Cuaternario, constituido por andesitas e ignimbrita riódacítica.

Alvarado et al. (1992) y Alvarado & Gans (2012) asocian a la Formación Monteverde en la región, al vulcanismo andesítico hasta basáltico de edad Plioceno superior a Pleistoceno inferior (2,1 – 1,1 Ma), cuyo contacto con el Grupo Aguacate es difícil de trazar ya que sus composiciones química y petrográfica son muy similares, y la posibilidad de estar asociado a una actividad fisural o con escudos andesíticos. En Tilarán y Montes del Aguacate, estas lavas son más sanas, en gran parte sin alteración hidrotermal en facies distales, sin mineralizaciones de oro, con frecuente meseta o escudo andesítico, con petrografía andesítica y coladas basálticas subordinadas. Alvarado (2009) la reconoce en el área de la Hoja Fortuna por plataformas de lavas muy poco alteradas de composición basáltica hasta andesítica, cuyas dataciones radiométricas indican edades de 2,1 y 1 Ma.

Gillot et al. (1994) asocian el vulcanismo de Monteverde con el mayor evento o actividad volcánica fisural principalmente del Cuaternario Inferior (1,3 Ma), cubriendo en algunos lugares los flujos de lava y depósitos de flujos de pómez. Se refiere a una secuencia de lavas andesíticas intercaladas con brechas, tobas y lahares con un espesor máximo de 700 metros, un área aproximada de 1200 km² y un volumen de 400 km³. Kussmaul (2000) se refiere como lavas andesíticas sin alteración hasta andesita traquíticas, con la misma composición mineralógica de los estratovolcanes jóvenes de las cordilleras volcánicas.

Alan (1993) indica que la Formación Monteverde sobreyace discordantemente el Grupo Tilarán y está constituida en la base por lahares sobreyacidos posteriormente por andesitas, aglomerados, brechas y tobas.

Ulloa (2000) se refiere a la Formación Monteverde como rocas volcánicas andesíticas y lahares depositados durante el Plio-Pleistoceno y que sobreyacen discordantemente el Grupo Aguacate.

Localmente se compone de flujos de lava andesítica interestratificadas, rocas piroclásticas, ignimbritas y lahares (Alan et al. 1992, en Ulloa, 2000). Definen dos secuencias, la inferior constituida por lahares interestratificados con lentes aluviales, y la superior por flujos de lava, brechas volcánicas, tobas y diques de composición intermedia

Kycl et al. (2006) identifican la Formación Monteverde en las Hojas Miramar, Chapernal y Juntas como lavas andesíticas inalteradas, rocas piroclásticas y localmente depósitos de lahar importantes. El contacto inferior con el Grupo Aguacate es difícil de localizar debido a la poca exposición y accesibilidad, la fuerte erosión y laterización de las rocas.

2.4 Geomorfología

La geomorfología es el resultado directo de los procesos geológicos, tectónicos y climáticos de una región y el tiempo durante el cual actúan estos procesos, es decir de los procesos geológicos tanto endógenos como exógenos. El mapa de la Figura 2.5 muestra las relaciones de elevación, distribución y formas del terreno, generado a partir del modelo de elevación de la topografía 1:50000 del IGN y el sensor Alos Palsar (2015) (resolución 12,5 metros). El relieve es irregular a montañoso en el sector suroeste y sur de la hoja (aproximadamente el 35 – 40% de la hoja). Esta corresponde con las cuencas de los ríos Arenal y Nilo. El área restante constituye una topografía plano ondulada constituida por colinas y depresiones pequeñas que conforman las redes fluviales distribuidas de forma aproximadamente uniforme. El área desarrolla un drenaje de tipo subdendrítico en las regiones de topografía irregular a paralelo y subparalelo en las áreas de topografía plano ondulada.

El área de estudio muestra una transición desde zonas plano onduladas a montañoso, marcado por zonas relativamente planas al noroeste y sureste con elevaciones que varían entre los 65 y 110 msnm; una segunda unidad transicional plana ondulada con elevaciones entre los 110 y 215 msnm; y una tercera unidad transicional con elevaciones entre los 215 y 560 msnm. Esta última conforma las mayores pendientes hasta taludes casi verticales en las cuencas de los ríos Arenal y Nilo. Una cuarta unidad corresponde a la zona de mayor altitud cuyas elevaciones varían entre los 560 y 700 msnm en el sector extremo suroeste de la hoja, la cual forma parte de la cordillera de Tilarán.

La transición de la zona montañoso a plano ondulada, marca un cambio de subdendrítico a paralelo, posiblemente asociado a un control estructural, es posible un rejuvenecimiento y control del sistema hidrológico en el límite de pie de monte por la tectónica de fallas inversas, hecho que se nota en varios puntos y sectores del área que sugieren levantamiento relativo y procesos relativamente erosivos actuando actualmente.

Se han definido ocho unidades morfológicas, las cuales incluyen tanto superficies de erosión como depositación. Estas formas son correlacionadas con la información litológica, genética y edad de las unidades y formaciones geológicas. En orden de importancia en cuanto a cobertura de área se tienen:

2.4.1 Superficies plano onduladas

Corresponde en su mayor parte con zonas suelos residuales y erosión de antiguas plataformas o escudos de lavas andesíticas hasta basálticas asociadas a la Formación Monteverde de edad Pleistoceno Inferior – Medio. En el sector noroeste, norte y noreste generalmente corresponde con zonas plano onduladas y colinas de baja elevación producto de alteración y erosión de estas lavas. El sector sur corresponde en su mayoría con depósitos sedimentarios epivolcánicos del Holoceno del volcán Arenal, los cuales forman zonas de topografía plana.

2.4.2 Superficies irregulares y onduladas

Corresponde con la tercera unidad transicional formada por zonas de erosión tanto de depósitos volcánicos del Plioceno – Pleistoceno como los sedimentos clásticos del Mioceno Medio a Plioceno. Existen terminaciones y escarpes asociados a erosión y algunos relacionados a tectónica. Está controlada por una geología más compleja donde intervienen depósitos sedimentarios volcanoclásticos marinos a litorales, actividad magmática subvolcánica, actividad volcánica piroclástica y brechas volcano-sedimentarias. Además, evidencias superficiales de la actividad tectónica del Neógeno, así como zonas de falla de actividad reciente, que junto a la topografía, levantamiento y erosión modelan esta unidad morfológica.

2.4.3 Laderas de montaña

Corresponde con superficies de erosión del sector sur de la cuenca del río Arenal. Como su nombre lo indica representa laderas con pendientes entre los 10° y mayor a 70° producto de la erosión de los depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista y piroclásticos del Pleistoceno Superior, y posiblemente en algunos casos los sedimentos clásticos del Mioceno Superior - Plioceno.

2.4.4 Laderas de valles

Corresponden con superficies de erosión en las cuencas de los ríos principales y secundarios tributarios. Las pendientes varían entre los 10° y 90° (caso principal el río Arenal). Por su origen son producto principalmente de erosión fluvial pero también interviene la actividad de escorrentía superficial.

2.4.5 Valles de depositación y fondos de valle

Como su nombre lo indica representa zonas planas de depositación sedimentaria epivolcánica del Holoceno, producto principalmente del arrastre y depositación fluvial y escorrentía.

2.4.6 Valle intermontano

Corresponde a un sector característico entre macizo montañoso del sector suroeste del área investigada. Está representado por una zona plana de acumulación epivolcánica producto de la erosión de los depósitos volcánicos circundantes del Pleistoceno. Esta forma del terreno resulta interesante definir su origen ya que parece darse por una situación particular, que en principio se relaciona con la estructura de un sinclinal.

2.4.7 Superficies de ruptura

Asociadas a inestabilidad por deslizamiento, corresponden con pendientes entre los 15° - 35°, asociadas con rupturas del terreno y reptación del mismo, limitadas a áreas de alta pendiente en las cuencas de los ríos principales y zonas de falla inversa asociadas a sobrecorrimiento.

2.4.8 Depósitos de deslizamiento

Corresponden con áreas o sitios de acumulación producto de la reptación y desprendimientos de las superficies de ruptura. Forman parte de los sitios de deslizamiento.

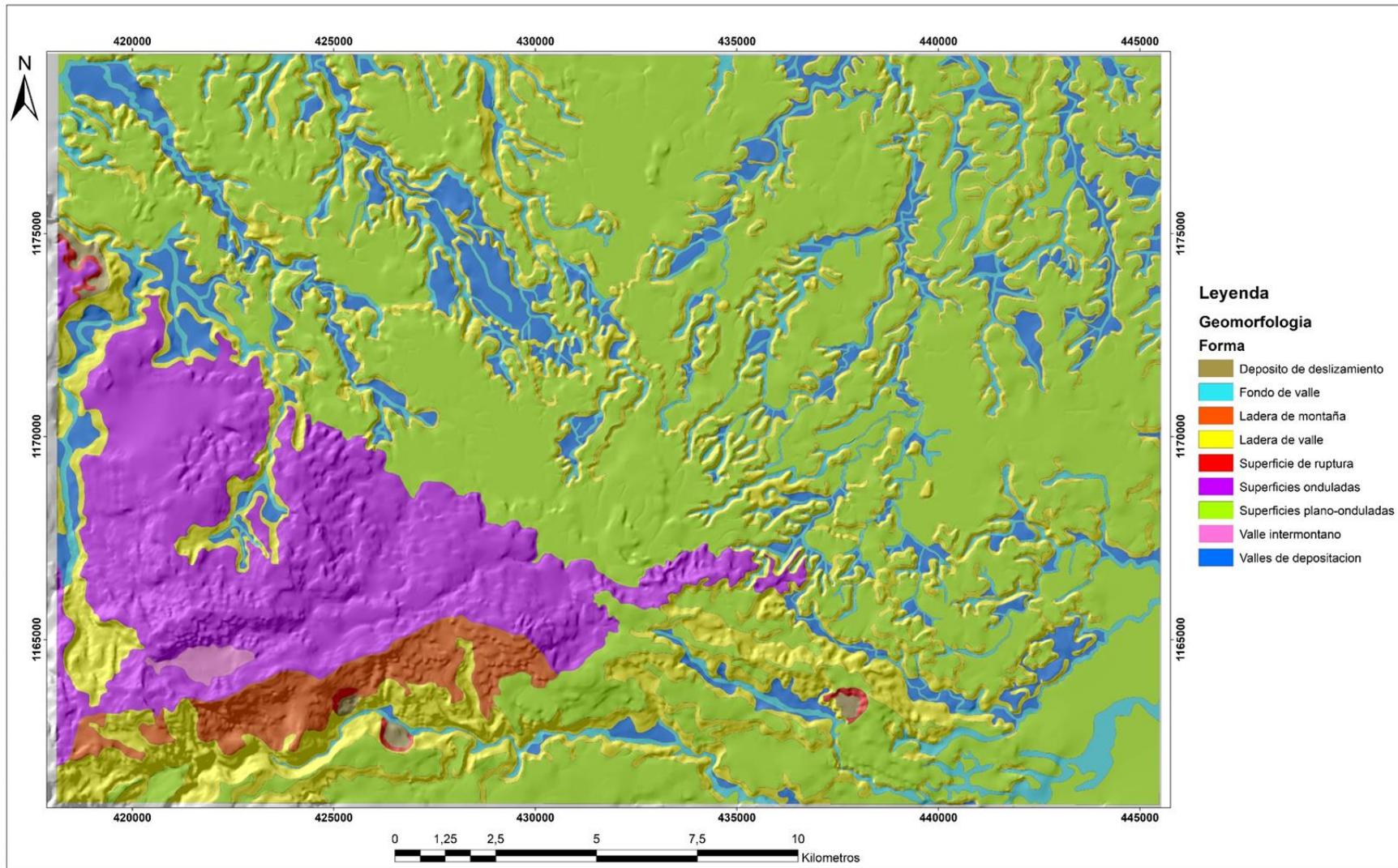


Figura 2.5 Mapa de formas del terreno de la Hoja Monterrey, generado a partir de la delimitación de cuencas y los modelos de pendiente y rugosidad

2.5 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo consistió inicialmente en la preparación previa al trabajo de campo, la cual se realizó en el segundo semestre del 2014 e inicios del 2015 y consistió básicamente en la revisión de trabajos previos en el área en cuanto a la geología local y regional (mapas locales y regionales, artículos y libros en los diversos campos de la investigación geológica), un registro de sismos del periodo noviembre de 1974 al 16 de abril de 2018 suministrado por la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE) y un estudio geomorfológico con fotos aéreas de marzo 1985 a escala 1:35000 del I.G.N., las cuales no cubrían toda el área de estudio. Se utilizaron los modelos de elevación del sensor Alos Palsar (resolución 12,5 metros) de octubre del 2010 y la topografía a escala 1:50 000 del I.G.N. Con lo anterior se preparó un mapa geológico preliminar para la planificación del trabajo de campo en su fase inicial. Se incluye además la información de expedientes mineros de la Dirección de Geología y Minas.

Posteriormente se realiza una campaña de trabajo de campo de 4 meses tiempo efectivo durante el periodo abril-2015 a noviembre-2017. El trabajo de campo consistió en la obtención de información geológica en aquellos sitios de mejor exposición y acceso distribuidos en toda la hoja cartográfica y áreas cercanas, aspectos relacionados con litología, estratigrafía, muestreos para análisis de laboratorio (geoquímicos, petrográficos y dataciones radiométricas), zonas de mineralización, zonas de falla y geología estructural, zonas de alteración, evaluación de recursos mineros y zonas de inestabilidad. En total se recolectaron 655 puntos de documentación (afloramientos y puntos de referencia) dentro de la Hoja Monterrey y el cinturón de empate de 1 kilómetro, además de 125 puntos en áreas externas que son de interés para la correlación e interpretación de la geología regional, para un total de 780 puntos de documentación. Estos puntos incluyen información litológica, estratigráfica, tectónica, zonas de inestabilidad e hidrología. También se consultó nueva información en el área de investigación proveniente de los estudios de PCIAC/RECOPE (1987-88), realizados durante las campañas de exploración de hidrocarburos, como la información de los pozos Pataste N°1 y Tonjibe N°2, y la información de líneas sísmicas para una mejor comprensión de la geología del subsuelo. La integración a partir de junio del 2017, de un repositorio de información geoespacial (fotos aéreas, topografía y capas temáticas de información) fue de utilidad para trabajar con mayor detalle la geomorfología y morfo-tectónica del área. El registro fotográfico se realizó para casi todos los puntos tomados, en promedio se obtuvo de 1 a 10 fotos por sitio según el detalle requerido, aunque en casos según la importancia o detalle se tomaron hasta 20 o más por sitio.

Se realiza un muestreo en aquellos sitios de mayor interés para análisis petrográfico microscópico (secciones delgadas), radiométricos, litogeoquímicos, difracción, microsonda y separación de zircones detríticos para datación U-Th-Pb (Tabla 2.1).

Para la determinación de las unidades litológicas y la estratigrafía se realizaron análisis litogeoquímicos. En total se realizaron 30 análisis geoquímicos, del total de muestras 18 corresponden a roca ígnea y 12 a rocas volcánicas. Las muestras se analizaron en el Boreau Veritas Mineral Laboratories de Canadá, mediante el método de caracterización de roca total y elementos traza (LF202 y AQ200).

Se contemplaron 6 análisis de datación radiométrica con el método K/Ar, 4 de las cuales fueron en roca ígnea y 2 en roca piroclástica. Por motivos de alteración de la roca solo se lograron datar tres muestras en roca ígnea, My212 (dacita), My444 (andesita basáltica) y My374 (basalto). Los análisis fueron realizados en la Unidad de Geología Isotópica y Geocronología del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, mediante el método K/Ar.

Se realizaron 10 análisis mineralógicos por difracción de rayos-X, de estos 9 corresponden con rocas volcánicas y un análisis a roca ígnea. Estos se realizan en correlación con los análisis de datación radiométrica, análisis geoquímicos y microsonda. Cuatro de estos análisis corresponden con muestras de los pozos Patate N°1 y Tonjibe N°1 en los niveles superior e inferior de ambos pozos. Dichos análisis fueron realizados en el Centro de Investigación de Materiales (CIEMTEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El método utilizado es la difracción de rayos-X (DRX), con un difractor PANalytical modelo Empyrean.

El análisis mineralógico por microsonda se realizó en 3 tres muestras, dos en roca ígnea y una en roca piroclástica, en común correlación con los análisis de datación radiométrica, análisis geoquímico y difracción. Los análisis se realizaron en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Masaryk, República Checa.

En total se enviaron 7 muestras para dataciones con zircones detríticos, obtenidas en sedimentos volcánicos, 3 de ellas corresponden a sedimentos en superficie de la Formación Venado (areniscas líticas feldespáticas de grano medio – grueso) y 4 corresponden a sedimentos volcánicos de los pozos Patate N°1 y Tonjibe N°1 de los niveles superior e inferior en ambos pozos. Del total de muestras, solo en 5 se lograron separar zircones aptos para datación. Las muestras P1s nivel superior del pozo Patate; T1s y T2i nivel superior e inferior respectivamente del pozo Tonjibe; My475zr y My611 en sedimentos de la Formación Venado. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de

México). El método utilizado para el análisis isotópico U-Th-Pb fue la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS).

El procesamiento de los datos se realizó primeramente con una base de datos en Excel de todos los puntos de documentación. Posteriormente el mapa de trabajo junto con los puntos de documentación se trabaja en plataforma SIG, con las respectivas capas de información espacial (topografía, hidrografía, caminos, poblados y modelos de elevación) y todos los mapas de referencia de estudios anteriores. La edición del mapa final se realiza en el programa Adobe Illustrator CC versión 2017.

Punto Documentación	Norte (m)	Este (m)	Localidad	Formación	Litología	SD	DR	DZr	AQ	Ms	DRX
My24	1167932,78	419429,33	Río Vueltas	Formación Venado	Arenisca fina con fósiles y carbón	SD					
My100	1166603,86	418409,89	Río Nilo margen izquierdo aguas abajo	Grupo Aguacate/Formación Venado	Lava basáltica en contacto con lutita	SD					
My151a	1166677,87	418403,97	Quebrada Pavas	Grupo Aguacate	Lava	SD					
My158	1168713,31	441626,14	Buenos Aires, Santa Rosa	Formación Monteverde	Lavas alteradas, brechas y tobas subordinadas	SD					
My172(1)	1166292,26	428030,55	1 km suroeste Monterrey	Formación Venado	Arenisca	SD					
My172(2)	1166292,10	428001,66	1 km suroeste Monterrey	Formación Venado	Intercalación de arenisca fina a gruesa	SD					
My172(3)	1166292,10	428001,66	2 km suroeste Monterrey	Formación Venado	Intercalación de arenisca fina a gruesa	SD					
My172zr	1166313,26	428038,70	1 km suroeste Monterrey	Formación Venado	Arenisca media a gruesa	SD					
My181	1167889,08	426532,47	2,4 Km noroeste de Monterrey	Formación Venado	Arenisca media no calcarea	SD					
My183	1167178,67	425444,37	Patate Arriba, 3,4 km este-noroeste Monterrey	Formación Venado	Arenisca fina a media gris	SD					
My189	1165897,95	425185,04	2 Km suroeste Patate Arriba	Formación Buena Vista	Lahares	SD					
My199	1163464,45	421764,44	2,4 km sureste de Santa Eulalia	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal				AQ		
My204	1162894,34	419433,18	Cuenca alta Quebrada Flor, 3,4 km suroeste de Santa Eulalia	Formación Monteverde	Toba de lapilli	SD					
My210	1165220,22	418874,19	Quebrada Pavas, 2,7 km oeste-suroeste de Santa Eulalia	Formación Venado	Brecha pumílica	SD					
My211	1165854,57	418734,61	Quebrada Danta, 2,7 km oeste de Santa Eulalia	Formación Monteverde	Toba alterada	SD					
My212	1166013,30	418639,54	Quebrada Pavas, 2,8 km oeste-noroeste de Santa Eulalia	Grupo Aguacate	Dacita (Tajo)	SD	K/Ar		AQ		
My228	1164600,18	418858,93	Quebrada Pavas, 2,8 km suroeste de Santa Eulalia	Formación Monteverde	Toba alterada	SD					
My229	1164624,97	418855,16	Quebrada Pavas, 2,8 km suroeste de Santa Eulalia	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD					
My231	1164799,08	418850,75	Quebrada Pavas, 2,7 km suroeste de Santa Eulalia	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD					
My237	1165672,04	418699,48	Quebrada Pavas, 2,8 km oeste de Santa Eulalia	Grupo Aguacate	Lava con alteración hidrotermal (sericita)	SD					
My238	1162412,96	423405,16	1,5 km noroeste de Plama	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal	SD			AQ		Drx
My243	1164399,95	425352,84	2,6 km suroeste de Monterrey	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal				AQ		
My251	1168572,11	417136,19	Quebrada La Mina, 1,4 km norte-noroeste de Venado	Grupo Aguacate	Andesita basáltica	SD			AQ		
My252	1167153,52	417597,80	Río La Muerte, pueblo de Venado	Formación Venado	Caliza bioclástica	SD					
My257	1165208,02	417637,67	Río Nilo, cuenca media, 1,9 km sur-suroeste de Venado	Formación Venado	Arenisca fina con fósiles de moluscos	SD					
My262	1164735,64	417577,10	Río Nilo, cuenca media, 2,4 km sur de Venado	Grupo Aguacate	Dacita del río Nilo	SD			AQ		
My265	1164550,72	417752,22	Río Nilo, cuenca media, 2,6 km sur de Venado	Grupo Aguacate	Dacita del río Nilo	SD			AQ	Ms	
My271	1173760,33	420128,78	Río La Muerte, 3,5 km noroeste de Jicarito	Formación Venado	Intercalación arenisca fina - media con capas de carbón	SD					
My273	1164653,42	420543,78	1,4 km suroeste de Santa Eulalia	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal	SD			AQ		
My274	1164431,06	417700,38	Río Nilo, cuenca media cerca afluente Q. Catarata, 2,7 km sur de Venado	Grupo Aguacate	Dacita río Nilo	SD			AQ		
My279	1164154,57	417499,41	Río Nilo, cuenca media, 3 km sur de Venado	Formación Venado	Arenisca grano medio no calcárea, laminar	SD					
My289	1165707,45	417857,55	Río Nilo, cuenca media, 1,4 km sur-sureste de Venado	Formación Venado	Caliza bioclástica	SD					
My291	1166001,93	418071,47	Río Nilo, cuenca media, 1,3 km sureste de Venado	Grupo Aguacate	Basalto cerca del río Nilo	SD			AQ		
My292	1166099,12	417993,33	Río Nilo, cuenca media, 1,2 km sur-sureste de Venado	Grupo Aguacate	Basalto del río Nilo	SD					
My293	1166212,02	418242,49	Río Nilo, cuenca baja, 1,2 km sureste de Venado	Grupo Aguacate	Basalto del río Nilo	SD			AQ		
My317	1168785,13	423055,29	En Quebrada, 400 m noreste de Patate Arriba - Monterrey	Grupo Aguacate	Basalto del río Jicarito	SD					
My321	1169079,47	423297,49	En Quebrada, 750 m noreste de Patate Arriba - Monterrey	Grupo Aguacate	Basalto del río Jicarito	SD			AQ	Ms	Drx
My325	1169833,92	423404,35	En Quebrada, 1,5 km noreste de Patate Arriba - Monterrey	Formación Monteverde	Toba alterada	SD					

My334	1167334,54	426614,02	Río Pataste, cuenca alta, 2,3 km este - sureste de Monterrey	Grupo Aguacate	Basalto del río Pataste	SD				
My345	1168306,71	422778,31	En Quebrada, Pataste Arriba - Monterrey	Grupo Aguacate	Traquiandesita basáltica del río Jicarito	SD			AQ	
My356	1167569,88	422564,22	2 km sureste de Linda Vista	Unidad indiferenciada	Sedimentos epivolcánicos (Limolitas)	SD				Drx
My374	1166643,69	418491,20	Río Nilo, 1,27 km suroeste de Esperanza, Venado	Grupo Aguacate	Basalto del río Nilo	SD	K/Ar		AQ	
My377	1170159,32	418072,67	En camino, cerca confluencia río Cantanubrio con río La Muerte, 3 km norte-noreste de Venado	Grupo Aguacate	Basalto	SD				
My378	1168794,32	417091,10	Quebrada La Mina, 1,7 km norte-noroeste de Venado	Grupo Aguacate	Andesita basáltica	SD				
My379	1160258,89	434952,69	Tajo cerca de carretera, 1,9 km noroeste de El Tanque, Hoja Fortuna	Formación Monteverde	Lavas alteradas (Tajo)	SD				
My380	1175187,12	417658,67	Sobre camino, 700 m este del poblado Cucaracha (San Josecito)	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD			AQ	Drx
My385	1172223,15	417131,27	Quebrada Quebradón, 5 km norte de Venado	Formación Venado	Intercalación de areniscas finas a gruesas poco carbonatadas	SD				
My385zr	1172227,77	417141,02	Quebrada Quebradón, 5 km norte de Venado	Formación Venado	Intercalación de areniscas finas a gruesas poco carbonatadas	SD				
My411	1164351,20	418394,80	En Quebrada, 3 km sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD			AQ	
My416	1164560,53	418371,21	En Quebrada, 2,9 km sureste de Venado	Formación Venado	Arenisca gruesa a brechosa calcárea	SD				
My417	1164579,84	418389,10	2,85 km sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD			AQ	
My418	1164628,64	418424,46	2,8 km sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD			AQ	
My431	1164089,40	418110,24	Cuenca media Quebrada Catarata, 3,1 km sur-sureste de Venado	Formación Monteverde	Toba	SD				
My432	1164061,57	418274,25	Cuenca media Quebrada Catarata, 3,25 km sur-sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD				
My434	1164161,43	418007,96	Cuenca media Quebrada Catarata, 3 km sur-sureste de Venado	Formación Venado	Arenisca media con intercalación de arenisca gruesa y clastos calcáreos	SD				
My441	1171956,71	416983,98	Cuenca alta Río Burío, 4,8 km sur de Venado	Formación Venado	Areniscas finas a gruesas	SD				
My441 zr	1172001,64	417022,94	Cuenca alta Río Burío, 4,8 km sur de Venado	Formación Venado	Areniscas finas a gruesas	SD				
My444	1166225,20	427938,91	1 km al norte de Monterrey	Grupo Aguacate	Andesita basáltica del río Purgatorio	SD	K/Ar		AQ	
My445zr	1168982,09	418165,83	Río La Muerte, 2 km noreste de Venado	Formación Venado	Arenisca media	SD				
My446zr	1168775,79	418263,50	Río La Muerte, 1,8 km noreste de Venado	Formación Venado	Arenisca media	SD				
My452	1162949,89	422256,38	Quebrada afluente del río Arenal, 2,6 km noroeste de Palma	Grupo Aguacate	Traquiandesita basáltica	SD			AQ	
My455	1161781,47	422622,74	Talud hacia río Arenal, 1,76 km oeste-noroeste de Palma	Formación Monteverde	Toba de lapilli	SD				
My457	1161728,78	422444,63	Talud hacia río Arenal, 1,9 km oeste-noroeste de Palma	Formación Buena Vista	Lahares	SD				
My459	1161843,81	422740,99	Río Arenal, 1,66 km de Palma	Formación Monteverde	Toba	SD				
My461	1169887,08	418223,26	Río La Muerte, 2,8 km norte-noreste de Venado	Grupo Aguacate	Andesita basáltica del río La Muerte	SD			AQ	
My462	1167368,89	417273,70	Quebrada El Túnel, 350 m norte-noroeste de Venado	Formación Venado	Arenisca gruesa lítica	SD				
My465	1167322,71	416704,47	Quebrada El Túnel, 800 m noroeste de Venado	Formación Venado	Caliza bioclástica	SD				
My467	1167349,80	417345,01	Quebrada El Túnel, 200 m norte-noroeste de Venado	Grupo Aguacate	Andesita basáltica de la Quebrada El Túnel	SD			AQ	
My469	1166502,95	417492,48	Cerca del camino, 700 m sur de Venado	Formación Venado	Caliza detrítica (wackestone a packstone)	SD				
My471	1165252,85	416843,36	Cerca del camino, 2 km sur-suroeste de Venado	Formación Venado	Caliza detrítica (packstone a graistone)	SD				
My475zr	1164328,87	417003,12	Sobre camino hacia el río Nilo, 2,9 km sur - suroeste de Venado	Formación Venado	Arenisca media lítica con cristales no carbonatada	SD	Zr			
My476	1164641,89	418434,78	2,7 kilómetros sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD			AQ	Ms
My483	1174505,01	419917,05	4 km noroeste de Jicarito	Formación Venado	Arenisca grano medio	SD				
My505	1173772,97	424226,00	800 m suroeste de San Miguel	Unidad indiferenciada	Limolitas	SD				
My529	1167195,01	445533,02	1,7 km noreste de Esterito	Unidad indiferenciada	Arenisca grano fino	SD				
My550	1175285,95	427178,00	2,5 km noreste de San Miguel	Unidad indiferenciada	Arenisca grano fino	SD				Drx
My568	1175388,96	427265,97	2,5 km noreste de San Miguel	Unidad indiferenciada	Arenisca grano fino	SD				
My569	1175303,02	427265,02	2,5 km noreste de San Miguel	Unidad indiferenciada	Arenisca grano medio	SD				

My573	1168429,93	426802,96	1,7 km noreste de Pataste Arriba, cerca de ruta 4. Zona de Falla	Formación Venado	Arenisca grano fino, lutita y lentes de carbón	SD				
My575	1168414,93	426885,01	1,7 km noreste de Pataste Arriba, cerca de ruta 4. Zona de Falla	Formación Venado	Arenisca fina a limolitas color gris, capa de carbón 40 cm	SD				
My590	1167395,02	425545,97	Pataste Arriba, por falla	Formación Venado	Arenisca fina y lutita, capa de carbón	SD				
My611	1172836,03	419162,00	Río La Muerte, 4 km oeste de Jicarito	Formación Venado	Arenisca de grano medio a grueso color crema, lítica	SD	Zr			
My628	1171723,95	418560,01	Río La Muerte, 4,6 km oeste/suroeste de Jicarito	Formación Venado	Arenisca	SD				
My629	1171807,93	418503,96	Río La Muerte, 4,6 km oeste/suroeste de Jicarito	Unidad indiferenciada	Ignimbrita	SD		AQ		
My654	1182580,97	439855,04	9 km norte/noroeste de Santa Rosa	Formación Monteverde	Lavas alteradas, brechas y tobas subordinadas	SD				
My731	1173711,94	421101,02	2,5 km noroeste de Jicarito	Unidad indiferenciada	Arenisca grano medio a grueso	SD				
My738	1168954,01	426896,01	2,1 km noreste de Pataste Arriba	Formación Venado	Arenisca	SD				
My746	1165026,97	423009,96	1,7 km sureste de Santa Eulalia	Depósitos Recientes	Lapillitas del volcán Arenal	SD		AQ		
My752	1169189,97	426723,06	3 km noroeste de Santo Domingo	Formación Monteverde	Lavas alteradas, brechas y tobas subordinadas	SD				
My758	1164640,01	427656,04	500 metros suroeste de Monterrey	Depósitos Recientes	Lapillitas del volcán Arenal	SD		AQ		
My760	1163055,00	426909,00	1,8 km al suroeste de Monterrey	Formación Monteverde	Lavas alteradas, brechas y tobas subordinadas	SD				
Pozo Pataste	1172307,01	421659,03	1,5 km oeste de Jicarito	Formación Venado	Sedimentos clásticos y volcániclásticos, lavas	SD	Zr			Drx
Pozo Tonjibe	1193393,29	435092,94	Hoja San Jorge, 25 km noreste del Pataste	Basamento ultramáfico, Loma Chumico, Paleogeno, Neógeno, Cuaternario	Serpentina, basalto, sedimentos clásticos y volcániclásticos	SD	Zr			Drx

SD: Sección delgada; DR: Datación radiométrica K/Ar; DZr: Datación con circones detríticos; AQ: Análisis químico; Ms: Análisis mineralógico con microsonda; DRX: Análisis mineralógico con difracción de rayos X.

Tabla 2.1 Resumen de muestras que fueron sometidas a los diferentes tipos de análisis físico químicos en la Hoja Monterrey

3. ESTRATIGRAFÍA

3.1 Mioceno Medio – Superior

3.1.1 *Sedimentación clástica y carbonatada [Formación Venado (Nfmv)]*

Taylor (1966) realizó un reconocimiento de vetas de lignito al noroeste del pueblo de Venado. Malavassi & Madrigal (1970) se refieren a calizas, lutitas, limolitas y areniscas, con faunas de astrácodos, bivalvos y foraminíferos depositados en un ambiente de estero o marisma. Obando (1986) describe calizas, lutitas, areniscas tobáceas, brechas, conglomerados y abundantes horizontes de carbón de edad Mioceno Medio – Tardío. Calvo y Bolz (1987) se refieren a dos sistemas deposicionales del Mioceno Medio: uno constituido por alternancias de tobitas, lumaquelas, areniscas fosilíferas y lentes de carbón; y otro constituido principalmente por detrito de moluscos y balánidos. Lo asocian a un estuario tropical con un aporte importante volcánico-clástico e influencia fluvial.

El área expuesta se calcula aproximadamente en 13,1 km², lo cual representa cerca de un 2,6% del área total de la hoja. Aflora en las cuencas de los ríos La Muerte, Nilo, Pataste, Jicarito y Purgatorio en las cercanías de los pueblos Monterrey, Pataste Arriba y Esperanza. Las mejores exposiciones se observan a lo largo de la cuenca media del río La Muerte.

Está constituida en la hoja por una secuencia intercalada de areniscas de grano fino a medio, limolitas, lutitas y en menor proporción calcarenitas, es común observar estratificación laminar y la presencia de capas de carbón entre lutitas y areniscas cuyos espesores varían entre los 0,1 – 3 metros. La estratificación varía de centimétrica hasta métrica. Hacia la base de la secuencia se tiene una intercalación de areniscas de grano fino a medio, lutitas y capas de carbón. En la sección intermedia de la secuencia, se tiene presencia de sedimentos con detrito bioclástico como calizas bioclásticas neríticas, areniscas y lutitas con moluscos (gasterópodos y bivalvos) y artrópodos (balánidos?), calcarenitas y capas de carbón intercaladas entre areniscas y lutitas. En la sección superior de la secuencia se tiene la presencia de brechas carbonatadas y calcarenitas. Hay ocurrencia de madera fósil (madera petrificada) y carbón en varios sitios principalmente en las cuencas altas y medias de los ríos Pataste, Jicarito y La Muerte. También se observó en las partes altas como la Quebrada Pavas. La ocurrencia de madera fósil son tanto de origen sedimentario como producto del vulcanismo.

La secuencia está mejor representada en su mayor parte por una intercalación centimétrica a métrica de areniscas de grano fino a medio y lutitas. Las areniscas corresponden con arenitas líticas, arenitas feldespáticas y arenitas líticas feldespáticas cristalinas. Algunas de ellas muestran presencia de microfósiles de diatomeas (sitios My475zr, My611, My441zr, My172) (Figuras 3.8 y 3.9).

Determinar un espesor exacto para esta formación es difícil por la historia tectónica de la cuenca. La tectónica contraccional del Mioceno Medio a Superior, posiblemente extendida hasta el Cuaternario, ha levantado la secuencia sedimentaria en varios bloques. El contacto inferior de esta formación no se observa en el campo, según los datos de los pozos Pataste y Tonjibe, los contactos superior e inferior se ubican a 300 m y 1028 m y 128 y 1135 m de profundidad respectivamente (Pizarro, 1993), por lo que tomando en cuenta las diferencias en elevación a la que aflora, podría estimarse que el espesor puede superar los 1500 m. Sobreyace y se interdigita con el vulcanismo antiguo de Aguacate. Es sobreyacida discordantemente por los sedimentos de colmatación de cuenca del Plioceno y está cubierta en su mayor parte por la Formación Monteverde y los depósitos piroclásticos del Plio - Pleistoceno.

Sen Gupta et al. (1986) basado en la edad K/Ar de una traquiandesita más joven y la edad de ostrácodos de una unidad más antigua sugieren una edad Tortoniense – Messiniense. Además, basado en criterios de foraminíferos bentónicos indican una sedimentación somera del Mioceno Tardío. Calvo y Bolz (1987) basado en asociaciones de moluscos le asignan una edad de Mioceno Medio. Linkimer & Aguilar (2000) hacen referencia a una edad Mioceno Medio – Mioceno Tardío basado en foraminíferos plantónicos. Recientemente se reporta la presencia de vertebrados fósiles (dientes de caballo) en los sedimentos de la Formación Venado, en la cuenca media – alta del río Pataste, entre los pozos Monterrey I y II, donde también hay ocurrencia de carbón, madera fósil y manifestación de hidrocarburos, cuya edad se estima de 12 a 14 Ma (comunicación escrita Cesar Laurito).

Los sedimentos del Mioceno tanto en los sitios de muestreo M475 y M611 de la sedimentación más superficial de la Formación Venado, como en los niveles superiores de los Pozos Pataste (585 – 650 m) y Tonjibe (405 – 800 m), los cuales representan la sección media de la Formación Venado, muestran una relativa abundancia de circones detríticos. Sin embargo, los niveles inferiores de los pozos Pataste y Tonjibe (a profundidad mayor de 1000 m) no parece tener proveniencia de circones detríticos.

La datación con circones detríticos en las muestras My475 (Figura 3.10), My611 (Figura 3.11) y P1s (Pozo Pataste, Figura 3.12) establecen una edad máxima de la sedimentación de $8,24 \pm 0,69$ Ma, $6,89 \pm 0,19$ Ma, $10,63 \pm 0,28$ Ma respectivamente (Solari, 2018), lo cual corresponde con la edad máxima de sedimentación de la Formación Venado del Mioceno Superior. El pozo Tonjibe (T1s, Figura 3.13) aporta una edad máxima de $9,0 \pm 0,154$ Ma. Tanto en el pozo Pataste como Tonjibe, las edades representan la edad de la sedimentación de la sección media de la Formación Venado.



Figura 3.1 Secuencia sedimentaria de la Formación Venado, en sitios donde es posible medir buzamientos estratigráficos afectados por tectónica. A – Intercalación de areniscas y lutitas bituminosas con estratificación centimétrica y laminar, buzantes 10° hacia el 134° (sitio My339, río Pataste, coordenadas 1167195,22 – 426695,25). B – Intercalación decimétrica a métrica de areniscas, lutitas y capa de carbón en la base de 3 metros de espesor, buzante 48° hacia el 128° (sitio My340, río Pataste, coordenadas 1167207,40 – 426637,17). C – Lutita (tobita) gris no carbonatada (sitio My324, río Jicarito, coordenadas 1169763,95 – 423383,84). D – Capa de carbón de 1 metro de espesor (buzante 42° hacia el 338°) entre sedimentos volcanoclásticos de areniscas y lutitas (sitio My271, río La Muerte, coordenadas 1173760,33 – 420128,78). E – Intercalación de sedimentos volcanoclásticos con estratificación centimétrica a decimétrica de lutitas y areniscas finas a gruesas (sitio My441, río Burío, coordenadas 1171956,71 – 416983,98). F – Mismo sitio de My441 sobre el cauce, muestra discontinuidades por diaclasas buzantes 80° hacia 264° .



Figura 3.2 Sedimentos de la Formación Venado con presencia de fósiles de ambiente marino somero, restos de madera fosilizada y conglomerados brechosos polimícticos, indicativos de un ambiente sedimentario marino a continental. A – Arenisca grano fino y lutita con detrito de moluscos (gasterópodos y bivalvos) (sitio My373, río Nilo cuenca baja hacia el río La Muerte, coordenadas 1167000,94 – 418592,42). B – Restos de madera fósil carbonizada en zona de falla (intercalación centimétrica de areniscas de grano fino, lutitas y capa de carbón, buzante 18° hacia el 005° (sitio My573, río Pataste, coordenadas 1168429,926 – 426802,9636). C – Conglomerado brechoso (ruditas) basculado $>80^\circ$, intercalado entre areniscas y lutitas (sitio My495, afluente del río La Muerte cuenca media, coordenadas 1174723,957 – 419008,0452). D – Conglomerado brechoso (ruditas) a lo largo del curso del río La Muerte, sobreyacido por areniscas de grano grueso (sitio My500, río La Muerte, coordenadas 1173331,991 – 420151,9617).



Figura 3.3 Sedimentos de la Formación Venado mostrando la influencia tectónica en el área, indicado por un basculamiento de 90° de las capas sedimentarias. A – Intercalación centimétrica a decimétrica de areniscas y lutitas basculadas, buzantes 75° hacia el 024° (sitio My494, afluente del río La Muerte cuenca media, coordenadas 1174688,018 – 419004,0204). B – Secuencia interestratificada de areniscas y lutitas con estratificación laminar y ruditas, basculada casi 90° (sitio My495, aguas abajo del mismo afluente de My494, coordenadas 1174723,957 – 419008,0452).



Figura 3.4 Secuencia estratificada de la Formación Venado en zona de falla inversa (base de la secuencia). A – Secuencia de areniscas y lutitas con estratificación decimétrica, buzantes 17° hacia el 005° . La base de la secuencia y parte del talud está fallado (sitio My573, cuenca del río Pataste, coordenadas 1168429,926 – 426802,9636). B – mismo sitio My573, detalle acercamiento de las evidencias de zona de falla en areniscas.



Figura 3.5 Rocas carbonatadas de la Formación Venado. A – caliza masiva bien estratificada en paquetes decimétricos, buzante 52° hacia el 065° (sitio My289, río Nilo, coordenadas 1165707,45 – 417857,55). B – Caliza masiva con detrito bioclástico (bivalvos) (sitio My465 quebrada El Túnel, coordenadas 1167322,71 – 416704,47). C – Brecha calcárea color gris con intraclastos calcáreos (sitio M471, parte alta formando colinas entre río La Muerte y el río Nilo, coordenadas 1165252,85 – 416843,36). D – Detalle acercamiento sitio My471).



Figura 3.6 Areniscas calcáreas (calcarenitas) de la Formación Venado en zona de falla. Indica la tectónica que afecta en numerosos sitios la secuencia sedimentaria, no solo por el grado de fracturación de la roca sino también por los fuertes buzamientos y variaciones en la dirección de buzamiento de las capas sedimentarias. También la presencia de diques cortando la secuencia sedimentaria en areniscas que ha sufrido reomorfismo por contacto, indicativo de actividad magmática subvolcánica. A – arenisca calcárea tectonizada (diaclasas de alto ángulo) (sitio My620, quebrada Danta, coordenadas 1165371,932 – 419317,0617). B – mismo sitio My620, notar la fuerte afectación por diaclasas de alto ángulo sobre el cauce del río. C – mismo sitio My620, se observa estratificación decimétrica con alto buzamiento por basculamiento, buzantes 48° hacia el 318° . D – Arenisca con intrusiones de diques basálticos (sitio My288, cuenca baja del río Nilo, coordenadas 1165638,49 – 417833,53).



Figura 3.7 Sedimentos de la Formación Venado en zona de falla. A) Secuencia de lutitas y capas de carbón en zona de falla sobreyacido por depósitos volcánicos del Plio-Cuaternario (sitio My357, río Jicarito, coordenadas 1167554,64 – 422453,86). B) Lutita fosilífera color gris (restos de detritos de moluscos) subyace la secuencia anterior (mismo sitio My357). D) Arenisca grano medio no carbonatada y lutitas basculadas por tectónica, buzantes 45° hacia el 182° (sitio My358, río Jicarito, coordenadas 1167518,94 – 422343,57). D) Areniscas de grano fino a medio en zona de falla, área cercana a las trazas de falla inversa.

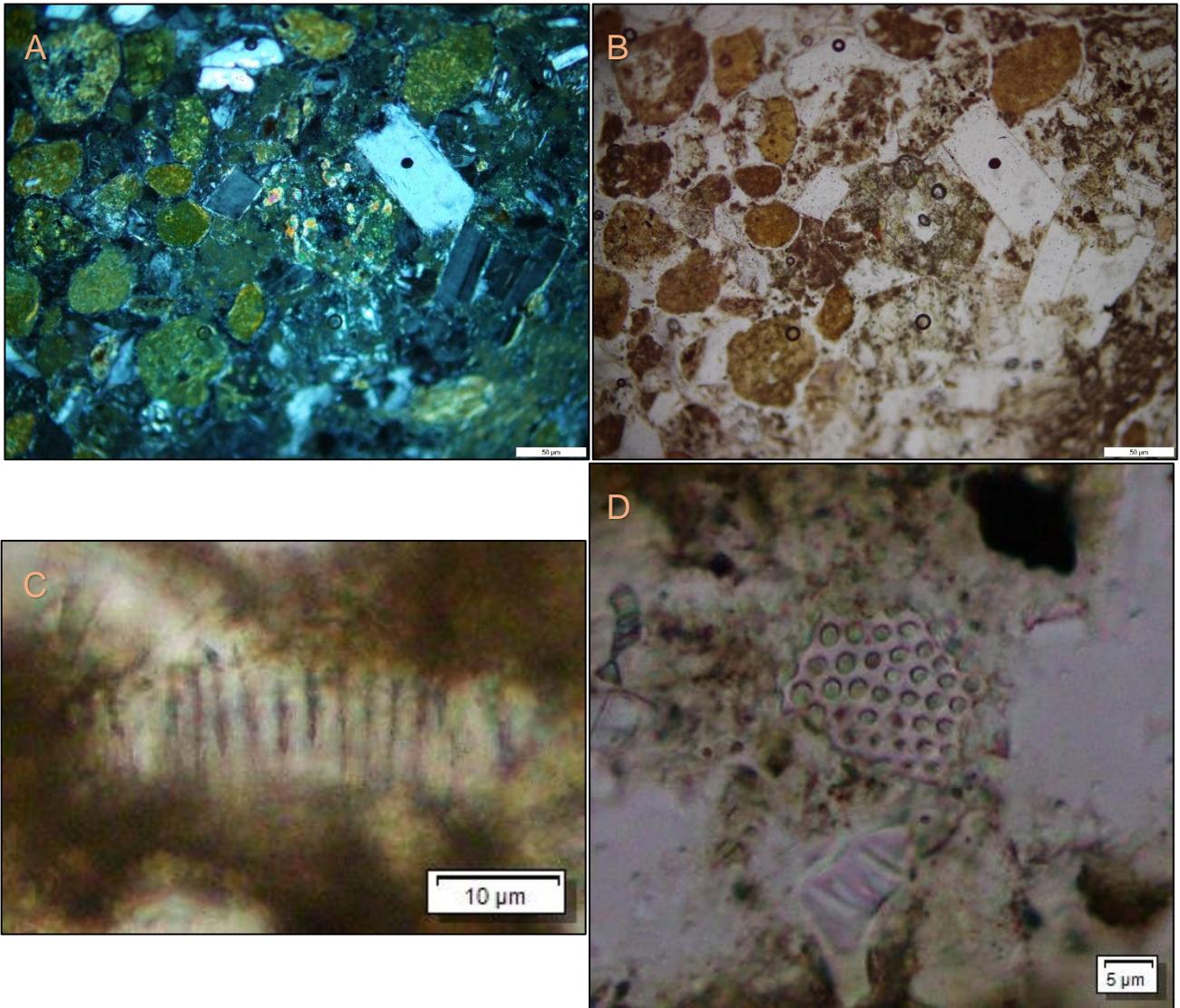


Figura 3.8 Microfotografías de los sedimentos de la Formación Venado: A) [NC] imagen en luz polarizada y B) [NP] en nícoles paralelos de una muestra del sitio My172zr (coordenadas 1166313,26 – 428038,70), muestra la presencia de epidota fósil en un fragmento volcánico heredado y la textura volcanoclástica de sus componentes; C) [NP] y D) [NP] imagen en nícoles paralelos de una muestra del sitio My172 (coordenadas 1166292,10 – 428001,66), muestra la presencia de microfósiles posiblemente de algas. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

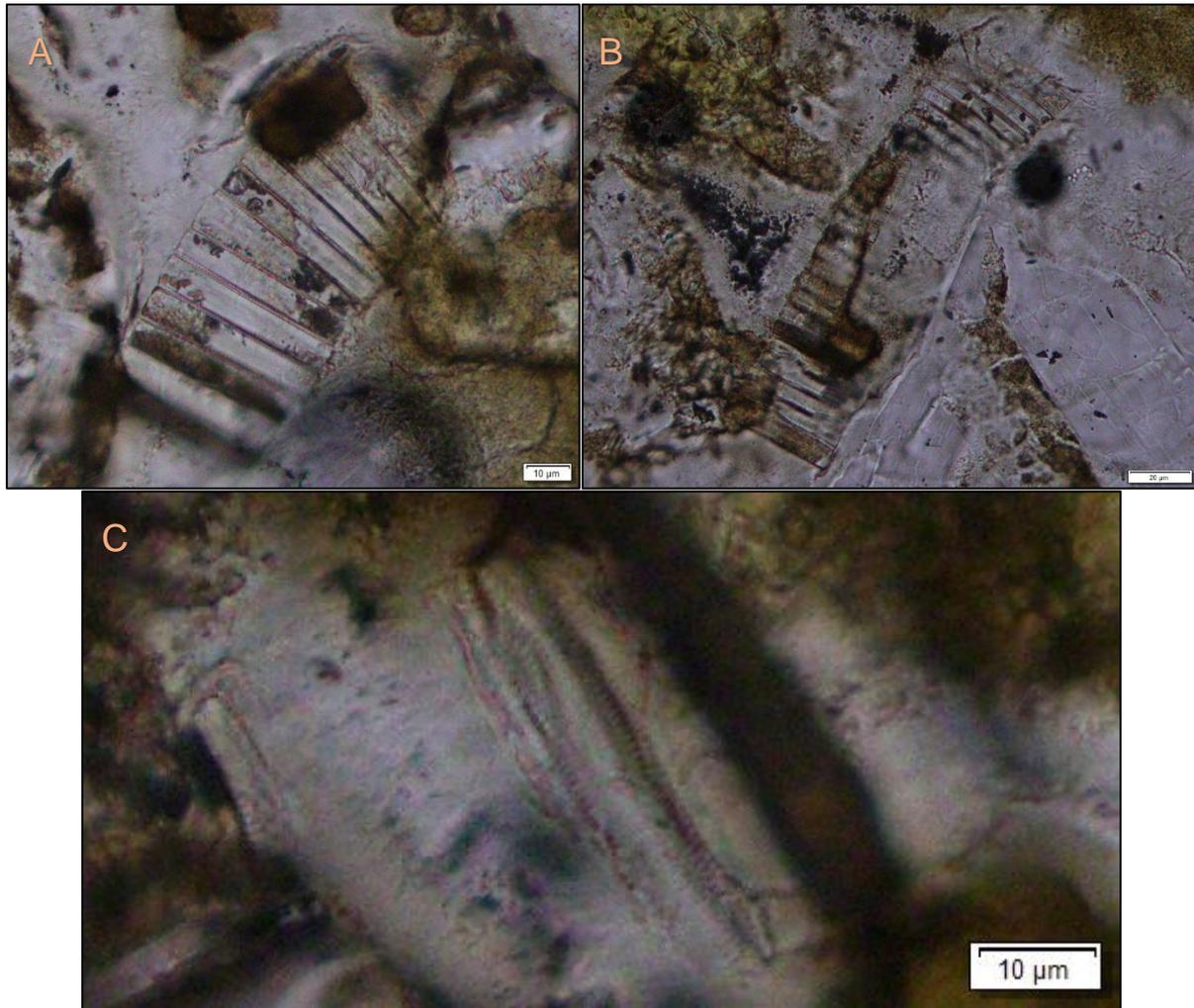


Figura 3.9 Microfotografías de los sedimentos de la Formación Venado en una muestra del sitio My611 (coordenadas 1172836,029 – 419162,0046). A) [NP], B) [NP] y C) [NP] muestran la presencia de microfósiles de algas (no determinado si corresponden a un ambiente marino o agua dulce). NP: nícoles paralelos.

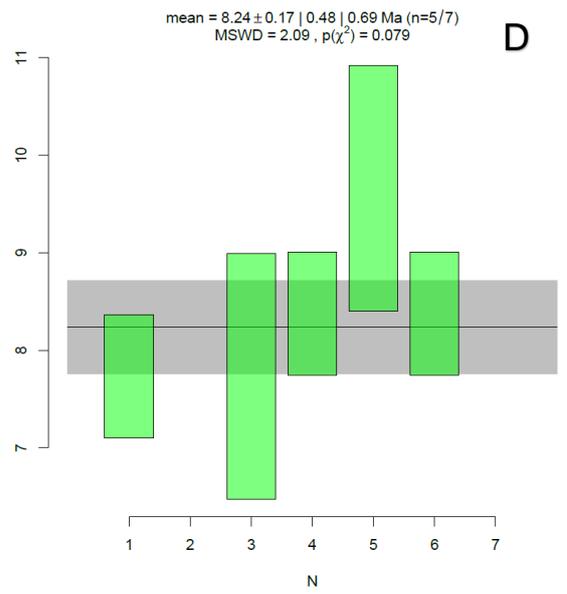
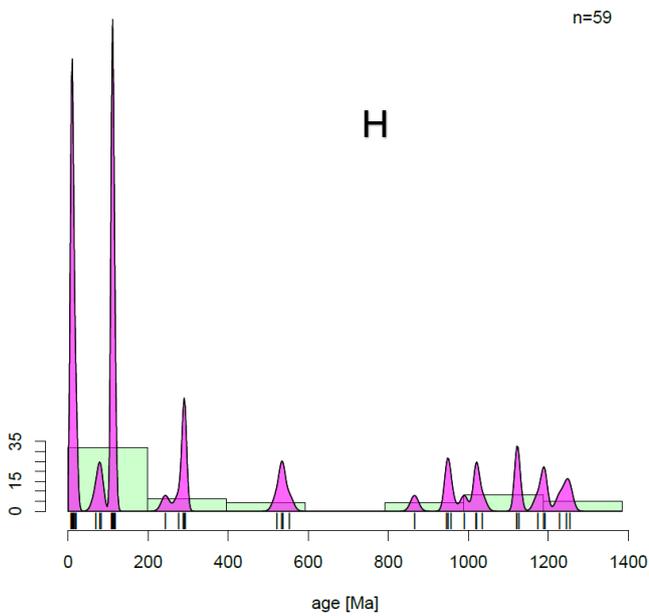
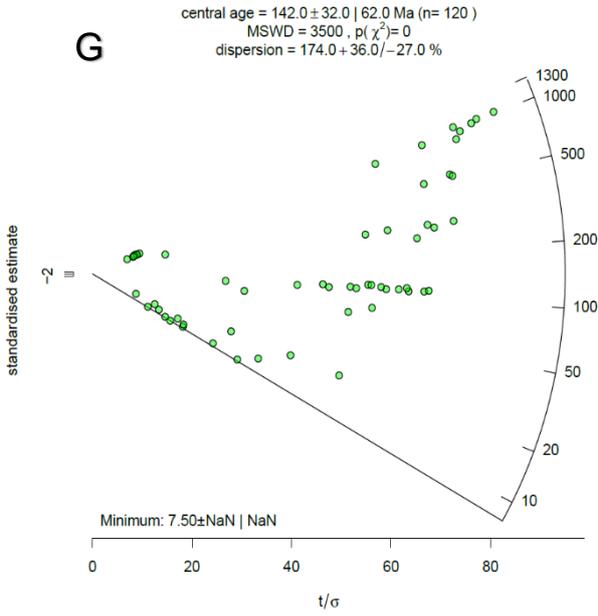
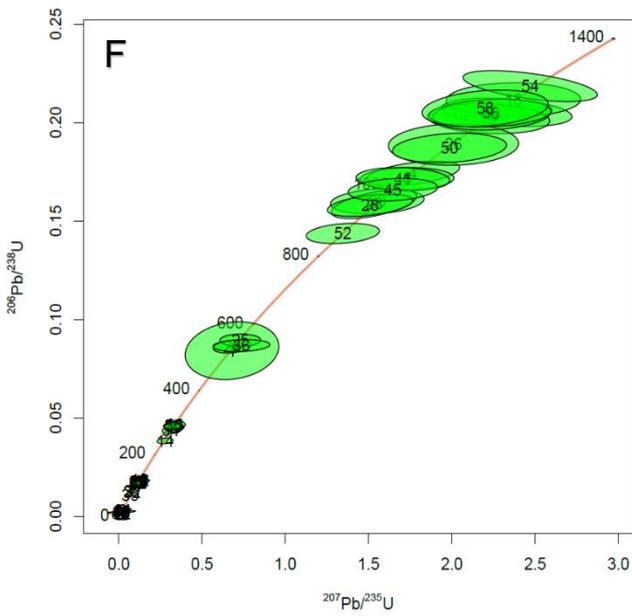
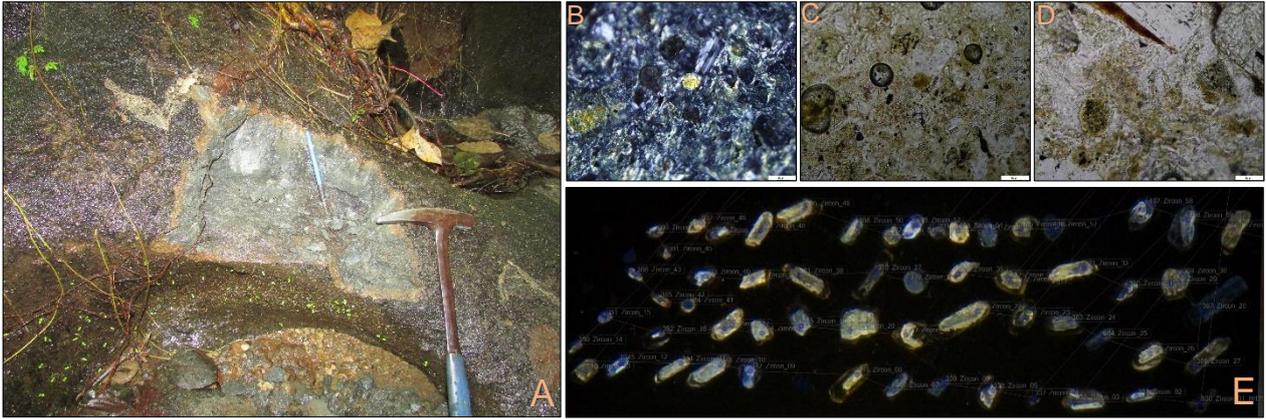


Figura 3.10 (A) Sitio My475 de la muestra seleccionada para el análisis de circones detríticos en la cuenca del río Nilo (coordenadas 1164328,87 – 417003,12); microfotografías en NC40x (B) y NP40x (C) y D) de una arenita lítica cristalina feldespática con microfósiles de diatomeas, foraminíferos y equinodermo (sitio My475); E) Imagen de catodoluminiscencia de los 60 circones analizados (My475) y la selección de los puntos más idóneos para el análisis isotópico de fechamiento U-Th-Pb, mediante la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS); F) Diagrama de concordia y medias ponderadas (Vermeesch, 2018) de los circones analizados; G) Diagrama radial de las edades estimadas y su distribución mostrando la edad mínima determinada en 7,5 Ma; H) Estimación de densidad Kernel (KDE) y frecuencia; D) Promedio de edades de los zircons más jóvenes y su incertidumbre asociada ($8,24 \pm 0,69$ Ma).

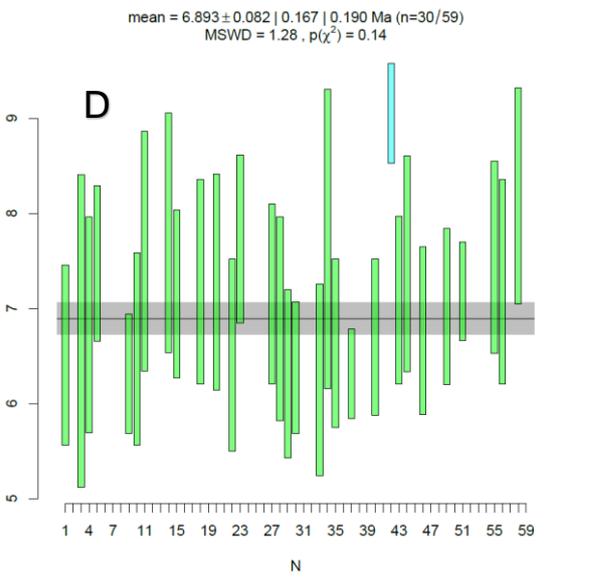
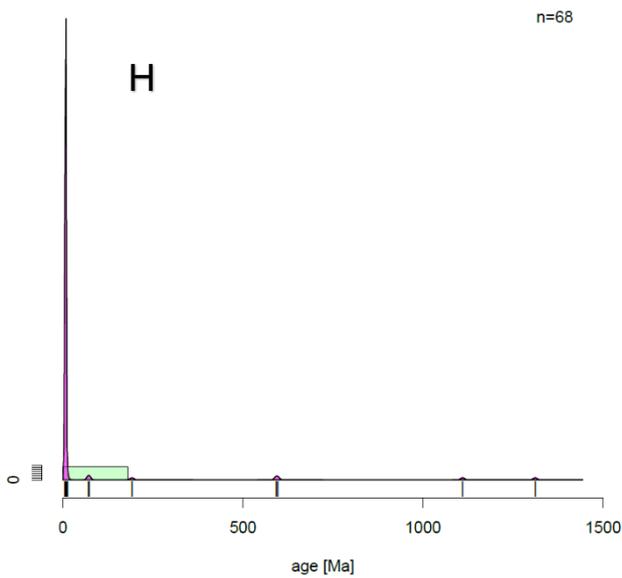
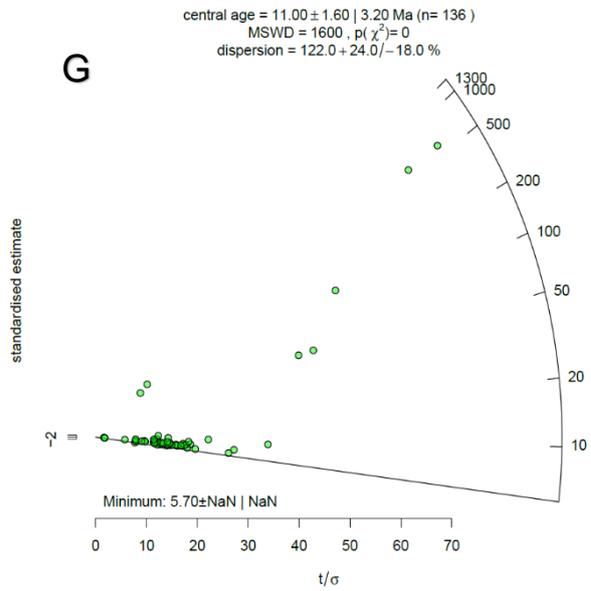
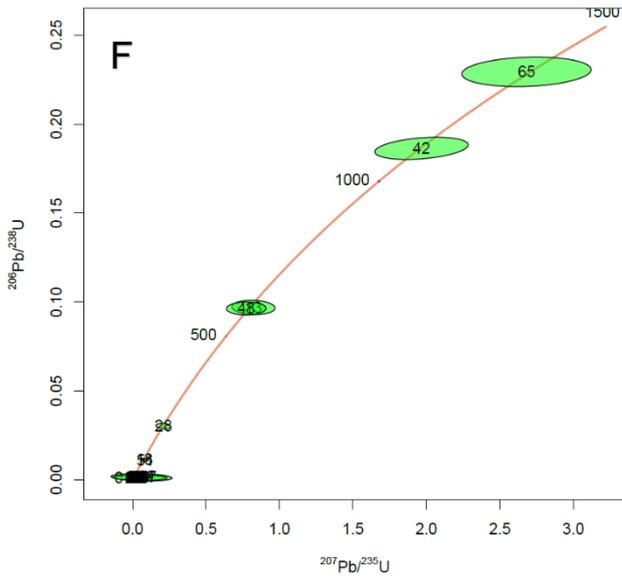
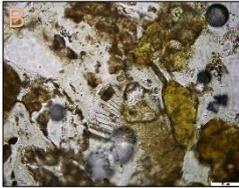
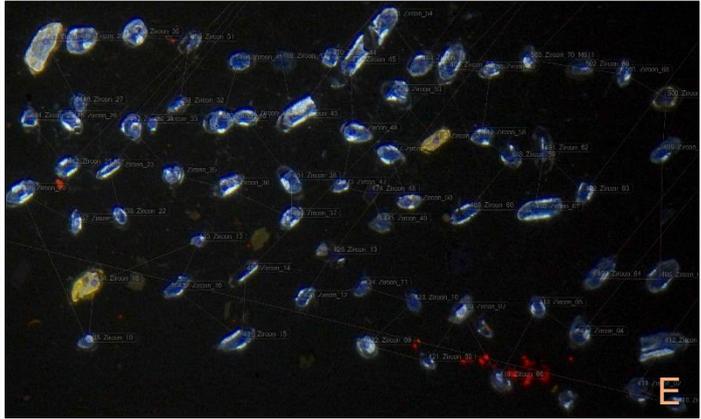


Figura 3.11 (A) Sitio My611 de la muestra seleccionada para el análisis de circones detríticos en la cuenca del río La Muerte (coordenadas 1172836,029 – 419162,0046); microfotografías en NP40x (B), (C) y D) de una arenita lítica cristalina feldespática con microfósiles de diatomeas, foraminíferos y equinodermo (sitio My611); E) Imagen de catodoluminiscencia de los 70 circones analizados (My611) y la selección de los puntos más idóneos para el análisis isotópico de fechamiento U-Th-Pb, mediante la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS); F) Diagrama de concordia y medias ponderadas (Vermeesch, 2018) de los circones analizados; G) Diagrama radial de las edades estimadas y su distribución mostrando la edad mínima determinada en 5,7 Ma; H) Estimación de densidad Kernel (KDE) y frecuencia; D) Promedio de edades de los zircons más jóvenes y su incertidumbre asociada ($6,89 \pm 0,19$ Ma).

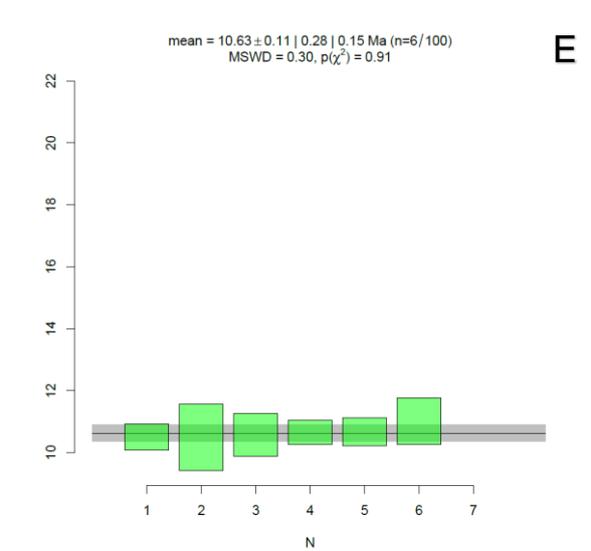
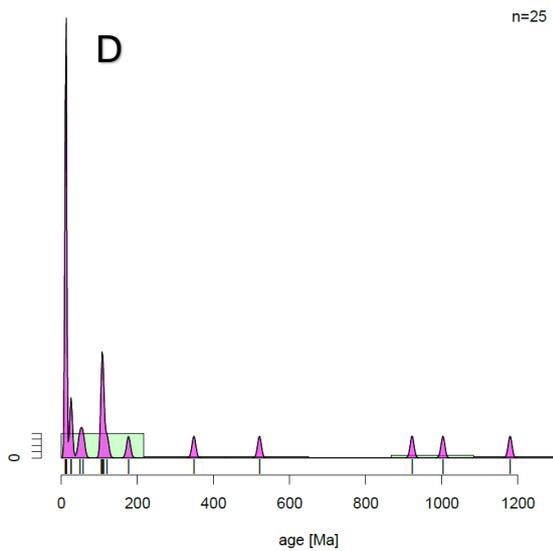
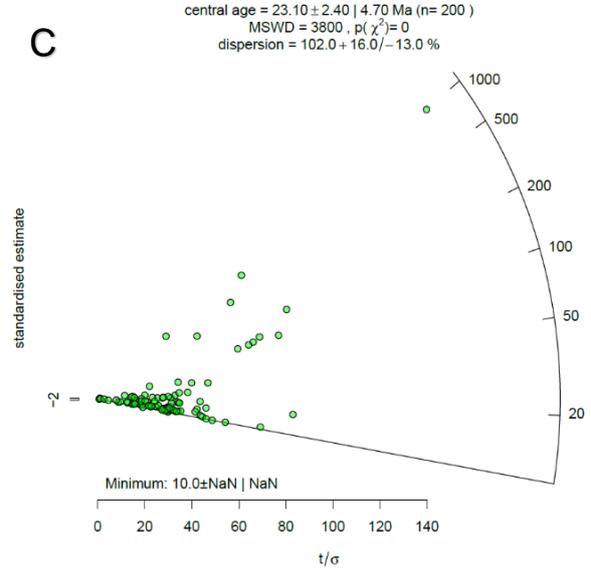
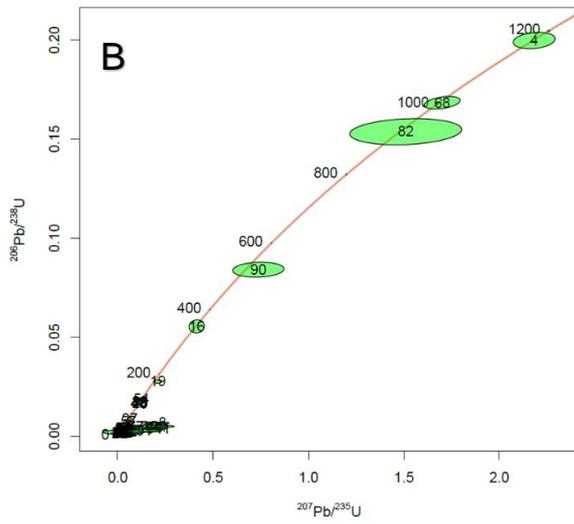
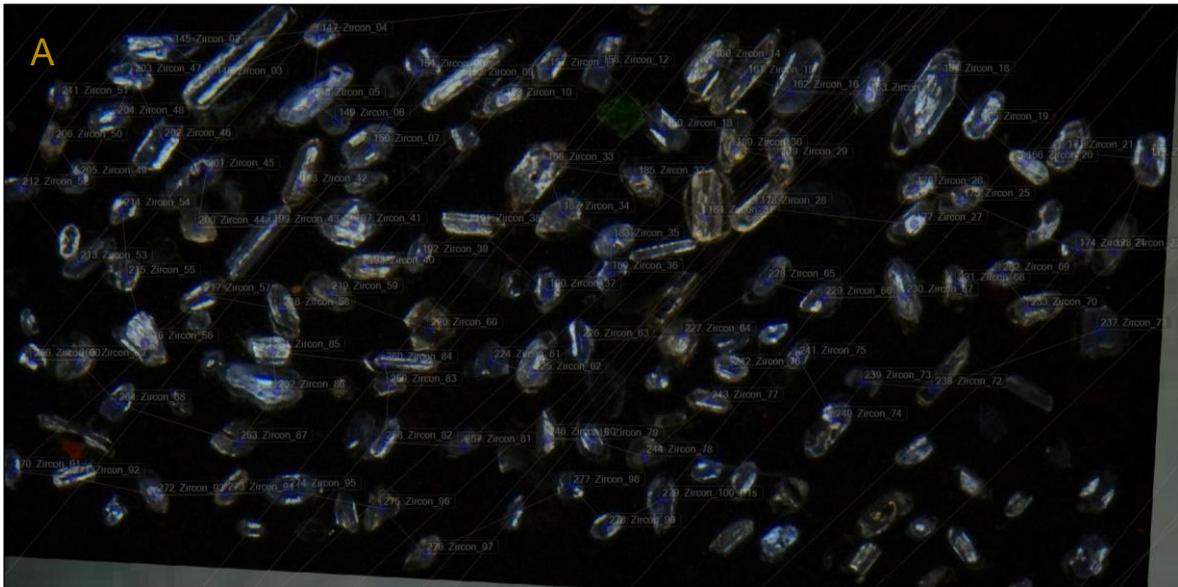


Figura 3.12 (A) Muestra P1s [Pozo Pataste (coordenadas 1172307,011 – 421659,0325); 585 – 650 m] A) Imagen de catodoluminiscencia de los 100 circones analizados (P1s) y la selección de los puntos más idóneos para el análisis isotópico de fechamiento U-Th-Pb, mediante la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS); B) Diagrama de concordia y medias ponderadas (Vermeesch, 2018) de los circones analizados; C) Diagrama radial de las edades estimadas y su distribución mostrando la edad mínima determinada en 10 Ma; D) Estimación de densidad Kernel (KDE) y frecuencia. E) Promedio de edades de los circones más jóvenes y su incertidumbre asociada ($10,63 \pm 0,28$ Ma).

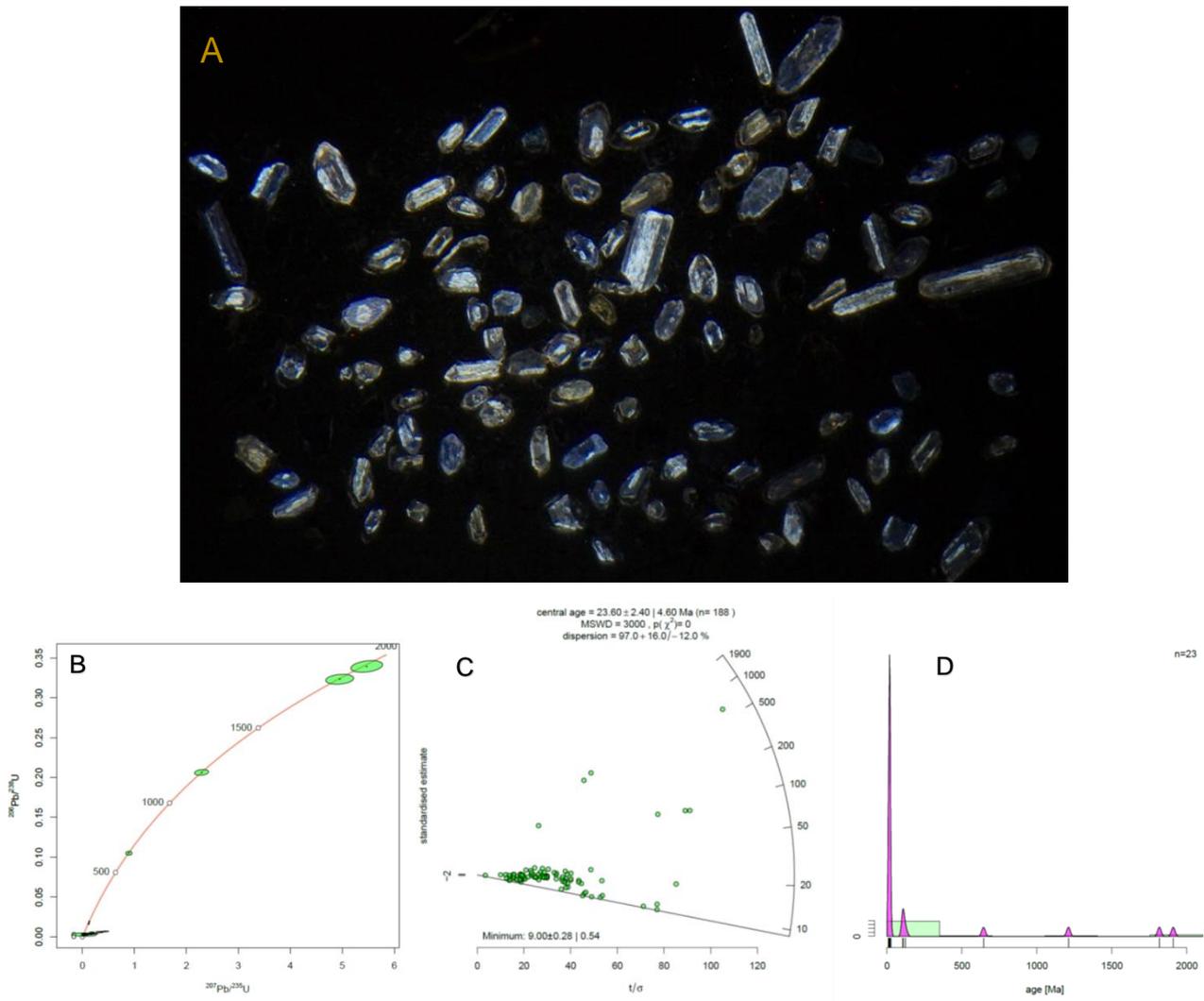


Figura 3.13 (A) Muestra T1s [Pozo Tonjibe (coordenadas 1193393,29 – 435092,9444); 405 – 800 m] A) Imagen de catodoluminiscencia de los 100 circones analizados (P1s) y la selección de los puntos más idóneos para el análisis isotópico de fechamiento U-Th-Pb, mediante la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS); B) Diagrama de concordia y medias ponderadas (Vermeesch, 2018) de los circones analizados; C) Diagrama radial de las edades estimadas y su distribución mostrando la edad de sedimentación máxima de $9,0 \pm 0,54$ Ma; D) Estimación de densidad Kernel (KDE) y frecuencia.

3.2 Mioceno Superior

3.2.1 Grupo Aguacate (β Nag, $\alpha\beta$ Nag, ζ , β)

El Grupo Aguacate constituye un amplio rango de litologías volcánicas, de edad y distribución estratigráfica. Numerosos autores desde 1882 han estudiado y descrito estas rocas dando énfasis a los aspectos litológicos de mineralización, distribución, relaciones estratigráficas, extensión y relación tectónica, desde escala local a regional (Denyer & Arias, 1991). Alvarado & Gans (2012) indican que todo el vulcanismo no asociado a los estratovolcanes cuaternarios o complejos ofiolíticos, y que yacen concordantemente o discordantemente sobre las secuencias sedimentarias marinas, ha sido incluido dentro del Grupo Aguacate. Alvarado et al. (1992) basado en el estudio de Kusssmaul et al. (1991), resume el vulcanismo de Aguacate en la región como: Serie Toleítica del Paleoceno-Mioceno constituida principalmente por basaltos toleíticos pobres en potasio, con alteración hidrotermal intensa y aglomerados subordinados, y que al inicio del Eoceno edificaron un arco de isla primitivo en lo que es hoy la Cordillera de Tilarán; la Serie Calco-Acalina del Mioceno Superior – Plioceno, constituida por basaltos enriquecidos en álcalis hasta andesitas con intercalaciones de tobas, ignimbritas, aglomerados, brechas y lahares.

El área expuesta se calcula aproximadamente en 4,9 km², lo cual representa cerca de un 1% del área total de la hoja. Esta serie de cuerpos ígneos afloran en al menos 38 sitios en las cuencas de los ríos Nilo, La Muerte, Jicarito, Pataste y Purgatorio, así como en tres sitios de extracción minera o tajos de la zona. En algunos sitios como los ríos Nilo, La Muerte y Jicarito se le observa aflorando a lo largo del cauce de forma continua o discontinua, en distancias que varían entre los 500 y 2000 metros.

Corresponde con una serie de cuerpos ígneos que afloran en el sector suroeste de la Hoja Monterrey. Macroscópicamente son lavas dacíticas hasta basálticas de textura afanítica y afanítica porfirítica, de color grisáceo a negro, generalmente muy poco alteradas. Las dacitas presentan una típica estructura de disyunción columnar y fracturación leve en afloramientos (Figura 3.14), las andesitas basálticas y basaltos generalmente muestran fracturación moderada, cierta disyunción columnar y lajamiento que en algunos casos muestran pseudoestratificación como en el caso del sitio My322 (Figuras 3.15 y 3.16). El grupo de traquiandesitas basálticas definido geoquímicamente se presentan en dos sitios y presentan mayor grado de alteración (Figura 3.17).

La petrografía microscópica de las muestras My212, My262 y My265 para el caso de las dacitas, muestran una matriz hipocristalina porfirítica, constituida principalmente por una matriz de microlitos de plagioclasa en algunos casos con cierta textura fluidal y alteración incipiente a mineral de arcilla (clorita y sericita?); magnetita; máficos (biotita y piroxeno); microvesículas rellenas con mineral de alteración (cuarzo y biotita secundaria) y vidrio volcánico. Los fenocristales comprenden plagioclasa

hipidiomórfica algunas con alteración incipiente a clorita y trazas de calcita e inclusiones de piroxeno y biotita; clinopiroxeno (augita) alterado o reemplazado a mineral de arcilla y trazas de calcita; anfíbol (horblenda); ortopiroxeno (hipersteno); opacos (magnetita) y trazas de cuarzo?. La alteración se limita a la matriz intersticial y vetillas muy finas de mineral de arcilla (sericita?), reemplazamiento de ferromagnesianos (piroxenos y anfíbol) y plagioclasa incipiente a clorita. Minerales de alteración son clorita, biotita secundaria, cuarzo y trazas de calcita (Figura 3.18). Las muestras My251 y My444 para el caso de las andesitas basálticas, muestran una textura holocristalina porfirítica - intersertal, constituida por una matriz de microlitos de plagioclasa hipidiomórfica, clinopiroxeno (augita) y magnetita. Los microfenocristales y fenocristales son plagioclasa hipidiomórfica, sin o baja zonación, a veces glomeroporfirítica con clinopiroxeno o intercrecimiento en cumulitos; clinopiroxeno; olivino y magnetita. Minerales de alteración son clorita alterando o reemplazando el olivino, alterando plagioclasa y en vetillas muy finas (Figura 3.19). Las muestras My374 y My321 para el caso de los basaltos, presentan una textura holocristalina porfirítica seriada e intersertal, con una matriz constituida por microlitos de plagioclasa en una textura intersertal e intergranular, en algunos casos alteración incipiente a nontronita, clinopiroxeno, olivino, hipersteno, magnetita, trazas de calcita y ceolitas (<5%) formando cristales tabulares y agregados de mayor tamaño. Los fenocristales son plagioclasa hipidiomórfica hasta xenomórfica en textura seriada, con inclusiones de minerales máficos y opacos, alteración incipiente a nontronita diseminada y en vetillas muy finas, sin presencia a zonación media; olivino alterado o reemplazado a nontronita; clinopiroxeno (augita) con alteración a nontronita; ortopiroxeno (hipersteno). Los minerales de alteración y secundarios son en la matriz y reemplazamiento de ferromagnesianos a nontronita, trazas de calcita y ceolitas (Figuras 3.20 y 3.21).

El análisis mineralógico mediante microsonda electrónica para el caso de una muestra de dacita (M265), determinó la presencia de vidrio volcánico, minerales como plagioclasa (anortita) con inclusiones de apatito e ilmenita, titanomagnetita, ilmenita y apatito (Figura 3.22). Para el caso de un basalto (My321) determino la presencia de vidrio volcánico, plagioclasa (anortita), olivino, augita, cuarzo, titanomagnetita y mineral de alteración (esmectita) (Figura 3.23).

El análisis difractométrico de la muestra My321 determina la presencia de plagioclasa (anortita y labradorita), augita y mineral de arcilla perteneciente al grupo de la vermiculita.

Al igual que los sedimentos del Mioceno, es muy posible que esta unidad esté cubierta por los depósitos volcánoclasticos del Plioceno – Pleistoceno Inferior y volcánicos del Pleistoceno Inferior (Formación Monteverde). El contacto inferior de esta unidad no se observa en el campo, y se interpreta está en contacto lateral con la Formación Venado y en algunos sitios la intruye. Se estima que su espesor puede superar los 500 m.

Según las edades obtenidas en este trabajo por datación radiométrica y la geoquímica se asocian con el vulcanismo de la Formación Grifo Alto acorde con Alvarado & Gans (2011). La edad según dataciones radiométricas K/Ar en tres muestras corresponde al Mioceno Superior (Tabla 3.1). Las muestras datadas corresponden con la My212, un cuerpo hipoabisal de dacita ($8,71 \text{ Ma} \pm 1,56$); la My374 con un basalto ($7,73 \text{ Ma} \pm 1,01$) y la My444 con una andesita basáltica ($5,24 \text{ Ma} \pm 0,76$). La muestra T2i (Figura 3.24) del nivel inferior del pozo Tonjibe, corresponde a una muestra ígnea cuya edad de concordia es de $15,38 \text{ Ma} \pm 0,51$, interpretada como la edad de cristalización de la unidad (Solari, 2018).

Dataciones K-Ar								
Código	Formación	Litología	Edad	Método	Latitud norte	Longitud oeste	Elevación (msnm)	Referencia
CR-MV-02-40	Grifo Alto	Traquiandesita	$5,65 \pm 0,03$	K/Ar	1168643,25	417136,0699		Sen Grupta et al. (1986)
CR-212	Monteverde	Lava (bloque monolítico de andesita basáltica)	$1,73 \pm 0,2$	40Ar/39Ar	1171285,947	423924,9423		Alvarado & Gans (2012)
M212	Grifo Alto	Dacita	$8,71 \pm 1,56$	K/Ar	1166013,3	418639,5417	288,673	
M374	Grifo Alto	Basalto	$7,73 \pm 1,01$	K/Ar	1166643,686	418491,204	241,296	
M444	Grifo Alto	Andesita basáltica	$5,24 \pm 0,86$	K/Ar	1166225,2	427938,913	355,685	

Tabla 3.1 Resultados de dataciones radiométricas mediante el método K/Ar realizados en el área de estudio de la Hoja Monterrey



Figura 3.14 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate). A – Dacitas con disyunción columnar en la cuenca alta del río Nilo. Corresponde a una serie de cuerpos ígneos que afloran a lo largo de 1,2 km en el río Nilo (sitio My265, río Nilo, coordenadas 1164550,72 – 417752,22). B – mismo sitio My265, acercamiento a la estructura columnar.



Figura 3.15 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate). A – Andesitas basálticas en los sitios My444 (cuenca alta del río Purgatorio, coordenadas 1166225,20 – 427938,91). B) sitio My461 (cuenca media del río La Muerte, coordenadas 1169887,08 – 418223,26).



Figura 3.16 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate). A – Basaltos a lo largo de la cuenca baja del río Nilo (sitio My293, coordenadas 1166212,02 – 418242,49). B – Basaltos con desarrollo de estructuras de flujo (pseudoestratificado) y basculamiento a largo de la cuenca alta del río Jicarito (sitio My322, coordenadas 1169425,43 – 423311,51), nótese el buzamiento de la estructura en capas.

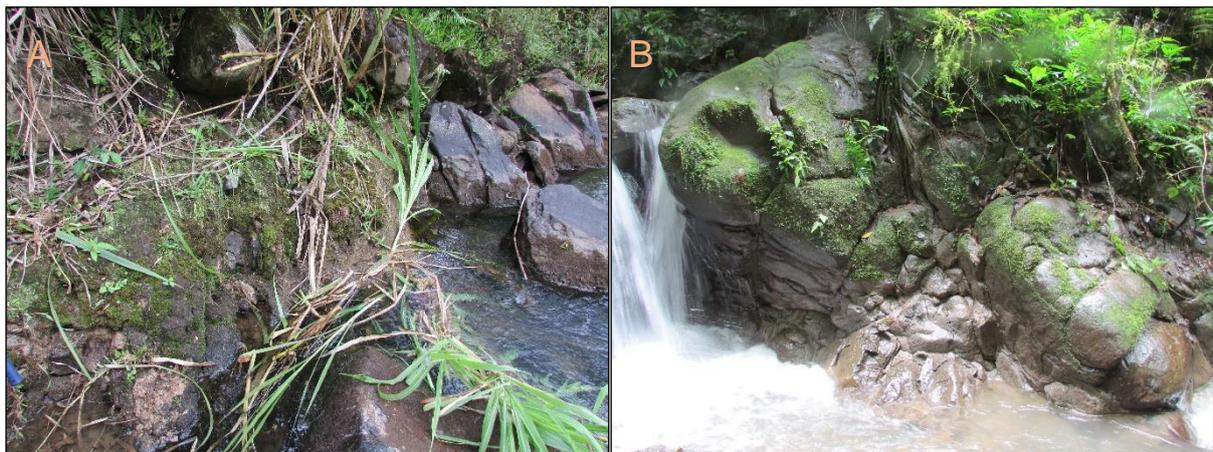


Figura 3.17 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate). A – Traquiandesita basáltica presente en la cuenca alta del río Jicarito (sitio My345, coordenadas 1168306,71 – 422778,31). B – Traquiandesita basáltica presente aguas arriba de un afluente del río Arenal (sitio My452, coordenadas 1162949,89 – 422256,38).

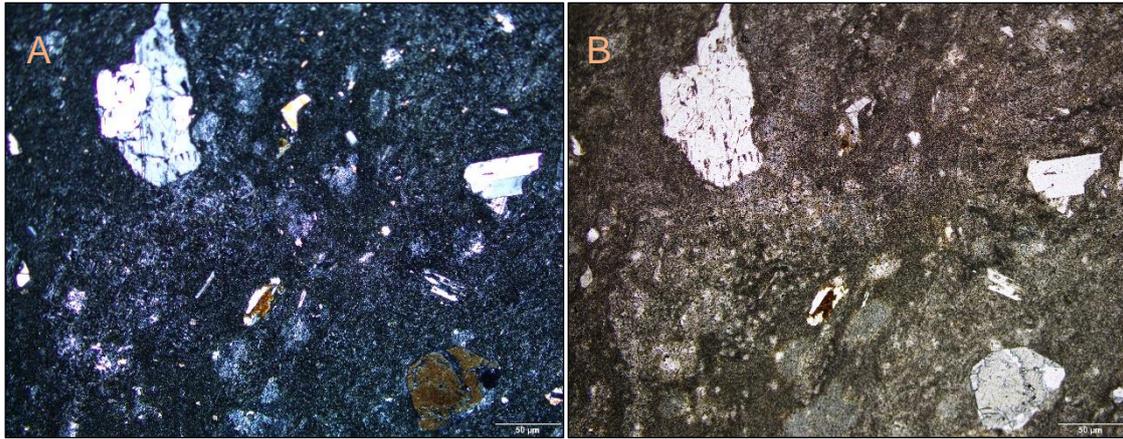


Figura 3.18 Microfotografía de una dacita en el sitio My212 (coordenadas 1166013,30 – 418639,54). A) imagen en luz polarizada [NC10x] que muestra la presencia de fenocristales y microfenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno. B) [NP10x] misma imagen a nícoles paralelos mostrando la matriz vítrea típica de una dacita. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

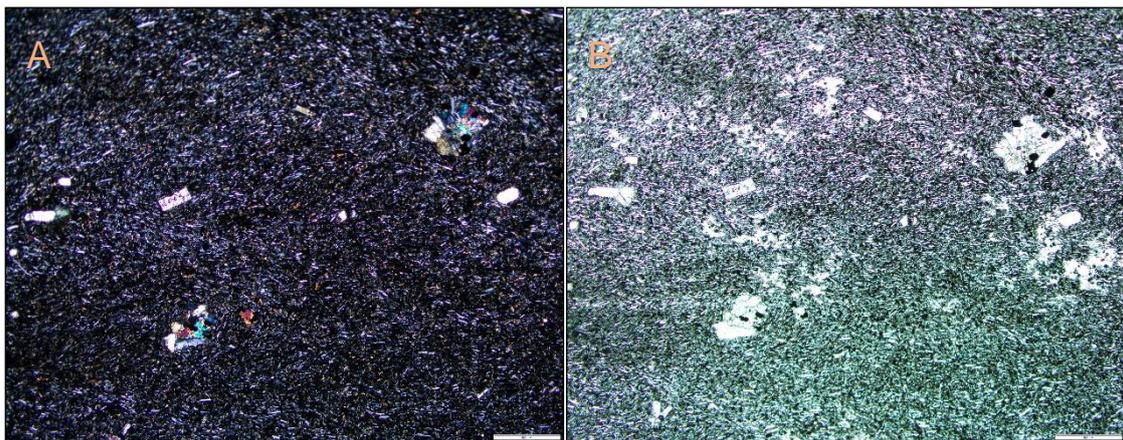


Figura 3.19 Microfotografía de una andesita basáltica en el sitio My444 (coordenadas 1166225,20 – 427938,91). A) imagen en luz polarizada [NC4x] que muestra la presencia de microfenocristales de plagioclasa y ferromagnesianos. B) [NP10x] misma imagen a nícoles paralelos mostrando la textura microcristalina. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

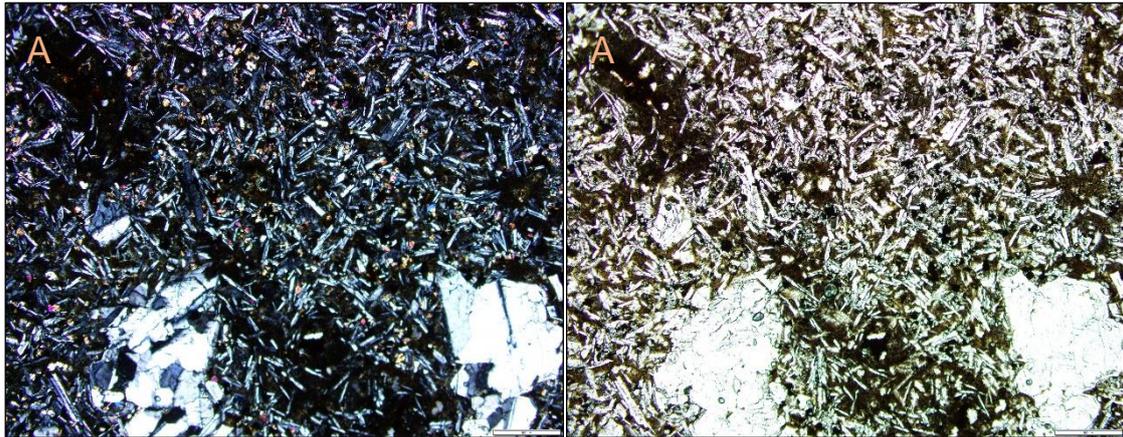


Figura 3.20 Microfotografía de un basalto en el sitio My374 (coordenadas 1166643,69 – 418491,20). A) imagen en luz polarizada [NC4x] que muestra la textura holocristalina porfírica intersertal y la presencia de ferromagnesianos (olivino) en la matriz y fenocristal alterado a nontrinita. B) [NP4x] misma imagen a nícoles paralelos mostrando la textura cristalina y alteración de la matriz a nontronita. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

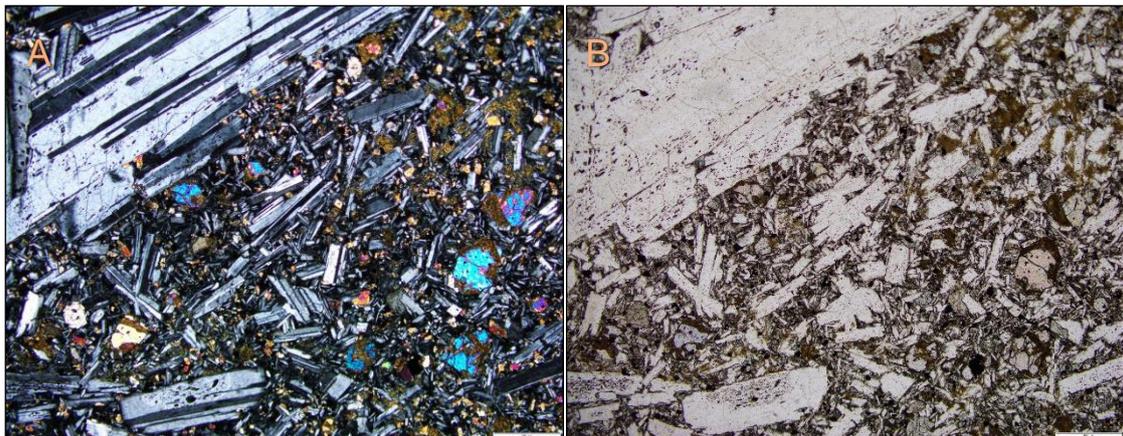
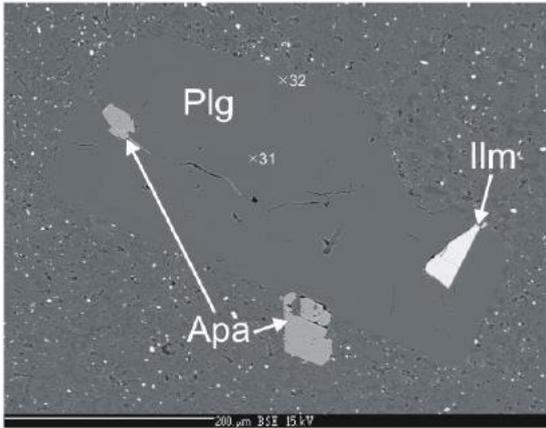


Figura 3.21 Microfotografía de una diabasa en el sitio My321 (coordenadas 1169079,47 – 423297,49). A) imagen en luz polarizada [NC4x] que muestra la textura holocristalina porfírica seriada con la presencia de plagioclasa, olivino, clinopiroxeno e hipersteno. B) [NP4x] misma imagen a nícoles paralelos mostrando la naturaleza cristalina de la matriz y alteración a nontronita. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

M265 f1



M265 f2 (detail of matrix)

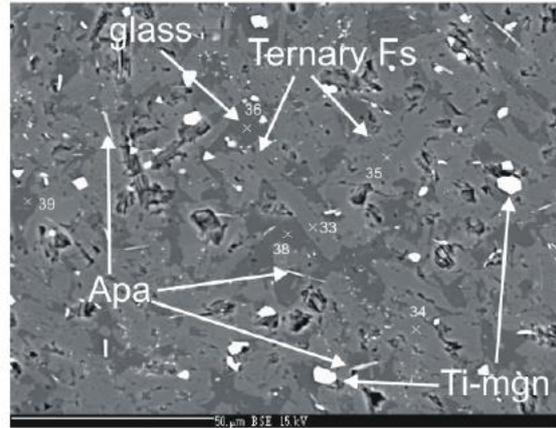
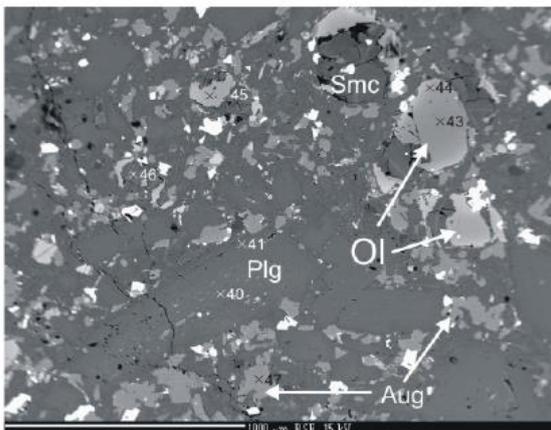


Figura 3.22 Determinación mineralógica mediante el método de microsonda en una muestra de dacita (My265, coordenadas 1164550,72 – 417752,22), indica algunos de los principales minerales presentes.

M321 f1



M321 f2

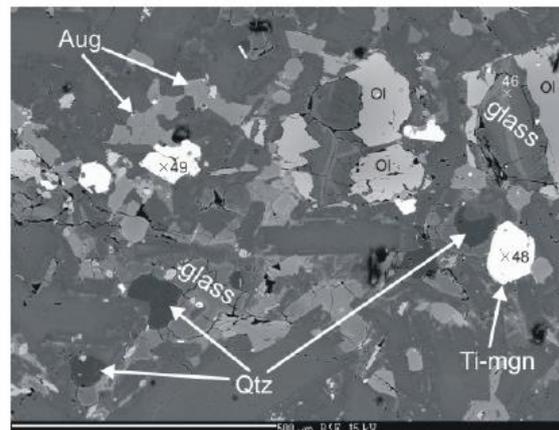


Figura 3.23 Determinación mineralógica mediante el método de microsonda en una muestra de basalto (My321, coordenadas 1169079,47 – 423297,49), indica algunos de los principales minerales presentes.

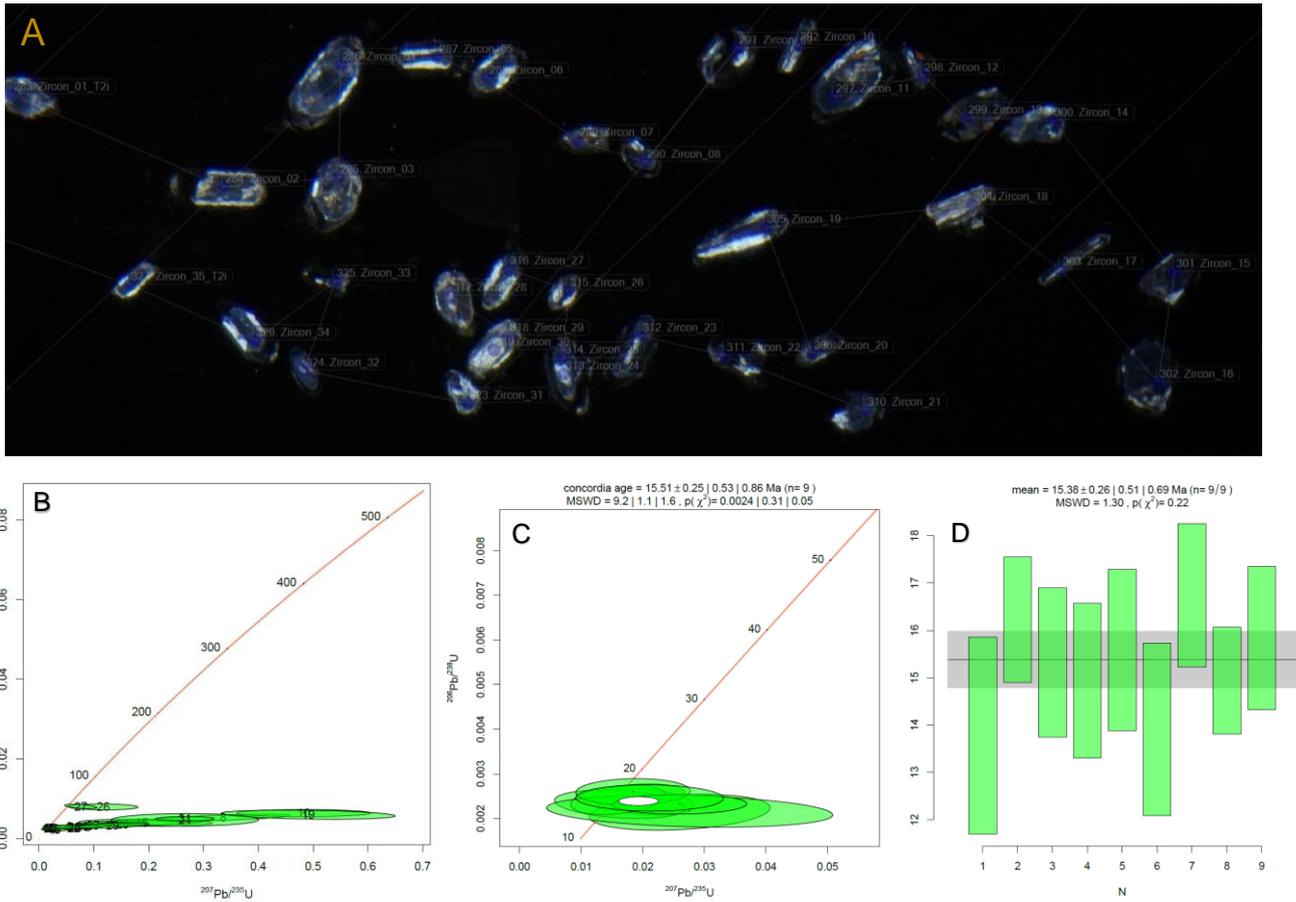


Figura 3.24 (A) Muestra T2i [Pozo Tonjibe (coordenadas 1193393,29 – 435092,9444); 1400 – 1900 m] A) Imagen de catodoluminiscencia de los 35 circones analizados (T2i) y la selección de los puntos más idóneos para el análisis isotópico de fechamiento U-Th-Pb, mediante la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS); B y C Diagramas de concordia y medias ponderadas (Vermeesch, 2018) de los circones analizados; D) Promedio de edades de los zircones analizados ($15,38 \pm 0,26 \pm 0,51 \pm 0,69$ Ma), interpretado como la edad de cristalización del evento magmático.

3.3 Plioceno

3.3.1 *Sedimentación de colmatación de cuenca (a-luN)*

Corresponde con una sedimentación de colmatación de cuenca que aflora en el sector noroeste y sureste de la hoja. Generalmente presentan bajos buzamientos y su extensión se limita a los cauces de los ríos donde está mejor expuesta ya que está cubierta por el vulcanismo de la Formación Monteverde.

El área expuesta se calcula aproximadamente en 9,9 km², lo cual representa un 2% del total del área de la hoja. Su extensión se restringe principalmente a un pequeño sector de los cauces de los ríos Jicarito (cuenca media), Pataste (cuenca media) y Caño Ciego (cuenca media) en las cercanías de Puerto Seco, San Miguel y Finca La Garita en el sector noroeste y a las quebradas Estero y Perra en las cercanías de Esterito y Buenos Aires en el sector sureste.

Corresponde con sedimentos volcanoclásticos que varían desde lutitas hasta areniscas gruesas líticas con mucho aporte volcánico, coloraciones que varía de crema, grisáceo hasta café. Se presentan con estratificación decimétrica hasta métrica, con laminación paralela interna entre los estratos y con buzamientos entre los 4° y 18° (Figura 3.25). Se han reconocido también asociados a esta Unidad sedimentos lacustres como en el sitio My356, los cuales se presentan fuertemente basculados al estar ubicados cerca del área de las trazas de fallas inversas (ver Figura 3.26 para más detalles). Están en contacto discordante con lahares de la Formación Buena Vista.

La petrografía de las muestras My529 (Quebrada Perra), My550, My568, My569 (río Caño Ciego) y My731 (río Jicarito), indican la presencia de mucho aporte de componentes volcánicos primarios como feldespato, piroxeno, trazas de mica (biotita), anfíbol (horblenda), cuarzo primario y trazas de ortopiroxeno (hipersteno) (Figuras 3.27 y 3.28). La presencia de minerales de alteración como minerales de arcilla, óxidos de hierro, componentes clásticos de origen hidrotermal: cuarzo secundario, epidota, biotita-cuarzo, cuarzo-biotita, cuarzo-sericita, cuarzo-epidota, ceolitas <1%, silicificación, sericitización, cuarzo-sericita-biotita-óxidos de hierro, mineral de arcilla (clorita, sericita). La presencia de líticos lávicos heredados de andesita, dacita e hipoabisal, alterados a minerales de arcilla, cuarzo, sericita, epidota, biotita y óxidos de hierro. También la presencia de fragmentos piroclásticos de ignimbrita y pómez.

El análisis difractométrico en dos muestras de estos sedimentos determinó para el caso de la My550, la presencia de sílice o cuarzo amorfo hidratado y plagioclasa cálcica (anortita), minerales de arcilla pertenecientes al grupo del caolín (nacrita) y esmectita (Apéndice). Para la muestra My356 se determinó la presencia de cuarzo amorfo y mineral de arcilla del grupo de la vermiculita.

Es posible que esté cubierta en su mayor parte por los depósitos volcánicos del Plioceno y Pleistoceno Inferior. Basado en los datos del pozo Pataste y los sitios donde aflora se estima un espesor de 400 m. Una característica de esta sedimentación es la presencia de una discordancia angular erosiva en el río Caño Ciego (sitio My598). Esta discordancia puede estar relacionada con el evento tectónico documentado en el límite Mioceno – Plioceno (Figura 3.29).

Por relación estratigráfica y basado en los datos del pozo Pataste se le ha asignado una edad del Plioceno.



Figura 3.25 Sedimentos de colmatación de cuenca en el sitio My550 (coordenadas 1175285,953 –427177,9991). A) Intercalación de areniscas de grano fino a medio a lo largo del cauce del río Caño Ciego, nótese el bajo buzamiento de los estratos. B) Un acercamiento al detalle de los sedimentos con estratificación laminar de areniscas de grano fino.



Figura 3.26 Depósitos epiclásticos del Plio-Pleistoceno sitio My356 (coordenadas 1167569,88 – 422564,22). A) Sedimentos lacustres con estratificación centimétrica basculados por tectónica (buzantes 65° hacia el 325°) y en discordancia con brechas de la Formación Buena Vista (margen derecha del cauce del río Jicarito, cuenca alta). B) Un acercamiento a las características del depósito, muestra el fuerte basculamiento y estratificación centimétrica y laminar.

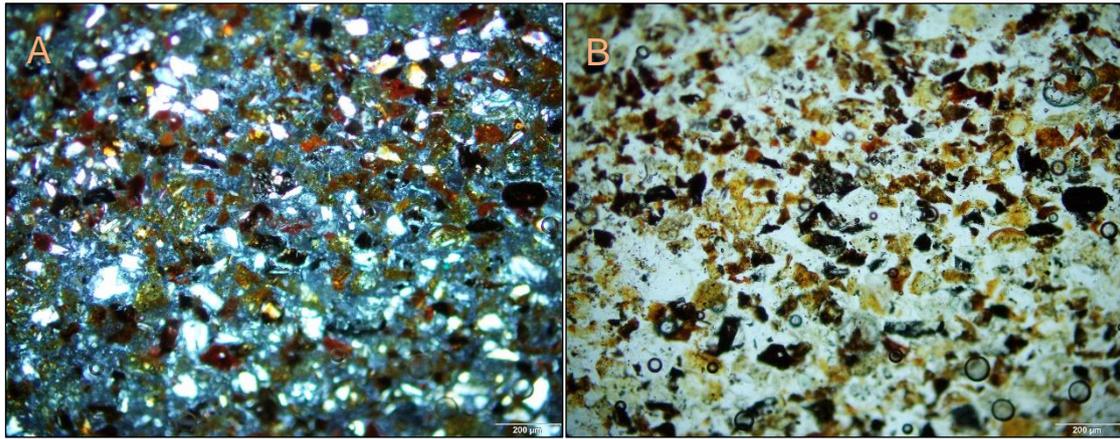


Figura 3.27 Microfotografías de los sedimentos de colmatación de cuenca en el sitio My568 (coordenadas 1175388,963 – 427265,9734). A) [NC10x] imagen en luz polarizada que muestra la presencia de material volcánico. B) [NP10x] misma imagen a nícoles paralelos. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

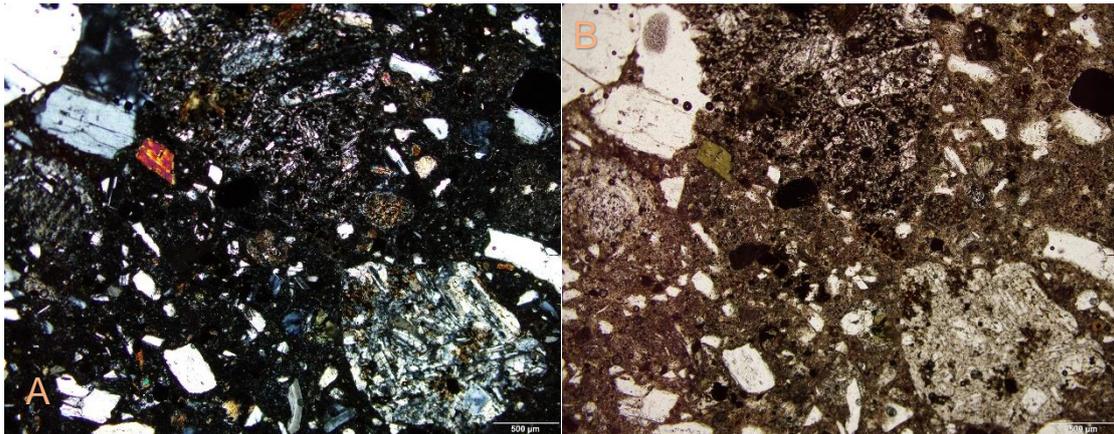


Figura 3.28 Microfotografías de los sedimentos de colmatación en el sitio My731 (coordenadas 1173711,935 – 421101,0229). A) [NC4x] imagen en luz polarizada que muestra el alto contenido de aporte volcánico. B) [NP4x] misma imagen a nícoles paralelos. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.



Figura 3.29 Sedimentos de colmatación de cuenca en el sitio My598 (coordenadas 1175254,002 – 427067,9646). A) Discordancia angular entre areniscas y limolitas a lo largo del cauce del río Caño Ciego, cerca del sitio My550. Se observa contacto erosivo o discordancia entre dos fases de sedimentación. B) Acercamiento al detalle del contacto.

3.4 Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior

3.4.1 Unidad indiferenciada (igNQpt)

Corresponde con una corriente de densidad piroclástica concentrada o flujo piroclástico (ignimbrita). El área expuesta se calcula aproximadamente en 0,75 km², lo cual representa un 0,15% del total del área de la hoja. Su extensión se restringe en tres áreas del sector oeste y cinturón de empate de la hoja Monterrey. Aflora en tres áreas, principalmente a lo largo de cauces de quebradas y ríos. Se le observó en un sector de la quebrada Catarata, afluente del río Nilo, en un sector de un afluente de la quebrada Pavas, en los alrededores de Santa Eulalia, en un sector del río Jicarito, entre Linda Vista y Pataste Arriba, y en un sector del río La Muerte, 4 km al oeste del pueblo de Jicarito. Fuera de la hoja, aflora en un sector cerca de la carretera que conduce a Guatuso, al este del poblado Cucaracha (San Josecito), sector noroeste de la hoja.

Macrosópicamente corresponde con una ignimbrita endurecida/muy endurecida pero no soldada, con una intensidad de alteración leve a moderada dependiendo del sitio, de color grisáceo, crema a blanquecina dependiendo de la intensidad de alteración. Presenta un contenido de pómez >35% con tamaños de hasta 5 cm, matriz tobácea conteniendo cristales de feldespato, magnetita y líticos lávicos (Figuras 3.30, 3.31 y 3.32).

La petrografía de las muestras My229 (Quebrada Pavas), My380 (sobre camino cerca de Cucaracha), My417 y My476 (afluente de la Quebrada Pavas), muestran una textura piroclástica en una matriz de toba parcialmente vítrea con esquirilas y espículas de vidrio volcánico, con bajo grado de soldamiento. Los componentes piroclásticos son cristales de feldespato (plagioclasa) generalmente inalterada con grado bajo – medio de zonación, clinopiroxeno (augita), lapilli de pómez de variado tamaño ligeramente alteradas a mineral arcilloso, heredados de roca volcánica e hipoabisal (accesorios) algunos con alteración hidrotermal, vidrio volcánico, intercrecimiento de ceolitas producto de desvitrificación incipiente, minerales de alteración en fragmentos heredados: cuarzo secundario, sericita, clorita, epidota y óxidos de hierro (Figuras 3.33, 3.34 y 3.35).

El análisis mineralógico mediante microsonda electrónica para el caso de la muestra My476, determinó la presencia de vidrio volcánico, minerales como plagioclasa (anortita) con inclusiones de apatito, piroxeno, titanomagnetita, ilmenita y xenolitos conteniendo plagioclasa cálcica (anortita), titanomagnetita, anfíbol y vidrio volcánico desvitrificado (Figura 3.36).

El análisis difractométrico de las muestras My380 y My476 determina la presencia de plagioclasa (andesina) y mineral de arcilla del grupo de la esmectita y vermiculita (Apéndice).

Es posible que en varios sitios esté cubierta por los depósitos volcánicos del Cuaternario incluyendo la Formación Monteverde o ha sido erosionada. En el sitio My416, en el cauce de un afluente de la quebrada Pavas, se observó en contacto con los sedimentos de la Formación Venado, su espesor se calcula no sobrepasa los 100 metros en el área de estudio.

Se intentaron datar las muestras My417 y My476 mediante el método K/Ar, pero no resultaron aptas debido a la dificultad de separar minerales primarios con potasio y por la alteración. Por relación estratigráfica con otras hojas cartográficas y estar sobreyaciendo a la Formación Venado se le ha asignado una edad de Plioceno Superior e inicios del Pleistoceno.



Figura 3.30 Corriente de densidad piroclástica (ignimbrita) presente en el sitio My411 (coordenadas 1164351,20 – 418394,80). A) muestra el sitio donde aflora el depósito a lo largo del cauce de un afluente de la quebrada Pavas. B) muestra un acercamiento a las características físicas del depósito, el contenido de pómez y el grado de endurecimiento.



Figura 3.31 Corriente de densidad piroclástica (ignimbrita) presente en el sitio My629 (coordenadas 1171807,926 – 418503,9598). A) muestra el sitio donde aflora el depósito a lo largo del cauce del río La Muerte (cuenca media). B) muestra un acercamiento a las características físicas del depósito, el contenido de pómez y el grado de endurecimiento.



Figura 3.32 Corriente de densidad piroclástica (ignimbrita) presente en el sitio My380 (coordenadas 1175187,12 – 417658,67). A) Talud de roca que expone el mismo flujo de pómez del sitio M411, cerca del camino, 1 km al sur de la ruta N°4 Monterrey – Guatuso. B) muestra un acercamiento a las características físicas del depósito, el contenido de pómez y el grado de endurecimien (matriz de toba y pómez alteradas).

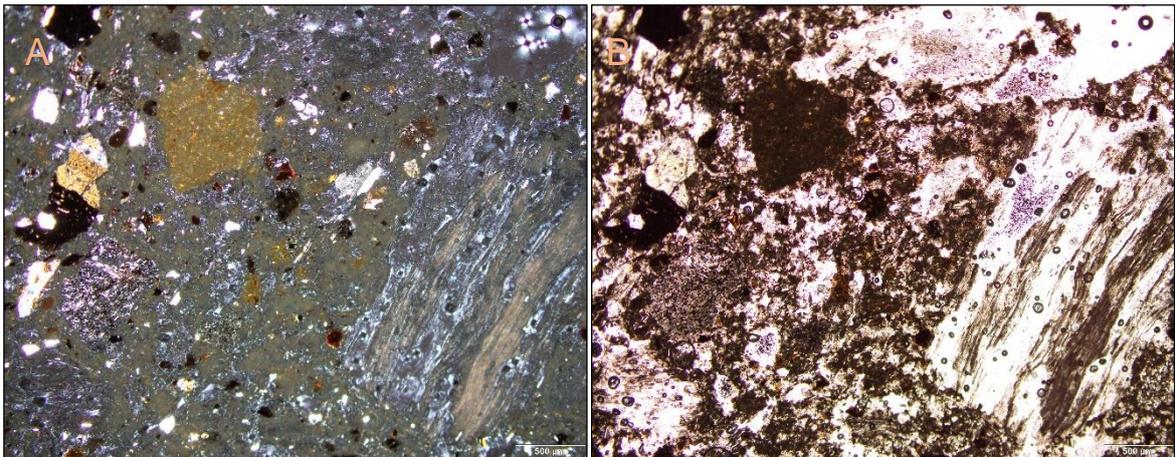


Figura 3.33 Microfotografías de una ignimbrita en el sitio My417 (coordenadas 1164579,84 – 418389,10). A) [NC4x] imagen en luz polarizada que muestra la textura y contenido piroclástico (feldespato, clinopiroxeno, líticos y pómez). B) [NP4x] misma imagen a nícoles paralelos. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

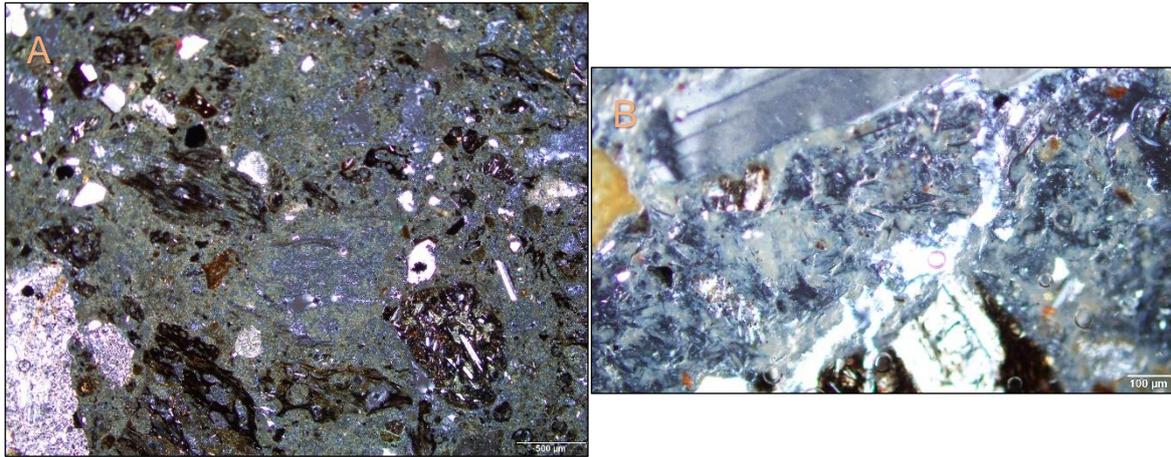


Figura 3.34 Microfotografías de una ignimbrita en los sitios My229 (coordenadas 1164624,97 – 418855,16) y My476 (coordenadas 1164641,893 – 418434,781). A) [NC4x] imagen en luz polarizada que muestra la textura y contenido piroclástico (feldespato, clinopiroxeno, líticos y pómez) y contenido vítreo en la matriz (sitio My229, coordenadas 1164624,97 – 418855,16). B) [NP10x] imagen a nícoles paralelos que muestra la naturaleza vítrea de la matriz (esquirlas y espículas de vidrio volcánico). NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

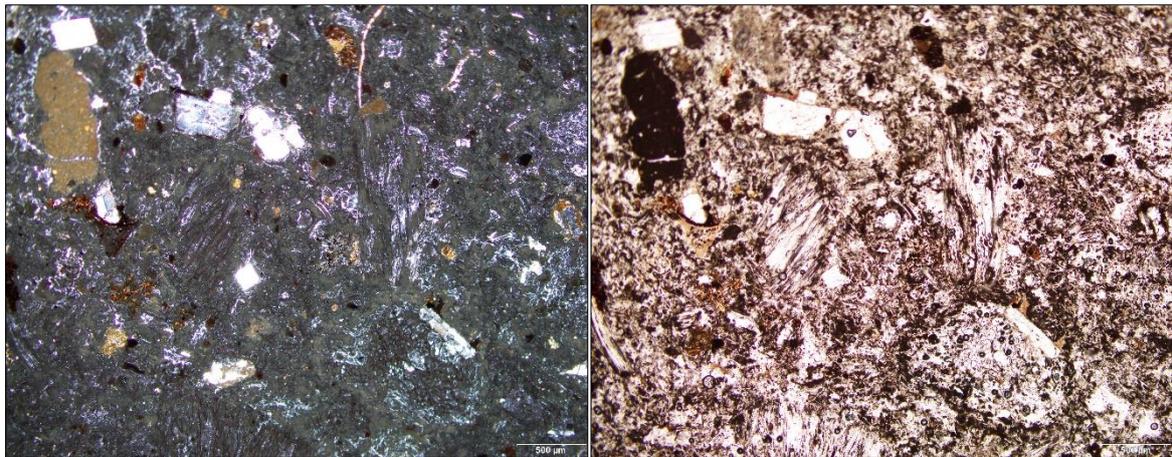
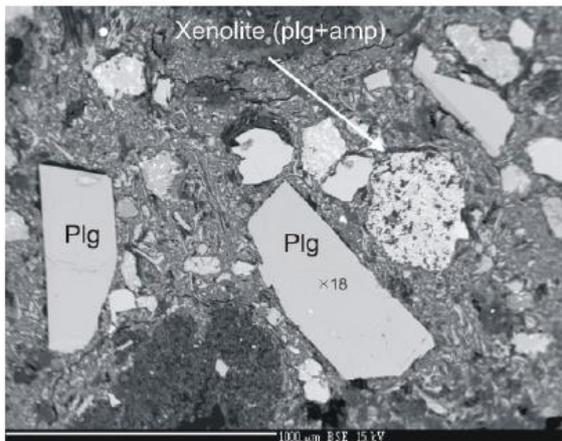
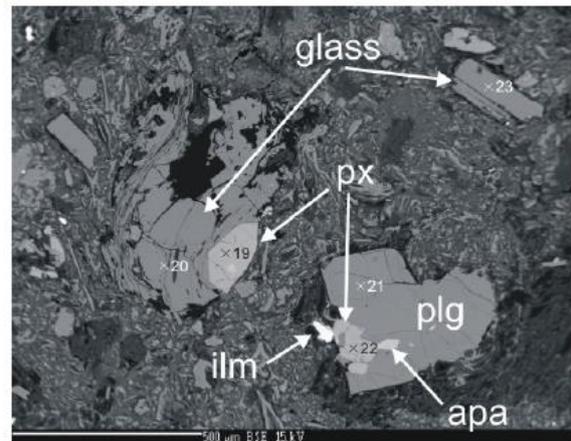


Figura 3.35 Microfotografías de una ignimbrita del sitio My380 (coordenadas 1175187,12 – 417658,67). A) [NC4x] imagen en luz polarizada que muestra la textura y contenido piroclástico (feldespato, clinopiroxeno, líticos y pómez) y contenido vítreo en la matriz. B) [NP4x] misma imagen a nícoles paralelos que muestra el contenido piroclástico. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.

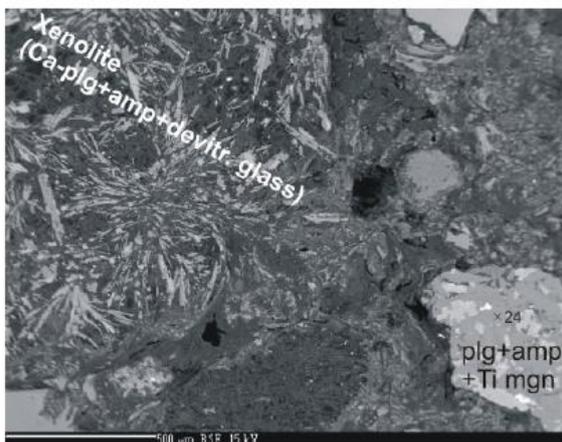
M476 f1



M476 f2



M476 f3



M476 f4

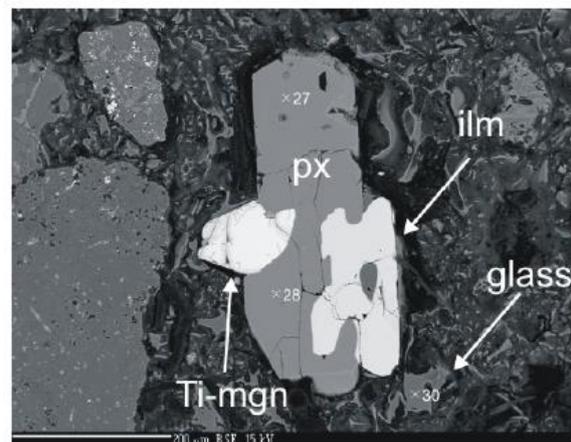


Figura 3.36 Determinación mineralógica mediante el método de microsonda en una muestra de ignimbrita (My476, coordenadas 1164641,893 – 418434,781), indica algunos de los principales minerales presentes.

3.5 Pleistoceno Inferior

3.5.1 Formación Monteverde (α - β Qmv)

Aflora en la mayor parte de la hoja Monterrey. El área expuesta se calcula aproximadamente en 391 km², lo cual representa un 77,5% del total del área de la hoja. El desarrollo de laterita es predominante en esta formación, lo cual se calcula cubre un área aproximada de 147,5 km², equivalente a un 37,7% del área estimada para esta formación. Aflora en la mayor parte del sector norte y noreste de la hoja y más restringida en el sector suroeste de la hoja. Localidades típicas donde se puede observar como producto de meteorización de lavas son en la ruta 5 hacia de Muelle de San Carlos después del río Peñas Blancas y en la ruta 35 entre Muelle y Kopper en la Hoja Aguas Zarcas (My645 y My667), después del kilómetro 50 en la ruta 35 (My652, Hoja San Jorge) de la carretera que conduce hacia Los Chiles (Santa Rosa, Hoja Monterrey), en los sitios My132 en la localidad de San Andrés (Hoja Monterrey) y My160 cerca de la localidad de Buenos Aires (Hojas Monterrey). El sitio My379 (cerca de la ruta 142 que conduce del El Tanque al río Arenal), es una localidad típica de este vulcanismo calco-alcanlino de lava andesítica. Depósitos volcanoclásticos asociados a esta formación están presentes solo en el extremo suroeste de la hoja, restringido a los cauces de las quebradas Catarata, Pavas y Flor, y afluentes menores del río Arenal.

Constituye el vulcanismo que aflora en la mayor parte del área de la hoja Monterrey. Un análisis y la revisión sobre la definición y origen de esta formación determinó que está constituida principalmente por coladas de lava de andesitas hasta basaltos, en el área de la Hoja Monterrey muy alteradas, que forman suelos residuales laterizados de color café pardo a rojizo, con remanentes de bloques aislados de lava en algunos casos con meteorización esferoidal (Figuras 3.37 y 3.38). Los clastos o bloques remanentes en los perfiles de suelo residual son de composición andesítica de textura afanítica y afanítica porfirítica.

La petrografía microscópica de una muestra recolectada en el sitio My379 (Figuras 3.39 y 3.40), en una cantera activa fuera de la hoja en el cinturón de empate, indica la presencia de una lava andesítica de textura hipocristalina porfirítica seriada. La matriz (42%) está compuesta por vidrio volcánico (\approx 20%), microlitos de plagioclasa xenomorfica, biotita? secundaria, opacos (magnetita) y clinopiroxeno. Los fenocristales y microfenocristales de plagioclasa en textura seriada, hipidiomórfica, con maclas bien definidas y zonación, algunas corroídas y con inclusiones de máficos (35%); clinopiroxeno (augita 10%); hipersteno (5%); opacos (8%). Intercrecimiento en cumulitos de plagioclasa y piroxeno. La alteración es a clorita en la matriz intersticial y en vetillas muy finas, alterando máficos en la matriz, biotita secundaria?.

Se ha incluido en esta formación el vulcanismo volcanoclástico del Pleistoceno, el cual incluye tobas y brechas volcano-sedimentarias subordinadas.

Se reconocen depósitos de tobas como en el sitio My431 (quebrada Catarata), una toba muy litificada color gris, que aflora en forma muy restringida en la cuenca de la quebrada Catarata, es posible que este depósito no tenga mucha extensión, además de estar cubierto por vegetación y suelos residuales (Figura 3.41); tobas de lapilli como en el sitio My202 constituida principalmente por material piroclástico (Figura 3.42).

Se reconocieron también brechas volcano – sedimentarias con restos de madera petrificada y materia vegetal carbonizada, que afloran en la quebrada Catarata y la cuenca alta del río Pataste, donde existen bloques a lo largo del cauce que han sido arrastrados por la corriente de los ríos. No se les ha observado directamente aflorando pero por relación estratigráfica se asume sobreyacen la Unidad de ignimbrita. Corresponde con brechas volcánicas polimícticas con restos de madera petrificada y carbonizada producto del vulcanismo. La matriz es generalmente tobácea y limo arenosa endurecida color grisácea a verdosa. Posiblemente parte de estos depósitos son cubiertos por suelo y vegetación (Figuras 3.43 y 3.44). Por relación estratigráfica sobreyace la toba del sitio My431.

El espesor con base en los datos del pozo Pataste y su extensión superficial se estima en 150 metros.

La edad del vulcanismo establecida para esta formación es Pleistoceno Inferior.



Figura 3.37 Depósitos de la Formación Monteverde. A) sitio My132 (coordenadas 1168528,80 – 437569,17), que muestra suelo residual y remanente de un bloque de lava con meteorización esferoidal. B) sitio My133 (coordenadas 1170116,29 – 436748,37), mostrando el remanente de un bloque de lava sano de andesita y formación de suelo residual.

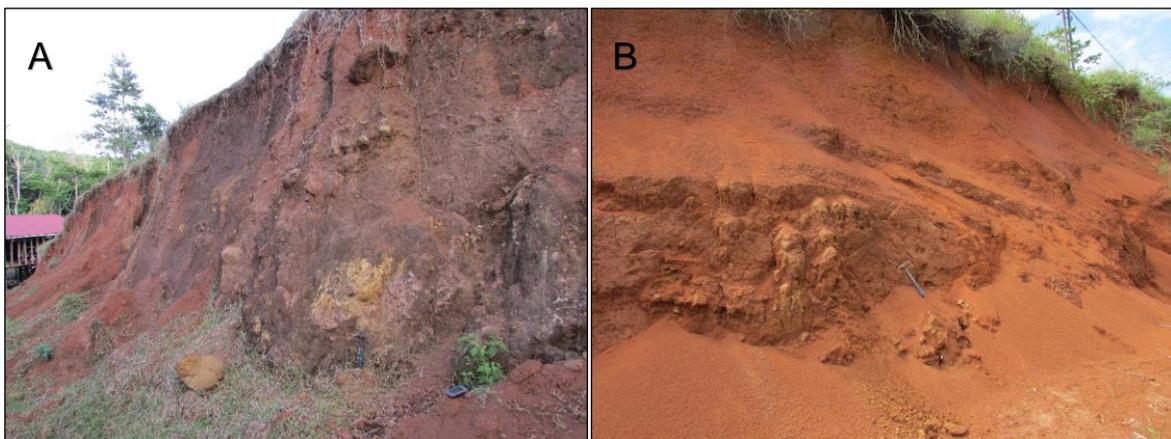


Figura 3.38 Depósitos de la Formación Monteverde. A) sitio My160 (coordenadas 1168221,93 – 443578,99), mostrando la formación de suelo residual producto de la alteración de una lava con remanentes de bloques y clastos con meteorización esferoidal. B) sitio My651 (coordenadas 1176916,978 – 441859,0152), mostrando la formación de suelo residual producto de alteración de una lava, se observan remanentes de clastos de lava muy alterados con meteorización esferoidal y formación de laterita.



Figura 3.39 Depósitos de la Formación Monteverde en el sitio My379 (coordenadas 1160258,89 – 434952,69). A) muestra el sitio que se utiliza como cantera para extraer material de agregados (área del cinturón de empuje de la hoja). B) muestra un acercamiento a las características físicas y alteración del depósito de lava (notar el grado de fracturamiento relacionado a colada brechosa).

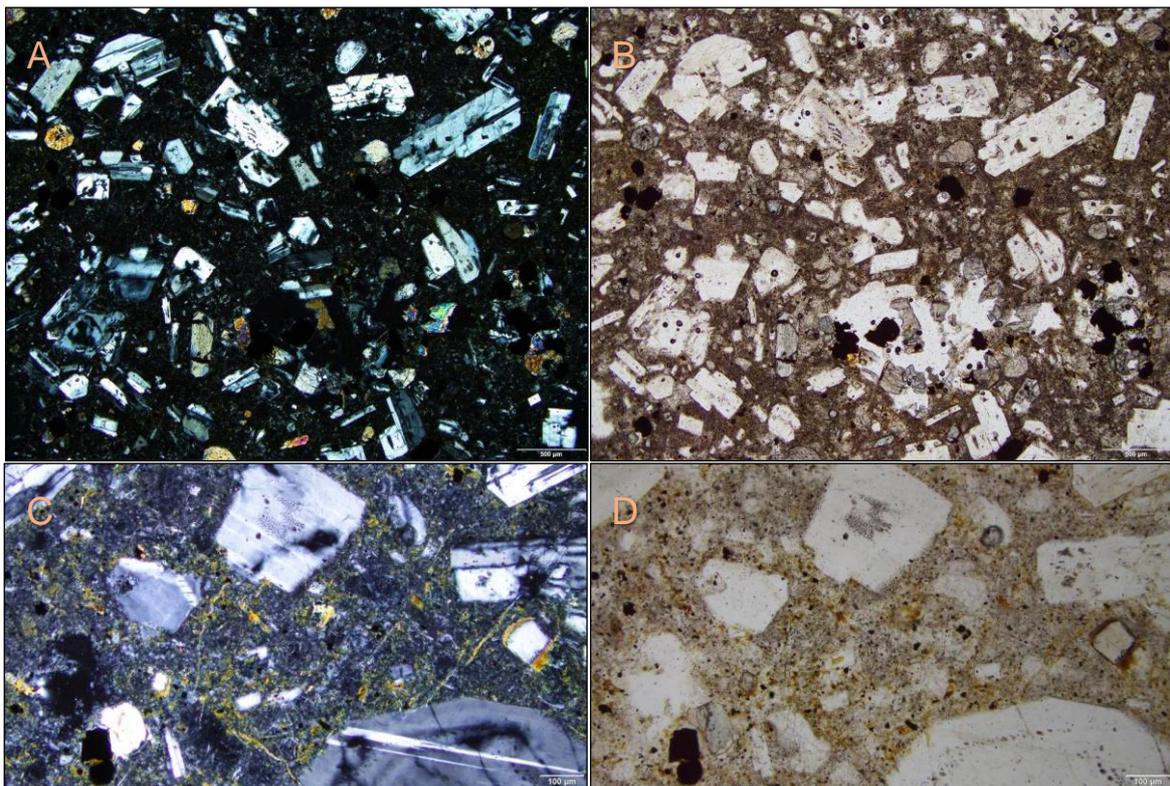


Figura 3.40 Microfotografía de una andesita de la Formación Monteverde en el sitio My379 (Figura 3.37). A) imagen en luz polarizada [NC4x] que muestra la textura hipocristalina porfírica seriada de plagioclasa, clinopiroxeno e hipersteno. B) [NP4x] misma imagen a nícoles paralelos mostrando la matriz parcialmente vítrea. C) imagen en luz polarizada [NC10x] que muestra la alteración a clorita en la matriz y zonación de plagioclasa. D) misma imagen a nícoles paralelos. NC: nícoles cruzados; NP: nícoles paralelos.



Figura 3.41 Depósitos piroclásticos de la Formación Monteverde. A – Afloramiento de toba gris muy litificada en un sitio a lo largo de la quebrada Catarata (sitio My431, coordenadas 1164089,40 – 418110,24). B – Mismo sitio My431 que muestra un acercamiento a las características físicas y muy litificada de esta toba en el talud de la margen izquierda de río.



Figura 3.42 Depósitos piroclásticos de la Formación Monteverde. A) Toba de lapilli color café en el talud del cauce de la margen izquierda de la quebrada Flor (sitio My202, coordenadas 1164089,40 – 418110,24). B) Tobas color crema litificadas, con presencia de discontinuidades (diaclasas) y estratificación (sitio My203), margen derecha del cauce de la quebrada Flor.

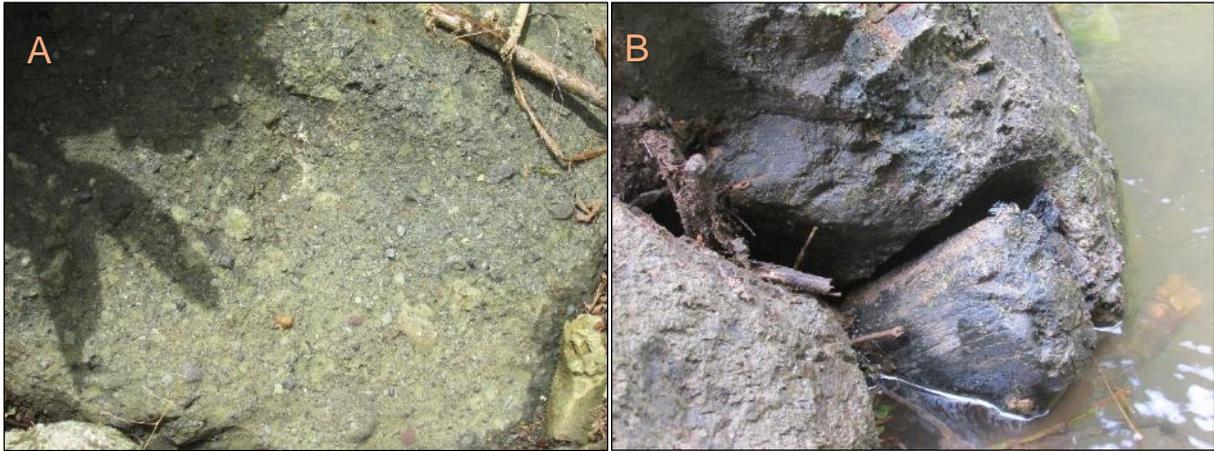


Figura 3.43 Depósitos volcánicos sedimentarios de la Formación Monteverde. A – Brecha volcánica polimíctica a lo largo de la quebrada Catarata (sitio My432, coordenadas 1164061,57 – 418274,25). B – Mismo sitio My432 mostrando la presencia de restos de madera petrificada.



Figura 3.44 Depósitos volcánicos sedimentarios de la Formación Monteverde. A) Brecha volcano sedimentaria presente en la cuenca alta del río Pataste (sitio My335, coordenadas 1167292,67 – 426571,35). B) Mismo sitio My335 mostrando restos de madera carbonizada producto de la actividad volcánica.

3.5.2 *Formación Buena Vista (lhQpt)*

Están distribuidos localmente en el sector sur, central y noreste de la hoja, principalmente en los cauces de los ríos y quebradas. El área expuesta se calcula aproximadamente en 30,5 km², lo cual representa un 6% del total del área de la hoja. Aflora en la mayor parte de la cuenca del río Arenal de la Hoja Monterrey; cuencas alta y media de los ríos Pataste, Jicarito y Purgatorio; cuenca media de los ríos Pocosol y Chambacú y en la quebrada Estero al este de la hoja.

Corresponde con flujos de lahar que en ciertos sectores forman brechas volcánicas muy endurecidas, con clastos volcánicos ígneos de composición andesítica y basáltica, desde redondeados hasta subangulosos, con tamaños variables desde pocos centímetros hasta bloques de tamaño métrico, generalmente flotantes en la matriz. La matriz está constituida por sedimentos limo arenosos muy endurecidos, de composición volcánica (líticos, cristales y ceniza) (Figuras 3.45, 3.46, 3.47 y 3.48). También se asocian con estos lahares sedimentos epivolcánicos pseudoestratificados, producto de debris flows, constituidos por sedimentos que varían de granulometría desde tamaño limo hasta arena gruesa generalmente menos consolidados que la matriz de las brechas (Figuras 3.49, 3.50 y 3.51). Corresponden con varios o múltiples flujos de lahar producto de la actividad volcánica.

En el sitio My356 (cuenca alta del río Jicarito), se observa en contacto discordante con los sedimentos del Plioceno (sedimentación de colmatación de cuenca), con excepción de este sitio, el contacto inferior no se observa en otros sitios del área, pero es posible que esté en contacto discordante con la Formación Monteverde y la Formación Venado. Asumiendo la exposición a lo largo del cauce del río Arenal, su espesor puede superar los 100 m.

La edad del vulcanismo establecida para esta formación es Pleistoceno Inferior.



Figura 3.45 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista en el sitio My158 (coordenadas 1168713,31 – 441626,14). A) Brecha volcánica muy consolidada a lo largo de la cuenca alta de la quebrada Estero. B) Mismo sitio que muestra un acercamiento a las características físicas de la roca y la matriz.



Figura 3.46 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista en el sitio My603 (coordenadas 1168039,954 – 430118,98). A) Brecha volcánica muy endurecida a lo largo de la cuenca alta del río Purgatorio. B) Mismo sitio que muestra un acercamiento a las características físicas de la matriz y endurecimiento de la roca.



Figura 3.47 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista en el sitio My457 (coordenadas 1161728,78 – 422444,63). A) Brecha volcánica muy endurecida a lo largo de la cuenca alta del río Arenal. B) Mismo sitio que muestra un acercamiento a las características físicas de la matriz y endurecimiento de la roca.



Figura 3.48 Depósitos volcanoclásticos de la Formación Buena Vista en el sitio My565 (coordenadas 1162719,967 – 431049,0389). A) Brecha volcánica muy endurecida a lo largo de la cuenca media del río Arenal. B) Mismo sitio que muestra un acercamiento a las características físicas de la matriz y endurecimiento de la roca.



Figura 3.49 Sedimentos epivolcánicos de la Formación Buena Vista en el sitio My164 (coordenadas 1172217,30 – 432073,92). A) Sedimentos pseudoestratificados producto de un debris flow o lahar, a lo largo del cauce de la cuenca media del río Purgatorio. B) Mismo sitio que muestra un acercamiento a las características físicas de los sedimentos limo arenoso y tobáceo del depósito.



Figura 3.50 Sedimentos epivolcánicos de la Formación Buena Vista en el sitio My213 (coordenadas 1173493,69 – 424719,11). A) Contacto entre brecha volcánica y sedimentos epivolcánicos (limo arcillosos), a lo largo del cauce de la cuenca media del río Pataste. B) Mismo sitio que muestra la presencia de sedimentos epivolcánicos finos consolidados producto de un debris flow.



Figura 3.51 Sedimentos epivolcánicos de la Formación Buena Vista en el sitio My607 (coordenadas 1172854,923 – 420108,0567). A) Brecha volcánica en la base y sedimentos epivolcánicos que la sobreyace, aflora a lo largo del cauce de la cuenca media – baja del río La Muerte. B) Mismo sitio que muestra un acercamiento a las características físicas de los sedimentos.

3.6 Holoceno

3.6.1 Unidad de tobas, tobas de lapilli y lapillitas del volcán Arenal (*tQho*)

Afloran en el extremo suroeste de la hoja. El área expuesta se calcula aproximadamente en 22,4 km², lo cual representa un 4,4% del total del área de la hoja. Afloran principalmente a lo largo del camino que conduce de Monterrey hacia Santa Eulalia, Palma y Cerro Indio.

Corresponde con tefras de la actividad histórica del volcán Arenal. El espesor de las tefras varía entre los 50 cm hasta los 3 m, en los cuales se pueden intercalar hasta siete horizontes o capas de toba, toba de lapilli y lapilli fino hasta grueso (lapillitas), con espesores de 5 cm hasta 70 cm. El lapilli está constituido por líticos lávicos masivos angulosos y vesiculares de composición andesítica, afíricos y porfiríticos con escasa escoria volcánica (Figuras 3.52 y 3.53).

Sobreyacen los depósitos volcánicos de las formaciones Buena Vista y Monteverde. Los espesores varían entre los 50 cm hasta los 3 m.

Estos depósitos corresponden con la actividad histórica del volcán Arenal. Soto & Sjöbohm (2005) presentan un cuadro cronológico de las erupciones históricas del volcán Arenal desde año 5060 antes de la era común. De especial importancia es la erupción AR-17 ocurrida en el año 750 de la era común (hace 1265 años), con una distribución anómala hacia el norte del volcán Arenal abarcando una parte de la Hoja Monterrey.



Figura 3.52 Unidad de tobas, tobas de lapilli y lapillitas del volcán Arenal en el sitio My238 (coordenadas 1162412,96 – 423405,16). A) Perfil de tefras en el talud a lo largo del camino que conduce de Monterrey hacia Palma, antes del río Arenal. Muestra la alternancia de toba, toba de lapilli y lapillita. B) Un acercamiento al horizonte de lapillita.



Figura 3.53 Unidad de tobas, tobas de lapilli y lapillitas del volcán Arenal. A) Perfil de tefras en el talud a lo largo del camino que conduce de Monterrey hacia Palma, antes del río Arenal (sitio My240, coordenadas 1163374,60 – 423797,08). Muestra la alternancia de toba, toba de lapilli y lapillita. B) Acercamiento a los depósitos de lapillita constituido por lapilli fino hasta grueso (sitio My243, coordenadas 1164399,95 – 425352,84).

3.6.2 Terrazas aluviales Nivel 1 (alQho)

Corresponden con depósitos antiguos de abanico aluvial o paleoaluviones en una posición estructural superior. Generalmente están cubiertos por depósitos de suelo como producto de erosión de los niveles superiores de la Formación Monteverde. Su delimitación se infiere por un factor estructural de lineamiento y/o falla en el sector sureste de la hoja, que conforma una zona de topografía plana de poca extensión. Existen otros sitios localizados no representados en el mapa, a los cuales se le asocia un levantamiento relativo por ejemplo en la cuenca del río La Muerte. Están constituidos por gravas y bloques que constituye más del 50%, en una matriz arena limosa, limo arenosa o limo arcillosa (Figuras 3.54 y 3.55).

3.6.3 Terrazas aluviales Nivel 2 (alQho)

Corresponde con los depósitos de abanico aluvial más recientes presentes en las zonas del río Arenal en el extremo sureste de la hoja y el río Pataste en el extremo noroeste de la hoja. Están constituidos por gravas, bloques, arenas, limos y arcillas (Figura 3.56).

3.6.4 Depósitos de bloques, gravas, arenas y limos de los volcanes Arenal y Chato (Qhoach)

Corresponden con depósitos de avalancha y sedimentos epivolcánicos inconsolidados de los volcanes Arenal y Chato, erosionados y sedimentados en las partes más bajas. Están constituidos por sedimentos de origen volcánico en su mayoría de composición andesítica (Figura 3.57).

3.6.5 Tefras recientes (tfQho)

Corresponden con tefras recientes asociadas a las últimas erupciones del volcán Arenal, que mantean el área del extremo suroeste de la hoja. Generalmente son horizontes de lapilli y toba de poco espesor <50 cm, que sobreyacen las tefras de las erupciones históricas del volcán Arenal (Figuras 3.58 y 3.59).

3.6.6 Depósitos fluviales (fQho)

Corresponden con los sedimentos más recientes limitados principalmente a los cauces de los ríos Arenal, La Muerte y Pataste donde son más representativos. Están constituidos principalmente por sedimentos epiclásticos (volcánicos y sedimentarios) de variada granulometría desde bloques hasta limos.



Figura 3.54 Terrazas aluviales Nivel 1. A) Nivel de terraza cubierto por suelos lateríticos en el sitio My716 (coordenadas 1161032,013 – 440844,9691. Conforman un nivel superior de topografía plana limitado estructuralmente por un lineamiento. B) Paleoaluviones asociados a la actividad fluvial y los niveles de terraza del nivel 1 (sitio My396, coordenadas 1169584,41 – 418424,67, cuenca del río La Muerte).



Figura 3.55 Terrazas aluviales Nivel 1 a lo largo del cauce del río La Muerte. A) Paleoaluviones asociados a terrazas del nivel 1 en el sitio My446 (coordenadas 1168775,79 – 418263,50). B) Paleoaluviones asociados a terrazas del nivel 1 en el sitio My460 (coordenadas 1169735,16 – 418382,79).



Figura 3.56 Terrazas aluviales Nivel 2 del sector sureste del área de estudio en el río Arenal. A) Depósitos aluviales cubiertos por suelo en el sitio My711 (coordenadas 1160987,992 – 443748,0353), conforman una topografía plana. B) Depósitos aluviales recientes a lo largo del cauce del río Arenal (sitio My715, coordenadas 1161006,928 – 442528,9941).



Figura 3.57 Depósitos epivolcánicos de los volcanes Arenal y Chato. A) Depósito de avalancha en el sitio My726 (coordenadas 1161025,997 – 424424,0392), a lo largo del cauce de la quebrada Palma. Muestra la depositación caótica y variabilidad granulométrica del depósito. B) Sedimentos epivolcánicos de variada granulometría (ceniza hasta bloques) en el sitio My409 (coordenadas 1159517,29 – 424681,49), cerca de la cuenca de la quebrada Guillermina en un tajo de la zona.



Figura 3.58 Tefras recientes del volcán Arenal. A) Depósitos de lapilli y toba que sobreyacen los depósitos piroclásticos de la actividad histórica del volcán Arenal (sitio My250, coordenadas 1163565,22 – 418668,87). B) Acercamiento a los horizontes de lapilli más recientes.



Figura 3.59 Tefras recientes del volcán Arenal. A) Depósitos de lapilli y toba que sobreyacen los depósitos piroclásticos de la actividad histórica del volcán Arenal (sitio My729, coordenadas 1159121,931 – 417086,9987). B) Acercamiento a los depósitos de lapilli más recientes.

4. PETROLOGÍA ÍGNEA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA

4.1 Introducción

Para la caracterización geoquímica se analizaron 26 muestras, 14 son rocas ígneas y 12 rocas volcánicas (6 ignimbritas y 6 tobas). Las muestras fueron recolectadas durante la campaña de campo entre 2015 – 2018 y se analizaron en el Bureau Veritas Mineral Laboratories de Canadá.

Los análisis fueron procesados en el programa GCDkit (Janoušek et al. 2006 & Janoušek et al., 2016). La información general de las muestras analizadas con la ubicación en coordenadas y detalles se muestra en la Tabla 4.1. Los análisis geoquímicos se presentan en varios diagramas con estándares: TAS (según Le Bas et al. 1986 y Cox et al. 1979); AFM (Irvine y Baragar, 1971); SiO₂ vs. K₂O (Peccerillo y Taylor, 1976); A/CNK vs. A/NK (Shand, 1943); diagramas de variación de óxidos mayores y elementos traza; elementos traza normalizados por NMORB (Sun y McDonough, 1989) y tierras raras normalizado a condritos (Boynnton, 1984); el diagrama normalizado al manto primitivo (McDonough y Sun, 1995) y los diagramas de elementos incompatibles (Winchester y Floyd, 1977).

4.2 Lavas del Grupo Aguacate (β Nag , $\alpha\beta$ Nag , ζ , β)

Geoquímicamente es un vulcanismo relativamente diferenciado desde dacitas hasta basaltos asociado a la Formación Grifo Alto (48,23 – 66,33% SiO₂, Figura 4.1A). Se pueden distinguir cuatro facies magmáticas en un área relativamente restringida de unos 70 km².

Dacitas (sitios My212, My262, My265 y My274, Figuras 3.14 y 4.1A): tienen una tendencia a la serie calco-alcalina y toleítica según el diagrama AFM (Figura 4.1B), en tanto en el diagrama SiO₂ vs. K₂O caen dentro de la serie calcoalcalina altas en potasio (Figura 4.1C). Los elementos traza normalizados a NMORB muestran anomalías negativas de Rb, Nb, Pr, Zr y Ti (Figura 4.2A), en tanto la normalización a condritos de tierras raras la curva es relativamente plana y la anomalía de europio no es significativa (Figura 4.2B).

Andesitas basálticas (sitios My251, My444, My461 y My467, Figuras 3.15 y 4.1A): tienen una clara tendencia a la serie toleítica según el diagrama AFM (Figura 4.1B), en tanto en el diagrama SiO₂ vs. K₂O caen dentro de la serie calcoalcalina pobres en potasio (My251, My467) y altas en potasio (My444, My461) (Figura 4.1C). Los elementos traza normalizados a NMORB muestran similar anomalías negativas de Rb, Nb, Pr, Zr y Ti (Figura 4.2A), en tanto la normalización a condritos de tierras raras la curva es relativamente plana y la anomalía de europio no es significativa (Figura 4.2B).

Basaltos (sitios My291, My293, My321, Figuras 3.16 y 4.1A): con una tendencia a la serie toleítica y calco-alcalina (My321) según el diagrama AFM (Figura 4.1B), en tanto en el diagrama SiO₂ vs. K₂O caen dentro de la serie calcoalcalina pobres en potasio (My291, My293) y altas en potasio (My321,

My374) (Figura 4.1C). Los elementos traza normalizados a NMORB muestran similar anomalías negativas de Rb, Nb, Pr, Zr y Ti (Figura 4.2A), en tanto la normalización a condritos de tierras raras la curva es relativamente plana y la anomalía de europio no es significativa (Figura 4.2B).

Traquiandesitas basálticas (sitios My345, My452, Figuras 3.17 y 4.1A): en el límite Subalcalino/Toleítico – Alcalino (TAS) y de clara tendencia calco-alcalina según el diagrama AFM (Figura 4.1B), en el diagrama SiO₂ vs. K₂O caen dentro de la serie calcoalcalina alta en potasio (My345) y My452 (shoshonita) (Figura 4.1C). Los elementos traza normalizados a NMORB muestran similar anomalías negativas de Rb, Nb, Pr, Zr y Ti (Figura 4.2A), en tanto la normalización a condritos de tierras raras la curva es relativamente plana y la anomalía de europio no es significativa (Figura 4.2B). Este vulcanismo aflora a lo largo de una quebrada afluyente del río Arenal, como un cuerpo de lava con intensidad de alteración relativamente avanzada, principalmente a mineral arcilloso y óxidos de hierro. La muestra My452 está en el límite de afinidad alcalina y clasifica como shoshonita (potásica).

Según el diagrama A/CNK vs. A/NK todas son metalumínicas (Figura 4.1D).

La Figura 4.3 muestra la variación de óxidos mayores y la Figura 4.4 la variación de oligoelementos de las muestras analizadas. En ambos diagramas se puede observar la diferenciación de los cuatro grupos geoquímicos.

Se muestran además como información los diagramas de variación de multi-elementos normalizado al manto primitivo (Figura 4.5) y de elementos incompatibles (Figura 4.6).

Los basaltos de la serie B calcoalcalina y serie C alto en potasio son de alta alúmina y varían en relación con los magmas más evolucionados (andesitas, dacitas y riolitas) (McBirney, 2007).

La variación entre calcoalcalino y toleítico se relaciona con la concentración de hierro y alúmina. Los miembros finales máficos y félsicos son basaltos y riolitas que difieren muy poco entre las dos series, sin embargo magmas toleíticos intermedios son más ricos en hierro, en tanto rocas calcoalcalinas tienden a tener más alúmina (Al₂O₃), y por tanto, más plagioclasa. Algunas rocas tienen mayor alúmina que puede ser incorporada en el feldespatos. En la norma, este resultado en corindón, y en rocas plutónicas, el exceso de alúmina normalmente entra en muscovita. Estas rocas son llamadas peralumínicas (McBirney, 2007).

4.3 Ignimbritas (igNQpt)

Geoquímicamente las muestras se clasifican según el diagrama TAS (Le Bas et al., 1986), de composición dacítica (My380, My417, My418 y My476) y andesítica (My629 y My411) y por tanto de composición intermedia – ácida (Figura 4.7A). El diagrama TAS (Cox et al., 1979) las ubica en el campo andesítico. El contenido de sílice (SiO_2) varía entre 56,62 – 60,01%.

La tendencia son a la serie calcoalcalina con excepción de la muestra My629 (toleítica) según el diagrama AFM (Figura 4.7B). El diagrama SiO_2 vs. K_2O las ubica dentro de la serie calcoalcalina pobres en potasio con excepción de la muestra My411 (toleítica) (Figura 4.7C). A diferencia de las rocas ígneas son peraluminicas (Figura 4.7D).

La variación de óxidos mayores y oligoelemento para el caso de las ignimbritas se muestra en las Figuras 4.8 y 4.9. Las variaciones en las concentraciones de estos elementos también se manifiestan en los diagramas de clasificación de la Figura 4.7.

Los elementos traza normalizados a NMORB muestran anomalías negativas de Rb, Th, Nb, Pr, P y Ti (Figura 4.10A), la muestra My380 tiene una tendencia a mayor concentración de estos elementos. La normalización a condritos de tierras raras muestra una curva relativamente plana, indicando anomalías negativas de Ce y Eu poco significativas (Figura 4.10B). La muestra My380 muestra una concentración mayor más significativa de estos elementos.

4.4 Unidad de tobas, tobas de lapilli y lapillitas del volcán Arenal (tQho)

Geoquímicamente se clasifican de composición andesítica basáltica (My199, My746 y My758) y andesitas (My238 y My243) según el diagrama TAS (Le Bas et al., 1986, Figura 4.11A). El contenido de sílice (SiO_2) varía entre 55,39 – 56,75%. De tendencia calcoalcalina según el diagrama AFM (Figura 4.11B), en tanto el diagrama SiO_2 vs. K_2O las ubica dentro de la serie toleítica (Figura 4.11C). La muestra My273 es anómala con un contenido de SiO_2 de 39,67%, de tendencia basáltica alcalina toleítica (Figuras 4.11A y B). A nivel de afloramiento asemeja escoria volcánica, de ahí su posible composición basáltica. Puede ser de interés esta anomalía, ya que de igual forma las concentraciones de óxidos mayores, oligoelementos, elementos traza y tierras raras es diferente en relación a las otras muestras, lo cual puede estar relacionado con algún proceso magmático particular durante la erupción.

Las variaciones en óxidos mayores (Figura 4.12) y oligoelementos (Figura 4.13) no muestran fuertes variaciones excepto para MgO y Ce, Mg respectivamente.

Los elementos traza normalizados a NMORB muestran anomalías positivas para algunas muestras de Ba, Pb y Sr así como anomalías negativas de Rb, Nb, Zr y Ti (Figura 4.14A). La normalización a condritos de tierras raras muestra una curva ligeramente convexa, sin anomalía de europio (Figura

4.14B). La muestra My273 muestra de igual forma una variación en las concentraciones de estos elementos.

Punto Documentación	Norte (m)	Este (m)	Localidad	Formación	Litología
My199	1163464,45	421764,44	2,4 km sureste de Santa Eulalia	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal
My212	1166013,30	418639,54	Quebrada Pavas, 2,8 km oeste-noroeste de Santa Eulalia	Grupo Aguacate	Dacita (Tajo)
My238	1162412,96	423405,16	1,5 km noroeste de Plama	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal
My243	1164399,95	425352,84	2,6 km suroeste de Monterrey	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal
My251	1168572,11	417136,19	Quebrada La Mina, 1,4 km norte-noroeste de Venado	Grupo Aguacate	Andesita basáltica
My262	1164735,64	417577,10	Río Nilo, cuenca media, 2,4 km sur de Venado	Grupo Aguacate	Dacita del río Nilo
My265	1164550,72	417752,22	Río Nilo, cuenca media, 2,6 km sur de Venado	Grupo Aguacate	Dacita del río Nilo
My273	1164653,42	420543,78	1,4 km suroeste de Santa Eulalia	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal
My274	1164431,06	417700,38	Río Nilo, cuenca media cerca afluente Q. Catarata, 2,7 km sur de Venado	Grupo Aguacate	Dacita río Nilo
My291	1166001,93	418071,47	Río Nilo, cuenca media, 1,3 km sureste de Venado	Grupo Aguacate	Basalto cerca del río Nilo
My293	1166212,02	418242,49	Río Nilo, cuenca baja, 1,2 km sureste de Venado	Grupo Aguacate	Basalto del río Nilo
My321	1169079,47	423297,49	En Quebrada, 750 m noreste de Pataste Arriba - Monterrey	Grupo Aguacate	Basalto del río Jicarito
My345	1168306,71	422778,31	En Quebrada, Pataste Arriba - Monterrey	Grupo Aguacate	Traquiandesita basáltica del río Jicarito
My374	1166643,69	418491,20	Río Nilo, 1,27 km suroeste de Esperanza, Venado	Grupo Aguacate	Basalto del río Nilo
My380	1175187,12	417658,67	Sobre camino, 700 m este del poblado Cucaracha (San Josecito)	Unidad indiferenciada	Ignimbrita
My411	1164351,20	418394,80	En Quebrada, 3 km sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita
My416	1164560,53	418371,21	En Quebrada, 2,9 km sureste de Venado	Formación Venado	Arenisca gruesa a brechosa calcárea
My417	1164579,84	418389,10	2,85 km sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita
My418	1164628,64	418424,46	2,8 km sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita
My444	1166225,20	427938,91	1 km al norte de Monterrey	Grupo Aguacate	Andesita basáltica del río Purgatorio
My452	1162949,89	422256,38	Quebrada afluente del río Arenal, 2,6 km noroeste de Palma	Grupo Aguacate	Traquiandesita basáltica
My461	1169887,08	418223,26	Río La Muerte, 2,8 km norte-noreste de Venado	Grupo Aguacate	Andesita basáltica del río La Muerte
My467	1167349,80	417345,01	Quebrada El Túnel, 200 m norte-noroeste de Venado	Grupo Aguacate	Andesita basáltica de la Quebrada El Túnel
My476	1164641,89	418434,78	2,7 kilómetros sureste de Venado	Unidad indiferenciada	Ignimbrita
My629	1171807,93	418503,96	Río La Muerte, 4,6 km oeste/suroeste de Jicarito	Unidad indiferenciada	Ignimbrita
My746	1165026,97	423009,96	1,7 km sureste de Santa Eulalia	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal
My758	1164640,01	427656,04	500 metros suroeste de Monterrey	Depósitos Recientes	Lapilitas del volcán Arenal

Tabla 4.1 Resumen de muestras para análisis químicos de la Hoja Monterrey

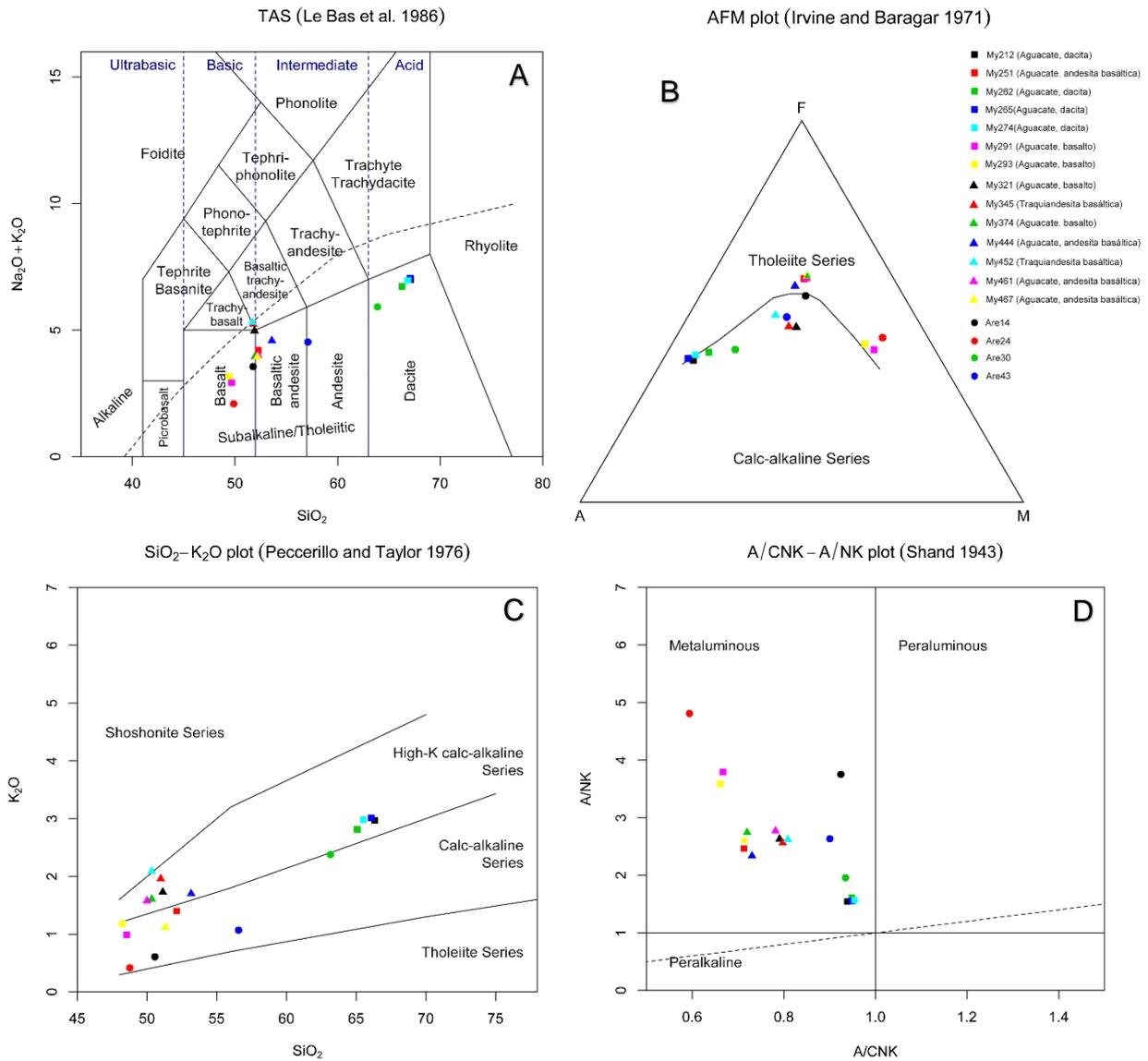


Figura 4.1 A) Diagrama Álcalis Totales / Sílice TAS utilizado para la clasificación geoquímica de los diferentes cuerpos ígneos del área de estudio. B) Diagrama AFM para diferenciar las series toleíticas y calcoalcalinas. C) Diagrama SiO_2 vs. K_2O para discriminar entre las diferentes series. D) Diagrama de alcalinidad – aluminosidad. Simbología según Figura 4.1B.

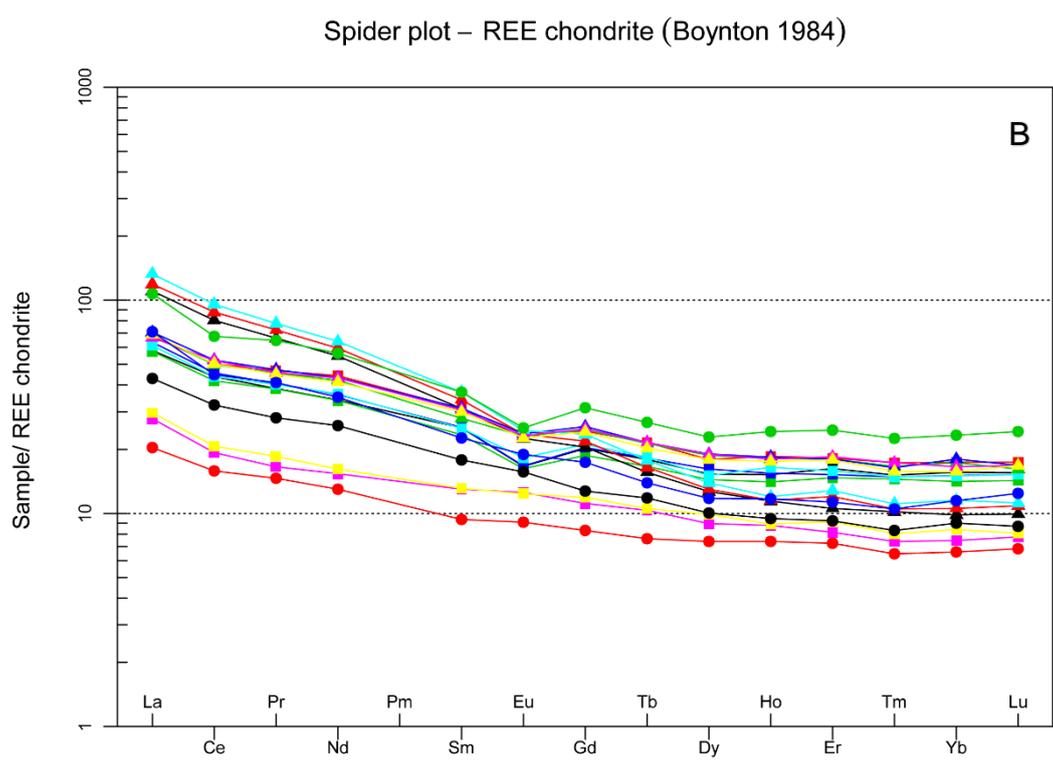
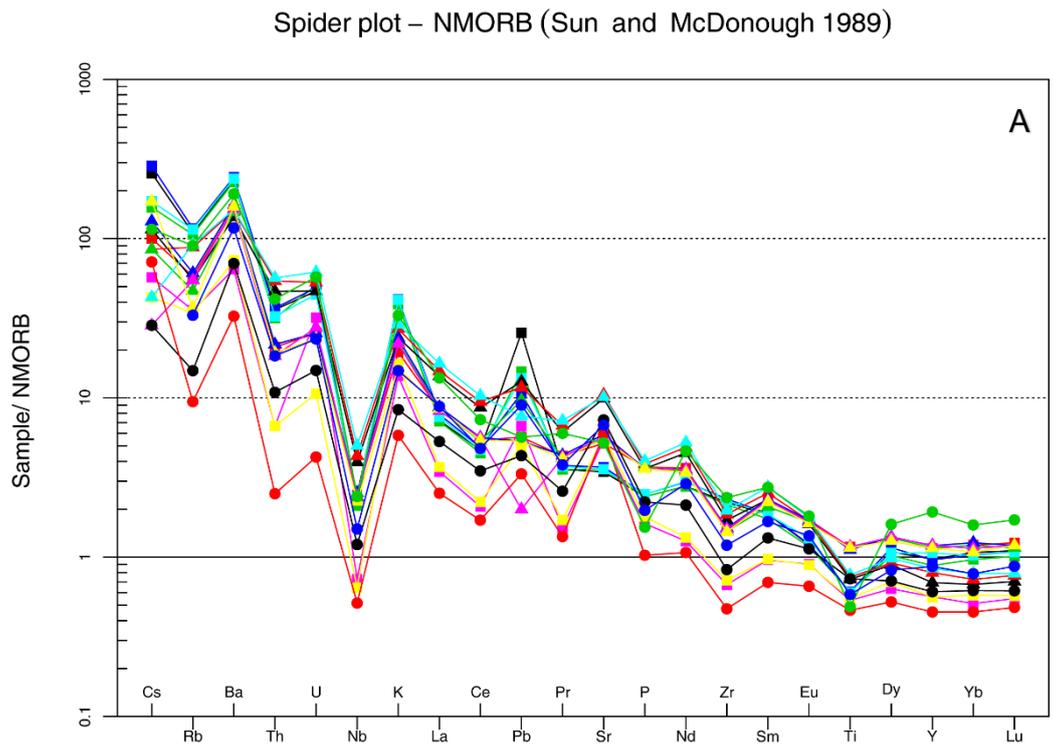


Figura 4.2 A) Diagramas multielementos normalizado a NMORB (Sun & McDonough, 1989) y B) Diagrama spider de los REE normalizados a condritos (Boynton, 1984) de las muestras ígneas del área de estudio. Simbología según Figura 4.1B.

Multiple plot of SiO₂ vs. Al₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅, FeOt

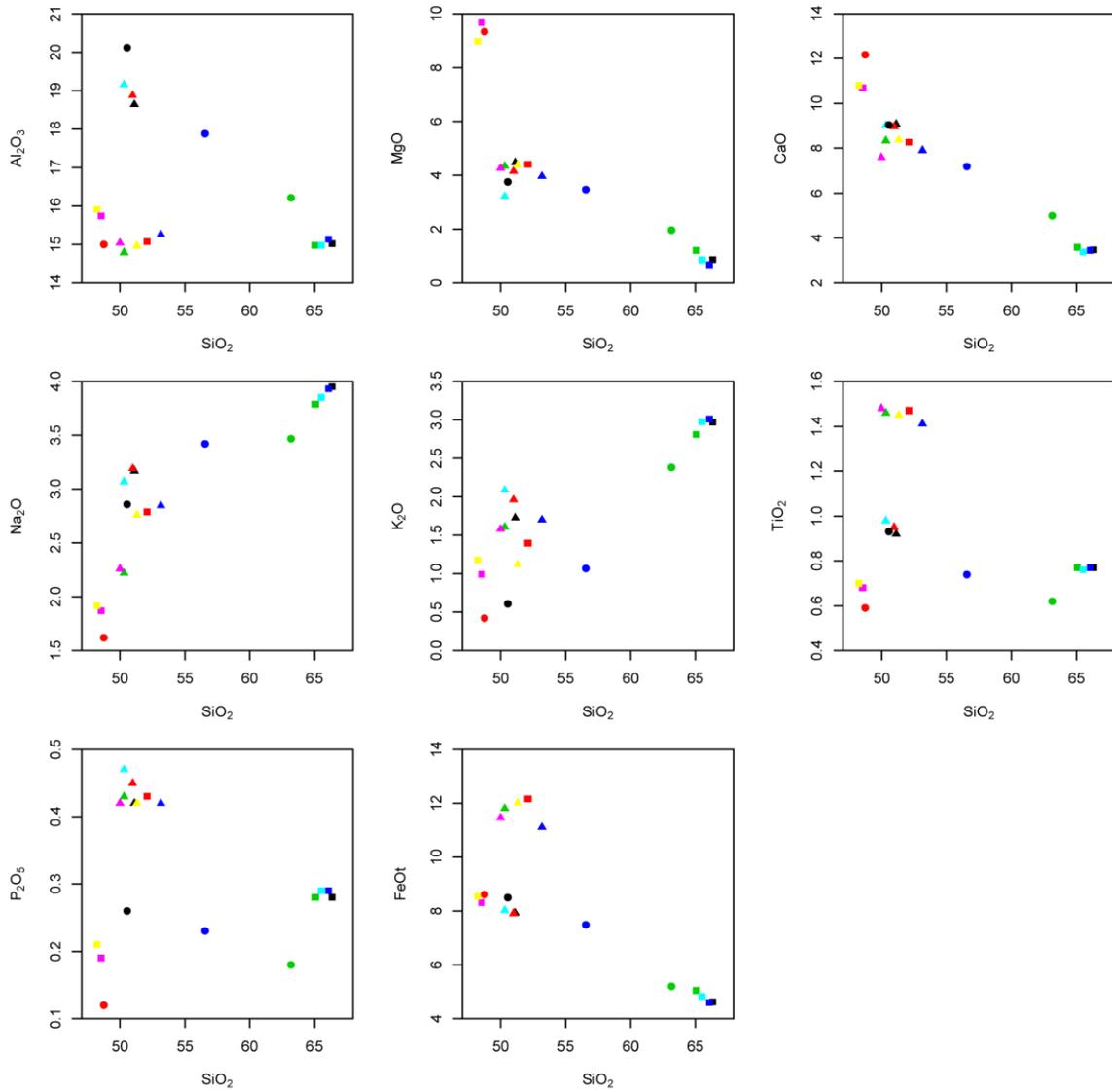


Figura 4.3 Diagramas de variación Harker de óxidos mayores de las muestras ígneas del área de estudio. Simbología según Figura 4.1B.

Multiple plot of SiO₂ vs. Ba, Ni, Rb, Sr, Zr, Y, La, Ce, mg, A/CNK, K₂O/Na₂O

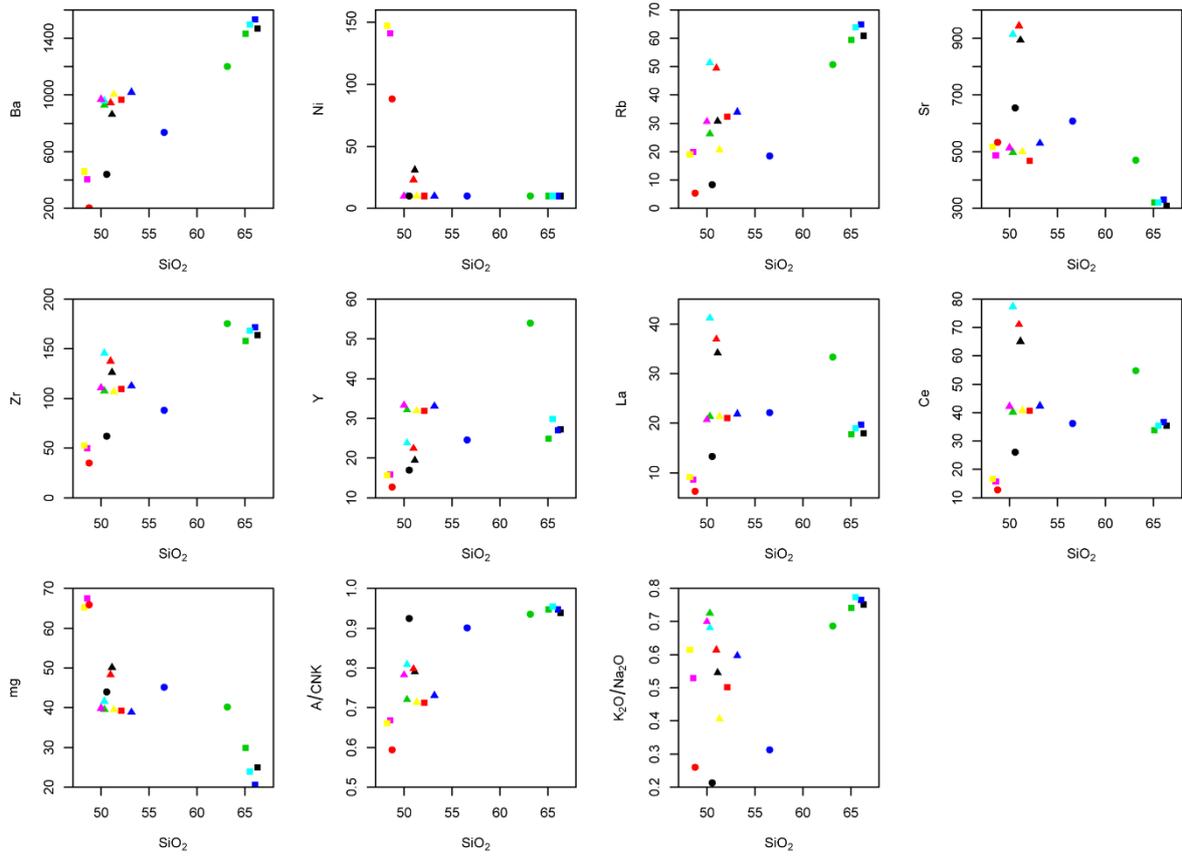


Figura 4.4 Diagramas de variación de elementos traza de las rocas ígneas del área de estudio. Simbología según Figura 4.1B.

Spider plot – Primitive mantle (McDonough and Sun 1995)

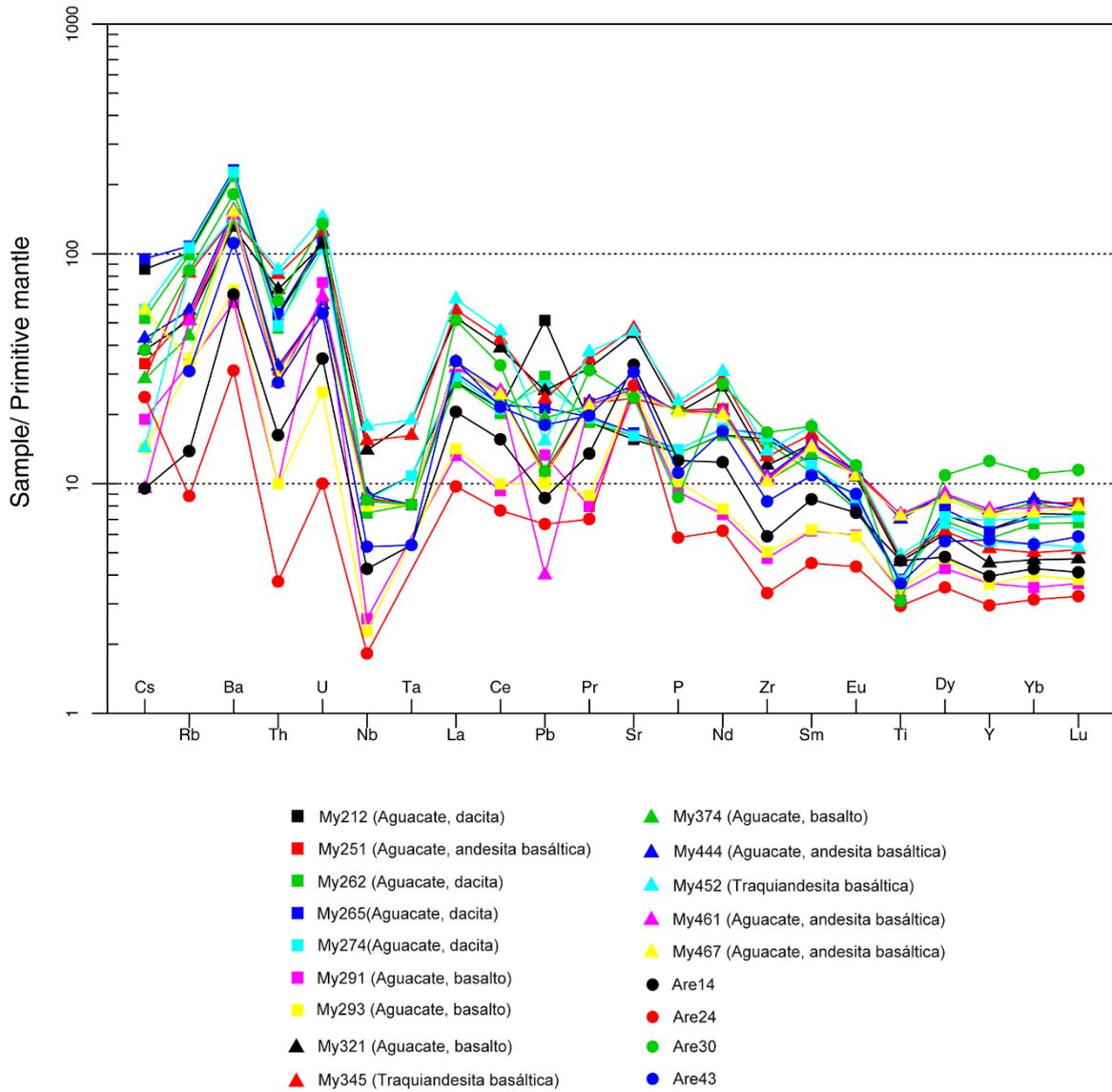


Figura 4.5 A) Diagrama de multielementos normalizado al manto primitivo mostrando reducción en Nb, Ta, Zr y Ti, y mayor concentración de Ba, U y Sr.

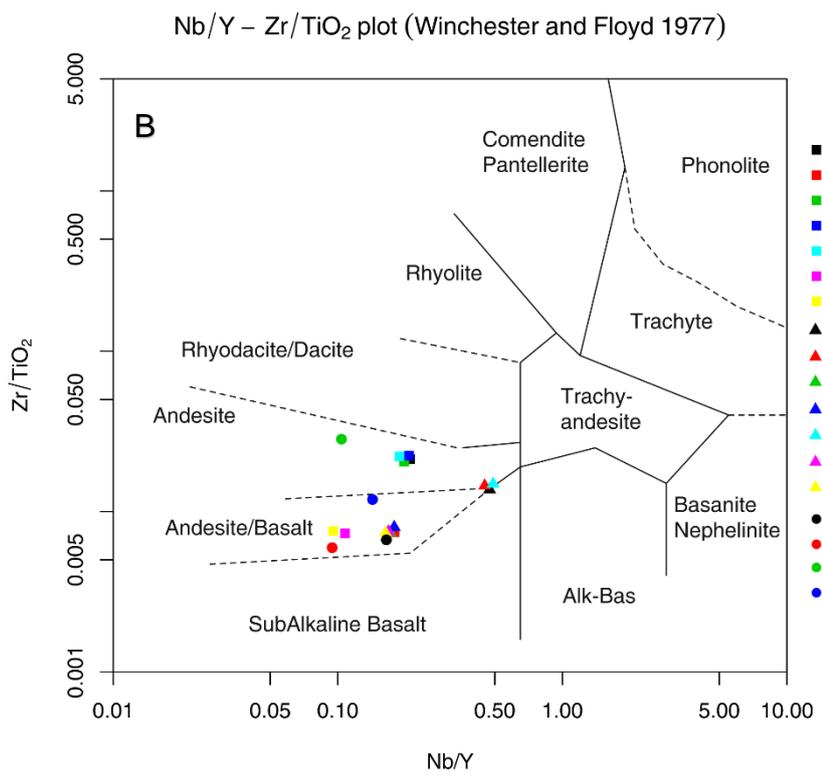
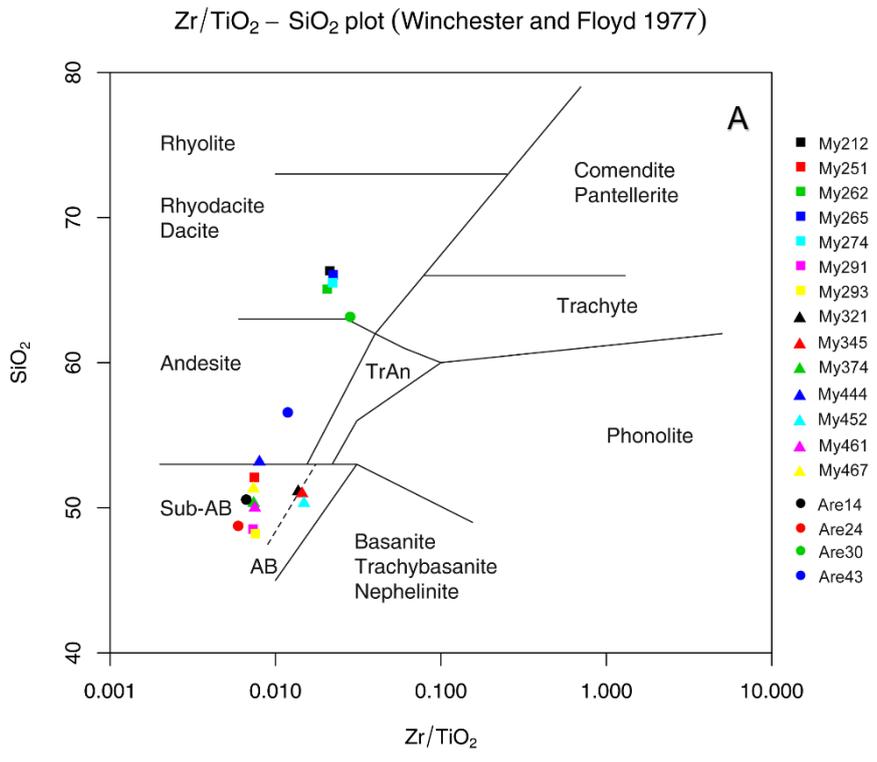


Figura 4.6 A) Estimación de la composición a partir de los elementos incompatibles (Zr/SiO₂, Nb/Y) de las rocas ígneas del área de estudio.

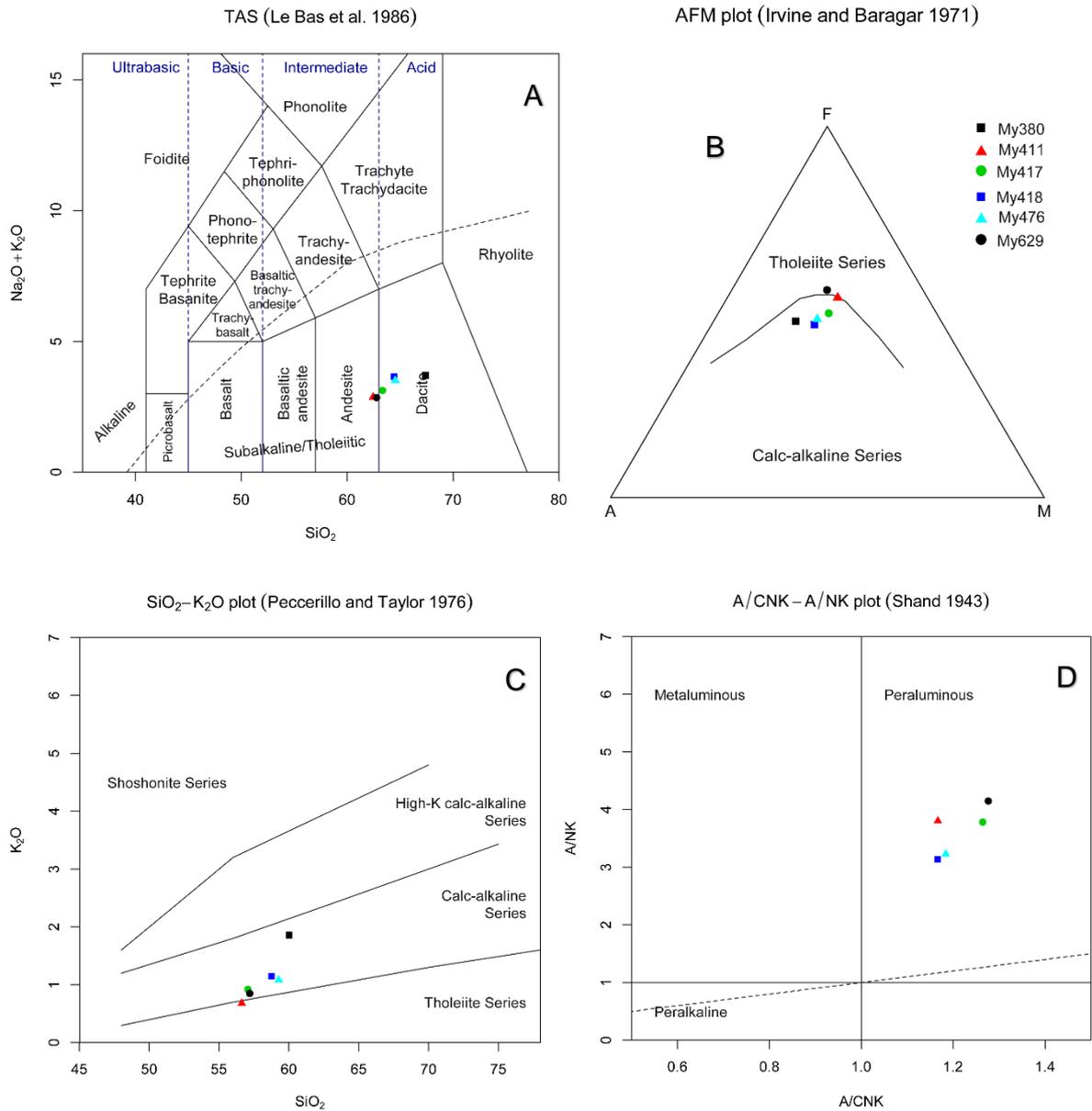


Figura 4.7 A) Diagrama Álcalis Totales / Sílice TAS utilizado para la clasificación geoquímica de las ignimbritas del área de estudio. B) Diagrama AFM para diferenciar las series toleíticas y calcoalcalinas. C) Diagrama SiO₂ vs. K₂O para discriminar entre las diferentes series. D) Diagrama de alcalinidad – aluminosidad. Simbología según Figura 4.7B

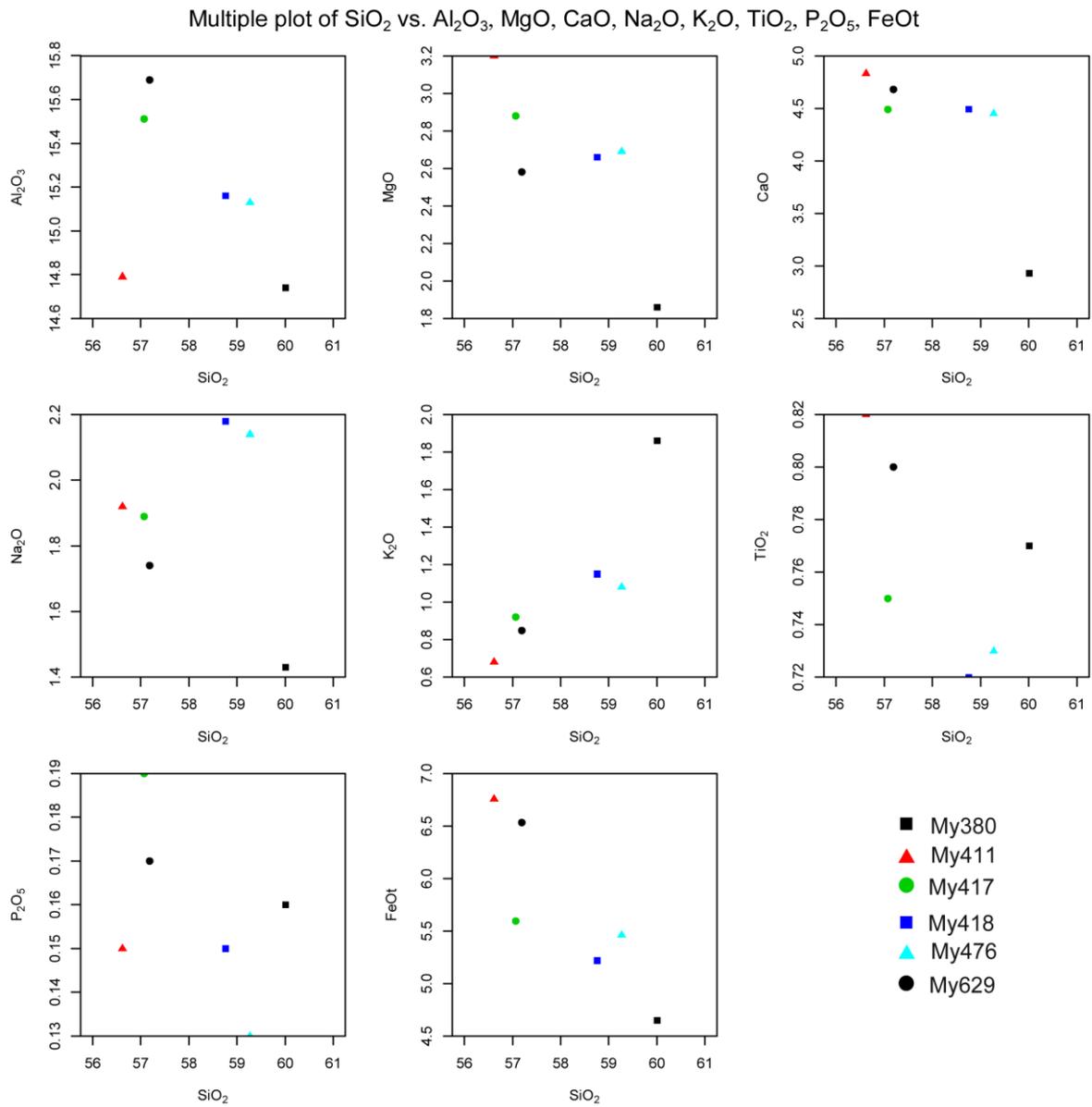


Figura 4.8 Diagramas de variación Harker de óxidos mayores de las ignimbritas del área de estudio.

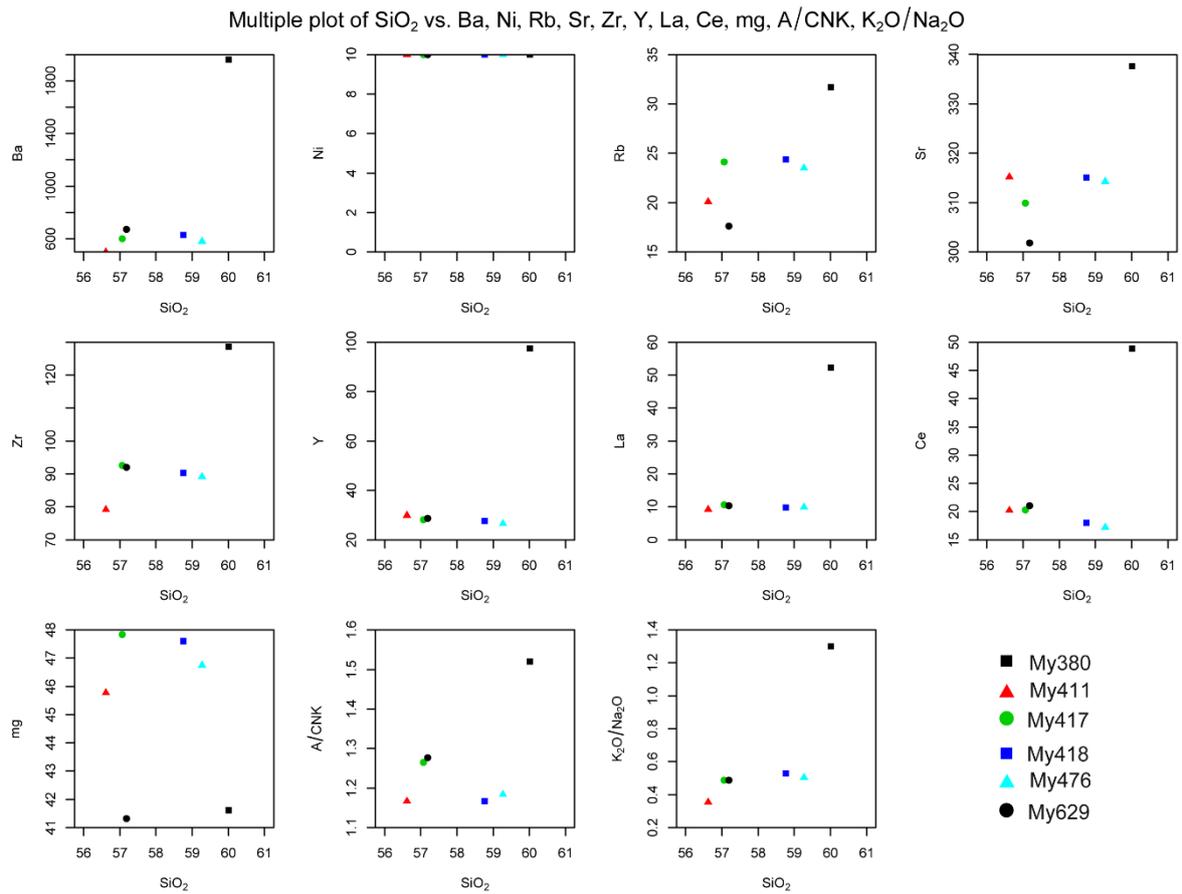


Figura 4.9 Diagramas de variación de elementos traza de las ignimbritas del área de estudio.

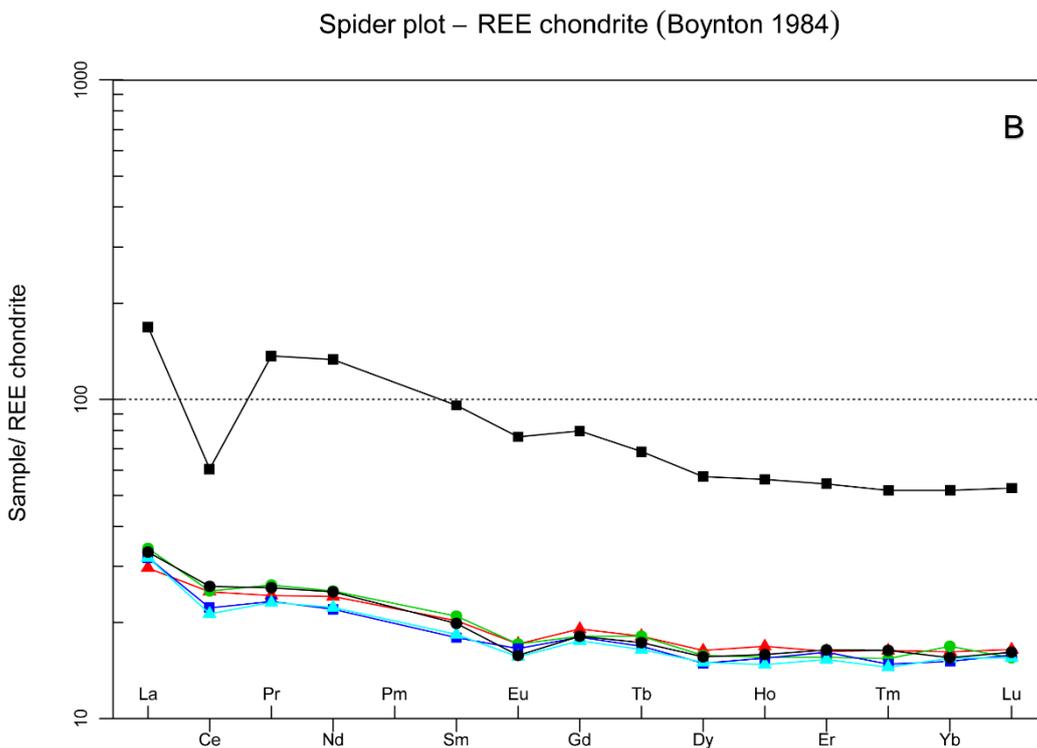
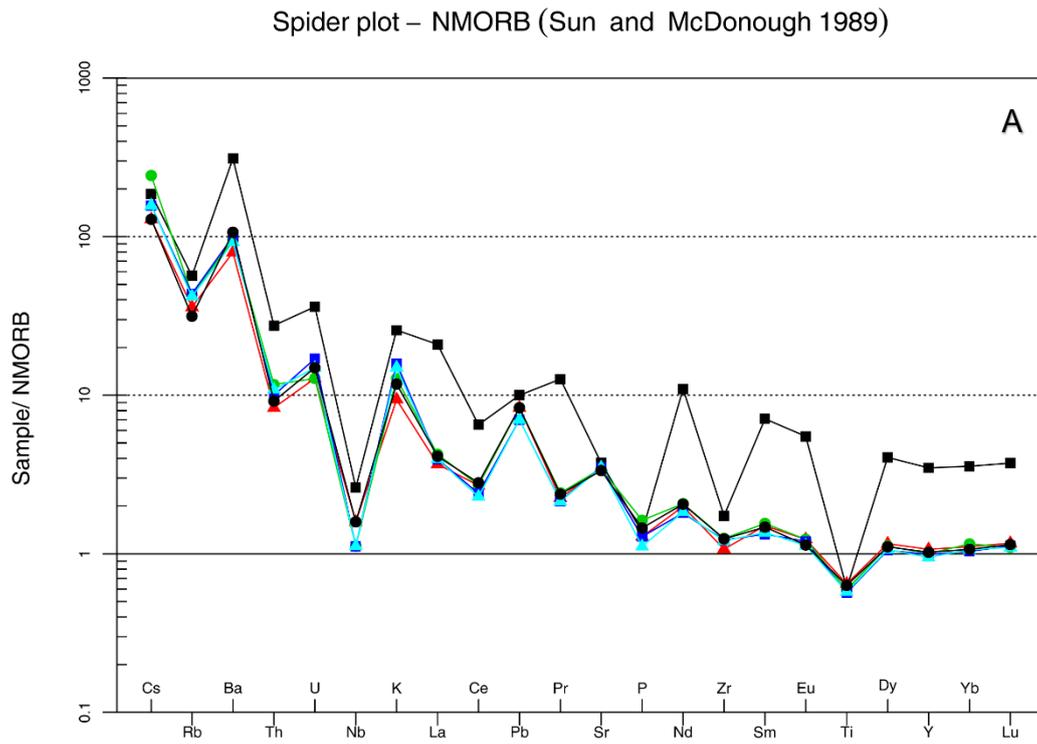


Figura 4.10 A) Diagramas multielementos normalizado a NMORB (Sun & McDonough, 1989) y B) Diagrama spider de los REE normalizados a condritos (Boynton, 1984) de las ignimbritas del área de estudio. Simbología según Figura 4.9.

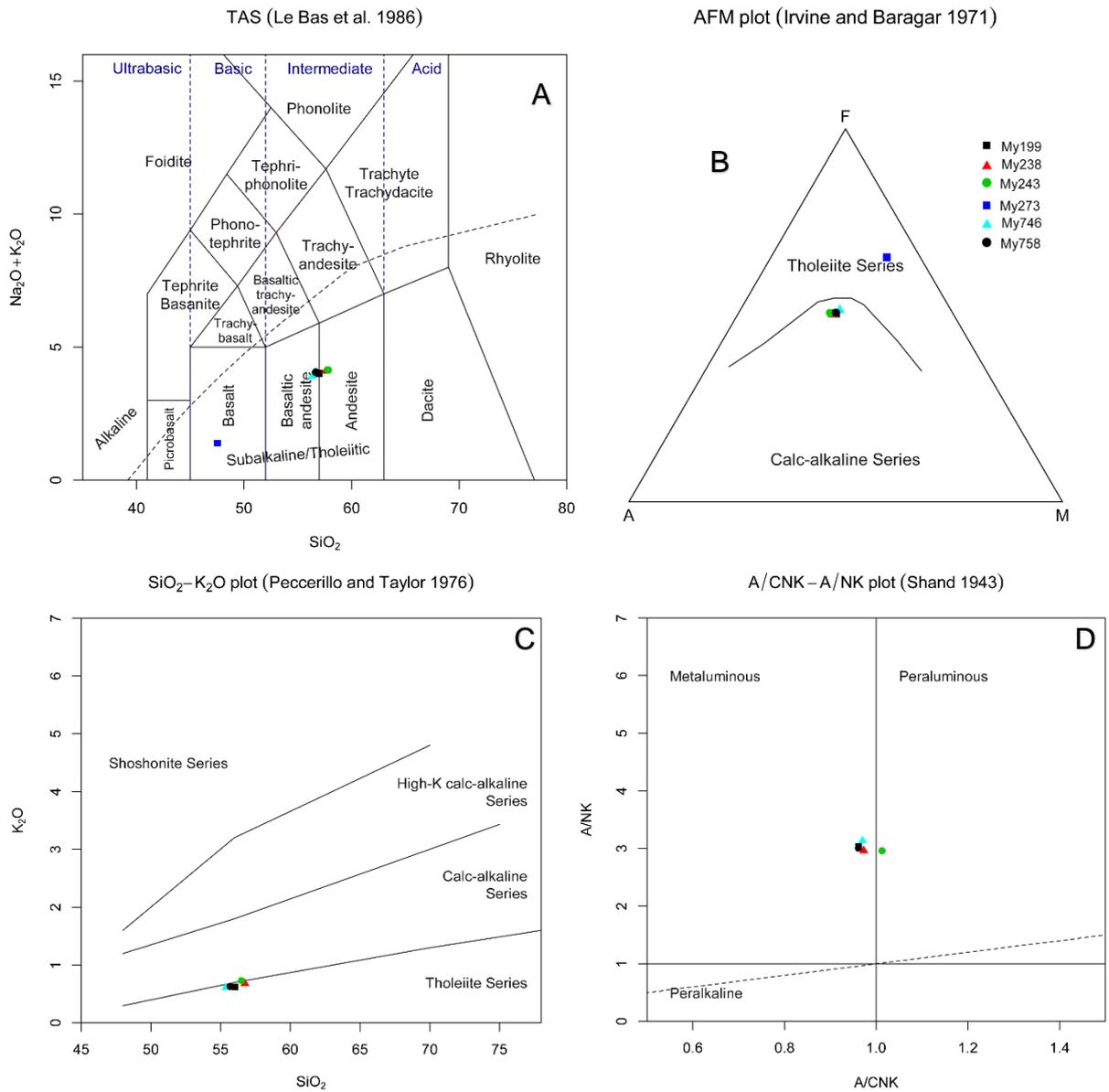


Figura 4.11 A) Diagrama Álcalis Totales / Sílice TAS utilizado para la clasificación geoquímica de las tefras del volcán Arenal del área de estudio. B) Diagrama AFM para diferenciar las series toleíticas y calcoalcalinas. C) Diagrama SiO₂ vs. K₂O para discriminar entre las diferentes series. D) Diagrama de alcalinidad – aluminosidad. Simbología según Figura 4.9B .

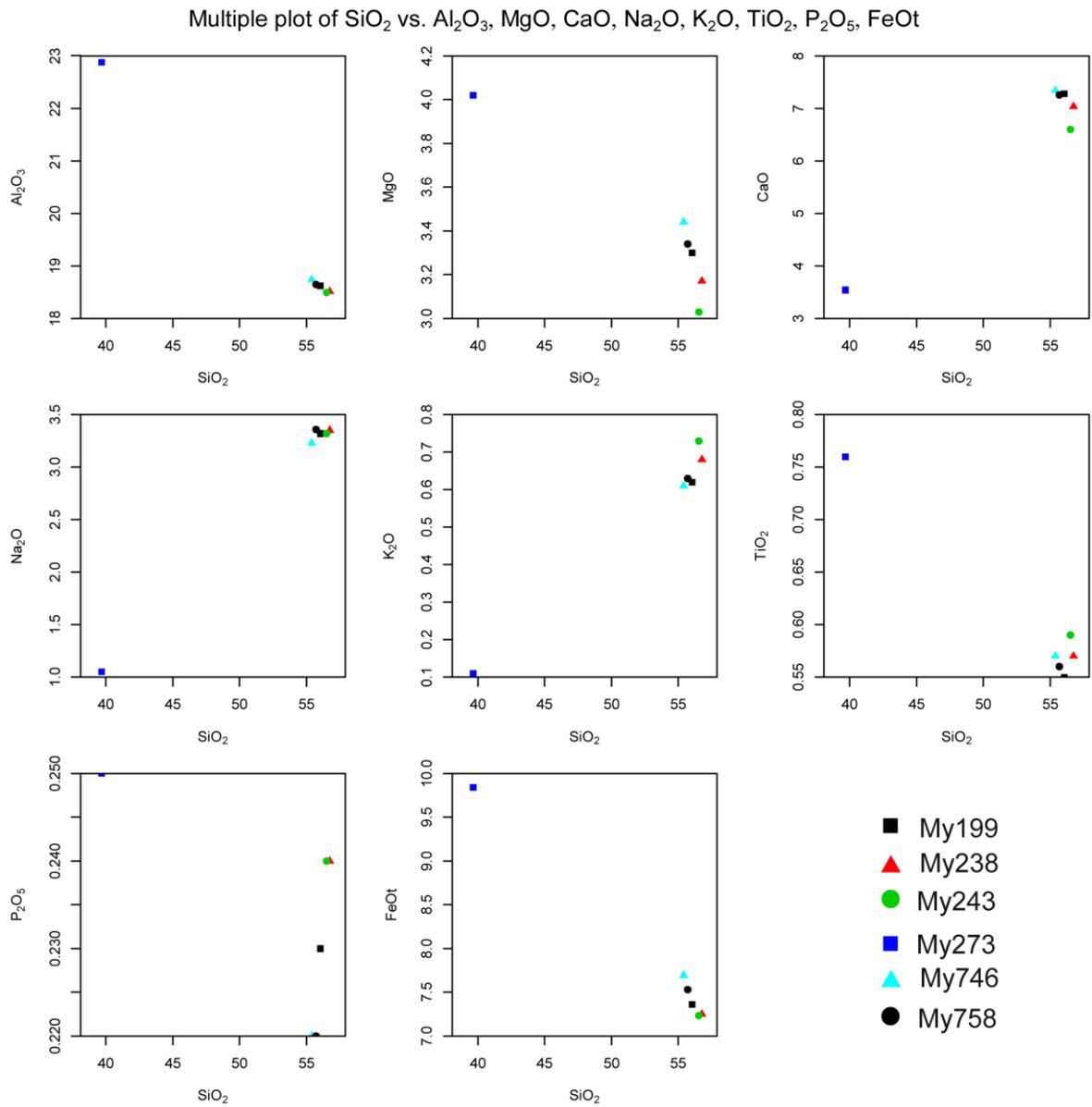


Figura 4.12 Diagramas de variación Harker de óxidos mayores de las tefras del volcán Arenal del área de estudio.

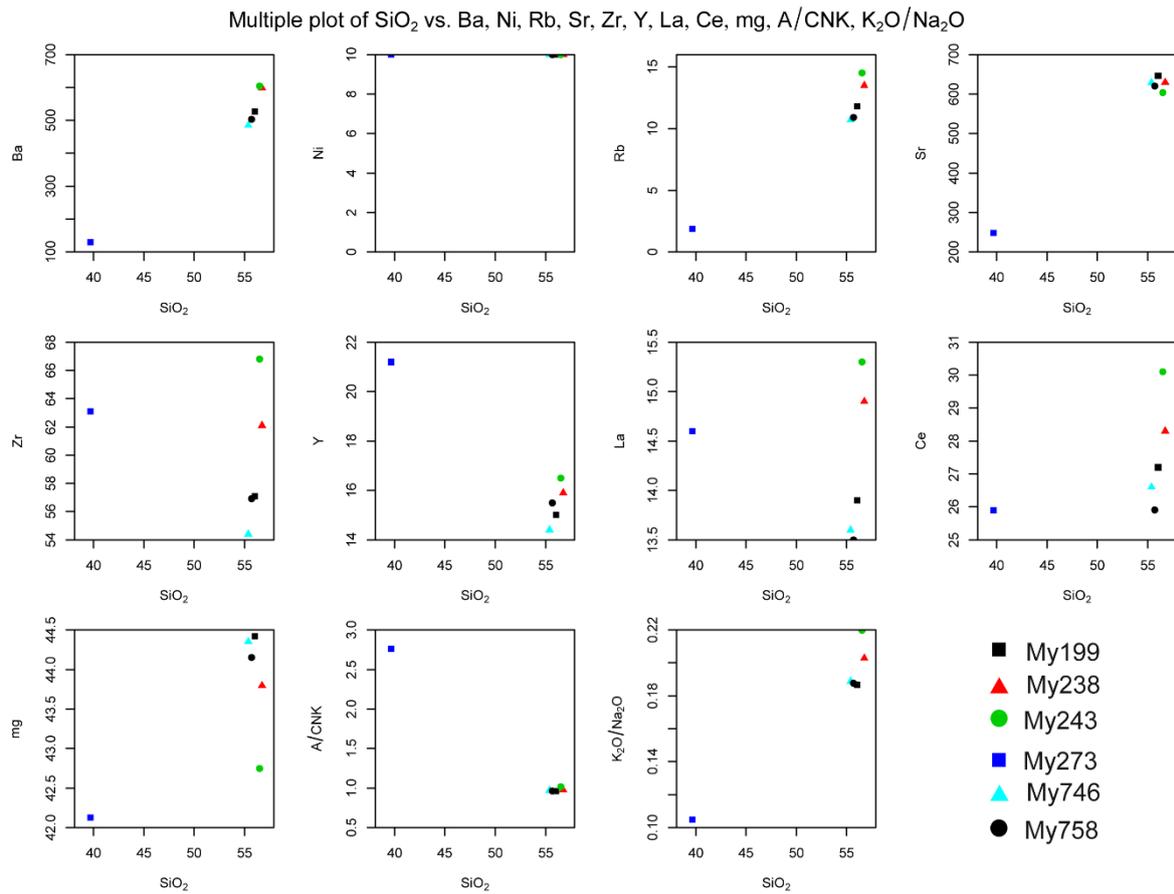


Figura 4.13 Diagramas de variación de elementos traza de las tefras del volcán Arenal

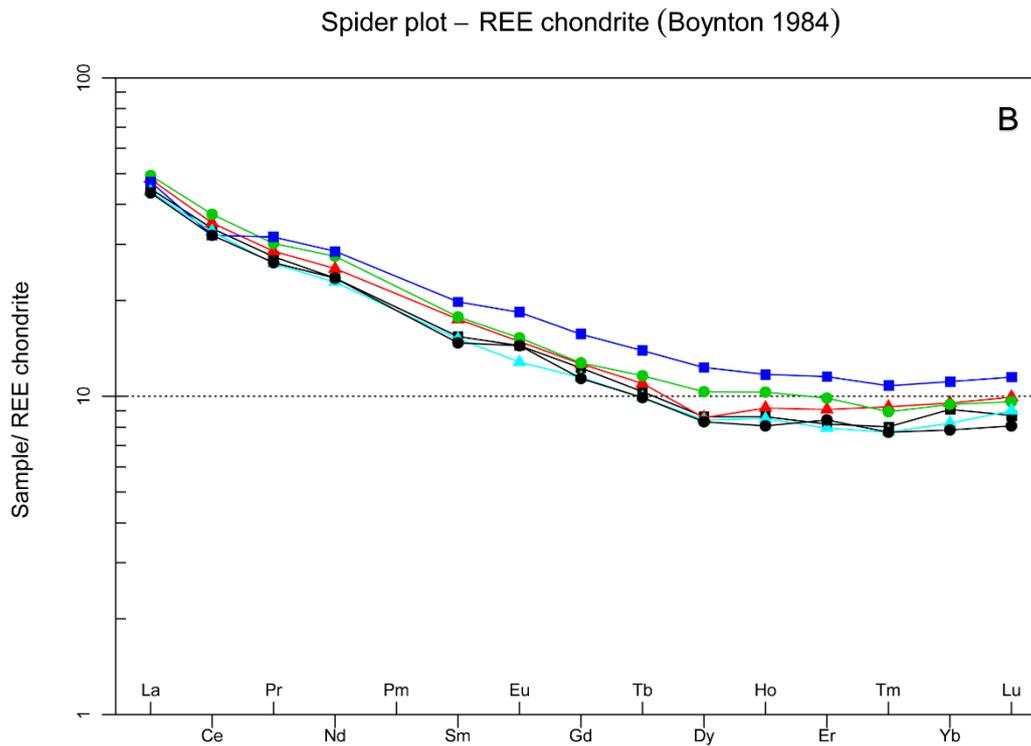
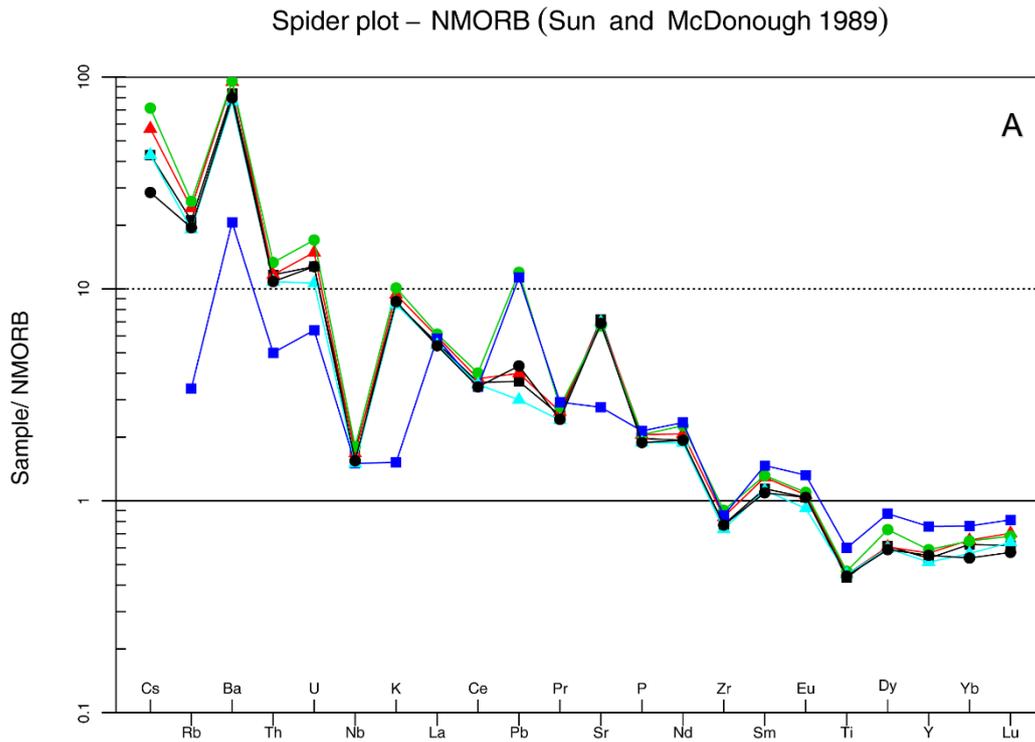


Figura 4.14 A) Diagramas multielementos normalizado a NMORB (Sun & McDonough, 1989) y B) Diagrama spider de los REE normalizados a condritos (Boynton, 1984) de las tefras del volcán Arenal. Simbología según Figura 4.13.

5. TECTÓNICA

La Cuenca de San Carlos muestra dos estilos estructurales (Duran et al., 2017, basado en Astorga et al., 1991; Astorga, 1992; Ballesteros et al., 1995; Barboza et al., 1997; Gazel et al., 2005; Denyer & Alvarado, 2007): 1) una fase tectónica con formación de fallas normales, lístricas y estructuras roll over de rumbo NO-SE del periodo sin-rift (Eoceno – Mioceno Medio); 2) una fase compresiva que corresponde con sobrecorrimientos y pliegues asociados con rumbo E-O e intrusiones hipoabisales (Mioceno Superior – Plioceno), desarrollado durante el periodo post-rift. En este sentido la Formación Venado representa la fase de sedimentación clástica y carbonatada nerítica del periodo sin-rift del Mioceno Medio – Superior (Obando, 1986; Calvo & Bolz, 1987; Barboza et al., 1997).

La Hoja Monterrey se ubica en un sector de transición del arco volcánico de Tilarán y borde sur de la cuenca de San Carlos. Como bien resume el Atlas Tectónico de Costa Rica, esta área y a mayor extensión es afectada por un fallamiento inverso y fallas probables con rumbo norte – noroeste del Cenozoico (Denyer et al., 2003). La interpretación estructural de la cuenca de San Carlos en este sector, según el estudio integrado de geología y geofísica (Ballesteros et al., 1995), el cual incluye en el área específica los pozos profundos Pataste N°1 (1979 m) y Tonjibe N°1 (2168 m), dos pozos estratigráficos Monterrey N°1 (620 m) y Monterrey N°2 (320 m), estudios de potencial de campo (gravimetría, magnetometría y sísmica de refracción y reflexión), a profundidades entre los 0,5 hasta 4 kilómetros, muestra un complejo fallamiento normal e inverso de rumbo este – oeste con deflexiones al oeste – suroeste y este – sureste.

Realizando un reconocimiento de las líneas sísmicas 38, 39, 40, 43, 44, 101, 102, 103 y 104 (PIAC/RECOPE, 1987-89), existen rasgos de la estructura de la cuenca como plegamientos y fallas. Cerca del pueblo de Pataste se reportan manifestaciones de hidrocarburos (Keating, 1985), área que incluye el levantamiento de líneas sísmicas en este sector del margen sur de la cuenca y la ubicación del pozo exploratorio profundo Pataste N°1. Estas manifestaciones están relacionadas posiblemente con la migración de hidrocarburo a través de un sistema de falla.

La interpretación de estructuras de deformación contraccional, posiblemente asociadas a una inversión tectónica positiva (Durán et al. 2017), posterior a la fase de tectónica extensional “*rifting*”, es posible a través de esta serie de líneas sísmicas con rumbos 358° - 010° y 065° - 125° (PIAC/RECOPE, 1987-89), ubicadas en el sector sur y límite de cuenca de la Cuenca de San Carlos. Sobrecorrimientos de bajo ángulo, son evidentes a niveles más superficiales hacia los bordes de cuenca, así como posibles hemigrábenes invertidos, deformación al parecer concentrada más hacia los

bordes de la cuenca, siendo posible establecer hacia los depocentros reflectores subhorizontales interpretados como límites inferiores de cuenca.

La secuencia estratigráfica es afectada por zonas de falla (al menos en 28 sitios con indicadores cinemáticos), y en algunos sitios como el My288 se observa afectada por actividad magmática subvolcánica (diques basálticos). Localmente en el área de estudio, es evidente la presencia de fallas activas principalmente en el sector suroeste del área de la Hoja Monterrey (Tabla 5.1).

La secuencia sedimentaria presenta buzamientos que varían entre 2° y 85° , y direcciones de buzamiento que varían en un amplio rango azimutal de norte franco hasta los 360° (Figura 5.1 A y B). El amplio rango en las direcciones de buzamiento y ángulos de buzamiento de las capas sedimentarias se asocia a la tectónica, y es evidencia de que localmente las capas sedimentarias del Mioceno Medio – Superior han sido basculadas y afectadas por fallas principalmente inversas. Localmente se presenta una cantidad considerable de buzamientos que han sido afectados por tectónica y pueden no ajustarse al plegamiento regional interpretado para esta área.

Es clara la presencia de zonas de deformación tectónica que afectan tanto depósitos sedimentarios y volcánicos del Neógeno como del Cuaternario. La fase de deformación reciente se manifiesta por la presencia de fallas con desplazamientos principalmente de rumbo y componentes normales e inversas, sin embargo en pocos casos es posible discriminar entre desplazamiento sinistral o dextral mediante indicadores cinemáticos claros (Tabla 5.1 y Figura 5.2). La fase de deformación que afecta principalmente los sedimentos del Mioceno se interpretan como fallas inversas y posiblemente sobrecorrimientos, que serían el resultado de la inversión tectónica ocurrida durante el Mioceno-Plioceno a partir de algunas estructuras extensionales del Paléogeno y Mioceno (Durán et al., 2017). La Figura 5.2 muestra gráficamente los rumbos de las fallas medidas en la zona de estudio. Se observa un grupo más representativo de rumbo NNO / SSE.

PD	Litología	Norte (m)	Este (m)	Elevación GPS (msnm)	Plano Falla	Rumbo Plano	Buzamiento	Dirección de estrias	Inmersión	Rake	Tipo
M172	Arenisca (Formación Venado)	1166292,26	428030,55	355,12	257	347	45	215	41	48	Normal Sinistral
M179	Arenisca (Formación Venado)	1168012,96	426736,52	231,06	212	302	76				
M202	Tobas (Formación Monteverde)	1163063,33	419347,76	642,14	47	137	65	342	40	25	Dextral Inversa?
M202	Tobas (Formación Monteverde)	1163063,33	419347,76	642,14	63	153	65	346	10	13	Dextral Inversa?
M228	Tobas (Formación Monteverde)	1164600,18	418858,93	471,92	100	190	70	45	55	35	Dextral Inversa?
M232	Tobas (Formación Monteverde)	1164832,78	418867,14	447,56	218	308	65	190	60	62	Inversa Dextral? / Normal sinistral?
M259	Arenisca fina y brecha andesítica (Formación Venado y Aguacate)	1165077,31	417486,74	317,75	135	225	68				
M266	Aguacate	1164527,50	417749,21	349,50	285	375	75	375	20		Sinistral Inversa? Inferido sin acceso directo
M275	Brecha volcánica (Formación Monteverde)	1164453,17	417751,00	385,81	278	8	88	188	4	0	Sinistral?
M277	Volcánico alterado?	1164378,59	417762,86	395,68	243	333	68	328	25	5	
M277	Volcánico alterado?	1164378,59	417762,86	395,68	290	20	85	15	27	5	Sinistral Inversa
M359	Lutitas y areniscas (Formación Venado)	1167553,13	422291,44	363,52	11	101	88				
M359	Lutitas y areniscas (Formación Venado)	1167553,13	422291,44	363,52	183	273	38				
M434	Arenisca (Formación Venado)	1164161,43	418007,96	441,83	207	297	52	120	2	3	
M434	Arenisca (Formación Venado)	1164166,00	418001,00	441,83	220	310	80	130	18	0	
M434	Arenisca (Formación Venado)	1164176,00	417993,00	441,83	35	305	88	120	20	5	Dextral
M434	Arenisca (Formación Venado)	1164153,00	418015,00	441,83	224	314	88	134	45	0	
M434	Arenisca (Formación Venado)	1164145,00	418032,00	441,83	90	180	80	170	20	10	
M575	Arenisca fina (Formación Venado)	1168414,928	426885,0122	245	10	100	47				Diaclasa normal
M575	Arenisca fina (Formación Venado)	1168414,928	426885,0122	245	353	83	65				Diaclasa normal
M612	Arenisca (Formación Venado)	1172782,934	418929,9994	120	12	102	32				Zona de falla normal
M628	Arenisca (Formación Venado)	1171723,95	418560,0072	157	280	10	80				Zona de falla normal
M652	Lavas muy alteradas (Formación Monteverde)	1182749,007	439842,98	96	94	184	15	124	12		Inversa?
M667	Lavas muy alteradas (Formación Monteverde)	1159048,94	446485,0554	80	233		40			20	Inversa?
M667	Lavas muy alteradas (Formación Monteverde)	1159048,94	446485,0554	80	200		34	270	17	45	Inversa?
M667	Lavas muy alteradas (Formación Monteverde)	1159048,94	446485,0554	80	240		30	270	20	45	Inversa?
M667	Lavas muy alteradas (Formación Monteverde)	1159048,94	446485,0554	80	278		22	270	28	70	Inversa?
M667	Lavas muy alteradas (Formación Monteverde)	1159048,94	446485,0554	80	40		50				

Tabla 5.1 Fallas activas medidas durante el trabajo de campo en el área de estudio

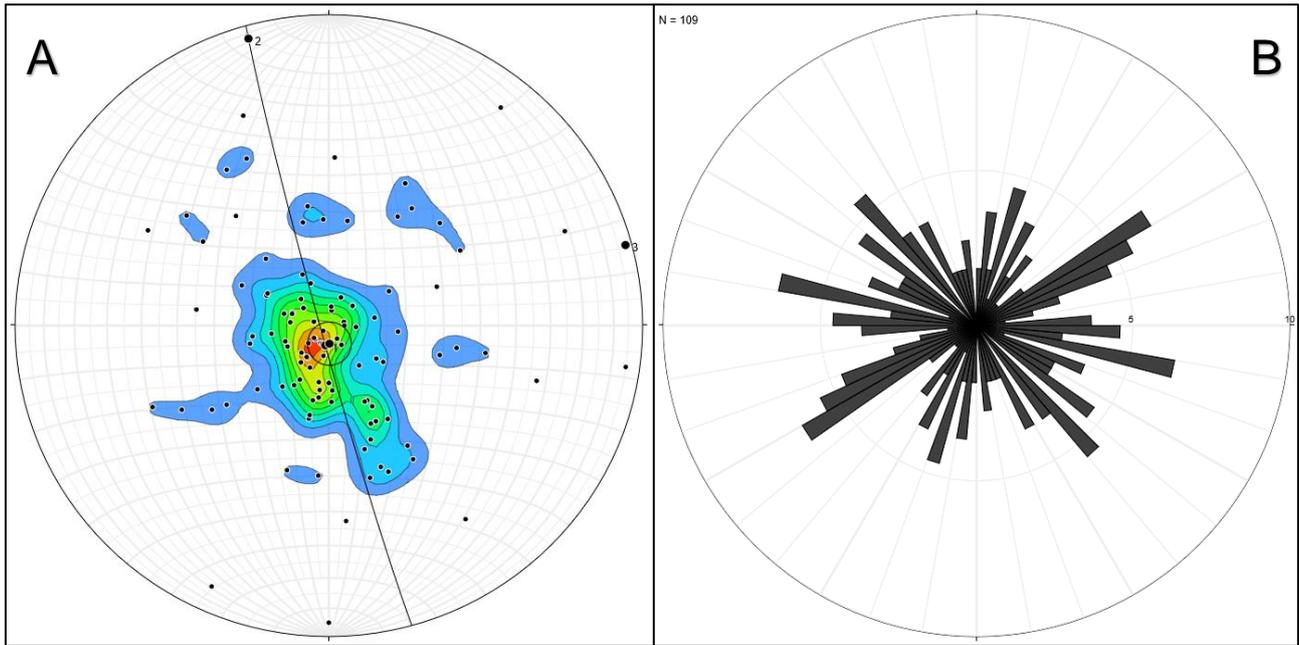


Figura 5.1 A) Direcciones de buzamientos (diagrama de polos en red estereográfica de igual área en isovalores de 1%) de la secuencia sedimentaria de la Formación Venado. B) Direcciones de rumbo (rosa de rumbos cada 5°) de los estratos sedimentarios de la Formación Venado (Diagrama Stereonet 10.1.0, según Allmendinger et al., 2013 y Cardoso & Allmendinger, 2013).

----- Poles from Planes | 27/02/2018 at 15:16 -----
 calculated from 109 planes from Data set: 'Datos estructurales sedimentario.tx'

----- Kamb Contouring | 27/02/2018 at 15:16-----
 Data set name = poles to Datos estructurales sedimentario.txt
 Contour Int. = 2 sigma; Counting Area = 7,63% of net area
 Expected Num. = 8.313559 Signif. Level = 3 sigma

----- Bingham Analysis | 27/02/2018 at 15:18-----
 Data set: poles to Datos estructurales sedimentario.txt

Axis	Eigenvalue	Trend	Plunge	a95 min	a95 max
1.	0,7657	190,0	84,8	4,2	5,6
2.	0,1370	344,5	04,7		
3.	0,0974	074,7	02,2	4,2	45,7

Best fit great circle (strike, dip RHR) = 164,7, 87,8

----- Fisher Mean Vector | 27/02/2018 at 15:18-----
 Data set: poles to Datos estructurales sedimentario.txt

N	Trend	Plunge	a95	a99	kappa	mean length
all	109	178,0	85,3	5,6	7,0	6,7 0,8529

----- Rose diagram/Circular Histogram | 28/02/2018 at 7:45-----
 Planes data set (petals parallel strike direction): Datos estructurales sedimentario.txt
 Max value = 6.422018% between 056° and 060°
 Mean Vec = 089,1° ± 29,6°; Average Length = 0,1312
 Circular Variance = 0,8688; kappa = 0,2622
 [Krumbein's axial mean; uncertainty is 1 standard error,
 for 95% confidence level multiply by 1.96]

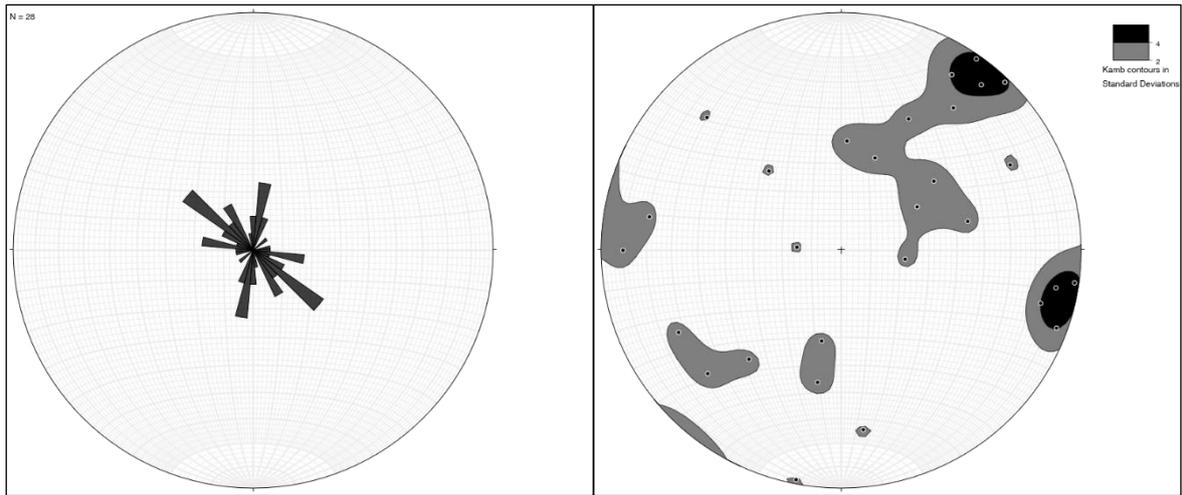


Figura 5.2 Direcciones de rumbo (rosa de rumbos) y buzamientos (diagrama de polos en red estereográfica de igual área) de las fallas medidas en el área de estudio (según Tabla 5.1) [Diagrama Stereonet 10.1.0, según Allmendinger et al., 2013 y Cardoso & Allmendinger, 2013].

5.1 Sistema de fallas inversas E-O y pliegues asociados

Corresponde con un sistema de fallas inversas con rumbos este – oeste deflectadas al noreste-suroeste y noroeste-sureste. Tienen expresión superficial restringida y afloran principalmente en la cuenca de los ríos Nilo, La Muerte, Pataste y Jicarito. Estas fallas afectan principalmente los depósitos sedimentarios y volcánicos del Neógeno. Estas fallas han sido propuestas en los mapas regionales con los estudios de tectónica y sísmica de la región, y han sido corroboradas en diversos sitios a través de la presencia de deformación tectónica en los sedimentos del Mioceno (Formación Venado).

Los sedimentos clásticos y carbonatados de la Formación Venado en la mayoría de los sitios donde aflora se observa deformación tectónica (Figuras 5.3 y 5.4). El sitio My359 muestra una zona de falla con un espesor aparente de 7 metros y rumbo aproximado de 072°. Esta zona de falla afecta areniscas de grano medio alteradas a un color crema.

En otros sitios el vulcanismo del Neógeno se observa afectado por estas fallas inversas, en algunos sitios se interpreta son sobrecorridos por los sedimentos de la Formación Venado (Figuras 5.3 D, 5.5 y 5.6), o presentan deformación tectónica y plegamiento (Figura 5.7).

En algunos sitios los depósitos volcánicos del Pleistoceno presentan deformación tectónica que se ha asociado a la expresión superficial o afloramiento de estas fallas inversas (Figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11).

En otros sitios, principalmente en la cuenca del río La Muerte, depósitos holocénicos se observan en una posición estratigráfica levantada, lo cual se asocia a un levantamiento relativo producto del fallamiento inverso (Figuras 5.12 y 5.13). No se descarta que actualmente estas fallas estén activas producto de la compresión tectónica.

En cuanto a los pliegues interpretados, son cubiertos, cuyos ejes tienen un rumbo aproximado este – oeste aproximadamente paralelo al rumbo de las fallas inversas, y se han trazado también en función de la expresión geomorfológica. La estratificación sedimentaria muestra una amplia variación en cuanto a las direcciones de buzamiento y buzamientos (Figura 5.1), lo cual se ha asociado a la tectónica que afecta el área, siendo difícil establecer con claridad localmente ejes de pliegues y sus orientaciones.



Figura 5.3 Depósitos sedimentarios de la Formación Venado en el sitio My573 (A, B y C, coordenadas 1168429,926 – 426802,9636), con evidencias de deformación tectónica producto de fallas inversas. D) Sitio My259 (coordenadas 1165077,31- 417486,74) en zona de falla posiblemente relacionado a un sobrecorrimiento.



Figura 5.4 Depósitos sedimentarios de la Formación Venado en el sitio My359 (coordenadas 1167553,13 – 422291,44), cuenca alta del río Jicarito. A) Arenisca alterada en zona de falla inversa. B) Mismo sitio con un acercamiento a la zona de falla mostrando arcilla de falla.

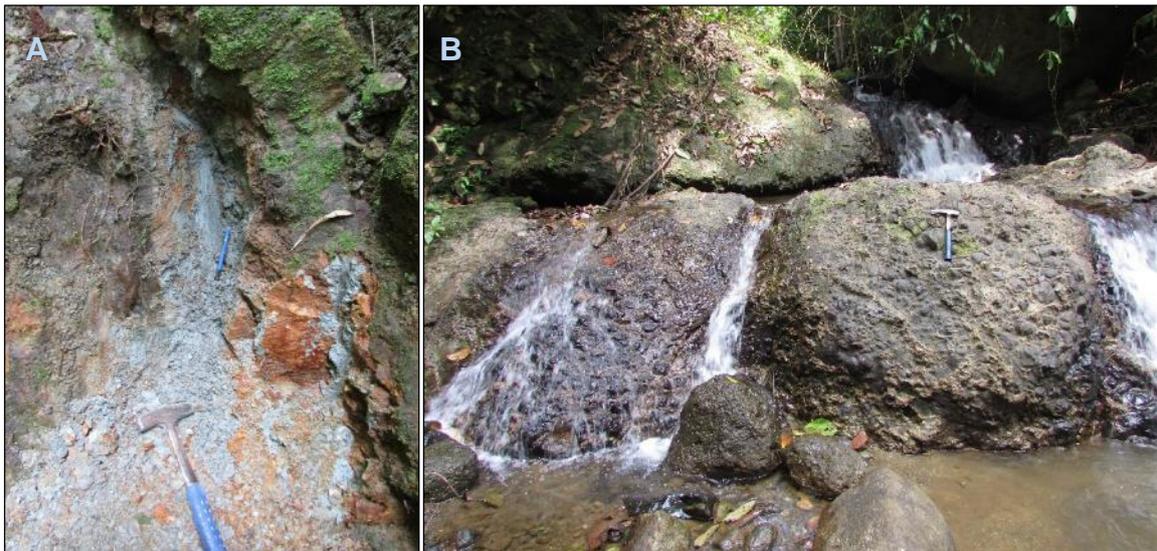


Figura 5.5 Depósitos volcánicos del Neógeno en zona de falla. A) zona de falla con formación de arcilla de falla (sitio M277, coordenadas 1164378,59 – 417762,86), cuenca baja de la quebrada Catarata afluente del río Nilo). B) Brecha de falla con mineralización de cuarzo amorfo y pirita diseminada en la confluencia del río Nilo (sitio My276, coordenadas 1164386,45 – 417710,56).



Figura 5.6 Depósitos sedimentarios (Formación Venado) y volcánicos (Formación Grifo Alto) en zona de falla (sitio My315, coordenadas 1168652,93 – 422869,71). A) Lutita bituminosa y arenisca en estratos casi verticales (cuenca alta del río Jicarito). B) Roca ígnea alterada en zona de falla, siendo sobrecorrida por los sedimentos de la Formación Venado.

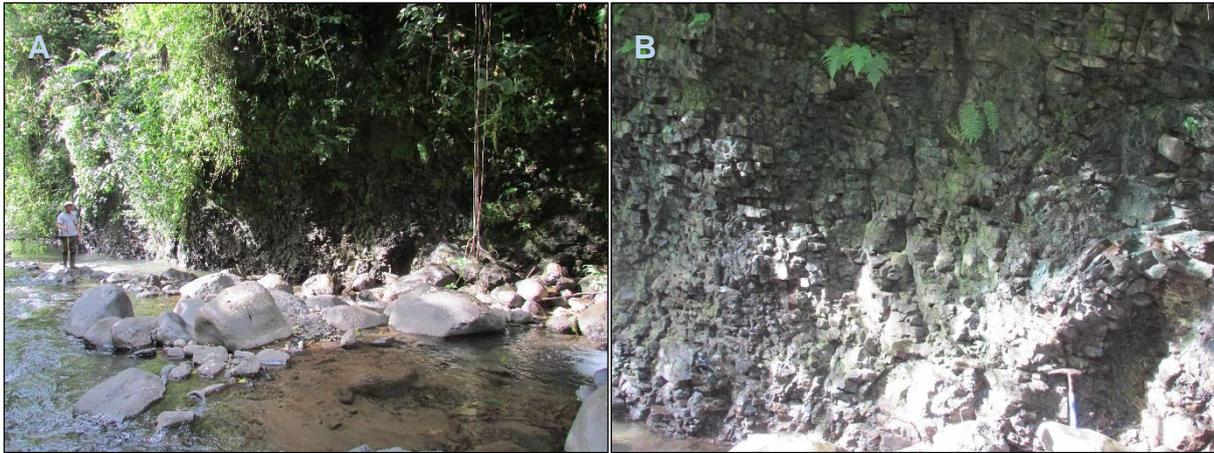


Figura 5.7 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate) a lo largo de la cuenca media del río Nilo (sitio My264, coordenadas 1164565,53 – 417757,29). A) y B) cuerpo hipoabisal de dacita que muestra un alto grado de fracturamiento y deformación tectónica (plegamiento) cerca de una zona de falla inversa.

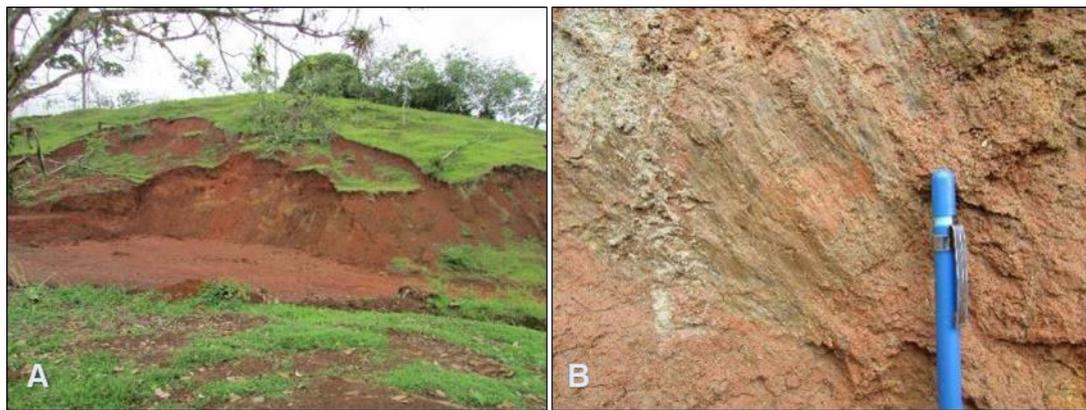


Figura 5.8 Deslizamiento en depósitos volcánicos pleistocénicos de la Formación Monteverde asociado a una zona de falla inversa (sitio My381, coordenadas 1174886,40 – 417780,39). A) Talud de suelo residual y evidencias de movimiento, cerca del camino 1 km al sur de la ruta N°4 Monterrey – Guatuso. B) Muestra un acercamiento con indicadores de movimiento por deslizamiento.



Figura 5.9 Depósitos volcánicos de la Formación Monteverde en el sitio My645 (coordenadas 1159216,024 – 449972,0368), remanente de roca ígnea alterada, tipo de alteración y estructura relacionado a zona de deformación.



Figura 5.10 Depósitos volcánicos de la Formación Monteverde en el sitio My652 (coordenadas 1182749,007 – 439842,98), tipo de alteración y estructura relacionado a zona de deformación con evidencias de indicadores cinemáticos.



Figura 5.11 Depósitos volcánicos de la Formación Monteverde en el sitio My667 (coordenadas 1159048,94 – 446485,0554), tipo de alteración y estructura relacionado a zona de deformación. Evidencias de zona de falla con indicadores cinemáticos.



Figura 5.12 Depósitos holocénicos (paleoaluviones) a lo largo de la cuenca media del río La Muerte, que reflejan un levantamiento relativo de los sedimentos de la Formación Venado producto de la tectónica inversa. A) Sitio My396 (coordenadas 1169584,41 – 418424,67); B) Sitio My446 (coordenadas 1168775,79 – 418263,50); C) Sitio My460 (coordenadas 1169735,16 – 418382,79).



Figura 5.13 Mismo ejemplo anterior en los sitios A) My485 (coordenadas 1174888,985 – 419475,0128) y B) My623 (coordenadas 1171028,964 – 418338,0562).

5.2 Fallas normales asociadas al fallamiento inverso

Localmente se observan zonas de falla normales que se han asociado a una relajación local de esfuerzos producto del fallamiento inverso, en zonas por ejemplo cerca de anticlinales (Figuras 5.14 y 5.15). El sitio My172 (Figura 5.15) muestra la presencia de una falla normal afectando los depósitos sedimentarios de la Formación Venado. La Figura 5.16 muestra la solución focal a partir de los indicadores cinemáticos medidos en el sitio (Tabla 5.1). La zona de falla sugiere actividad reciente con formación de arcilla de falla con un espesor <1 metro. En el sitio la base corresponde a una calcarenita sobreyacida por una arenisca media color gris claro no carbonatada ambas de estratificación métrica, se intercala una capa delgada de materia vegetal (carbonosa) de 1-2 cm de espesor. Aguas arriba se observa estratificación decimétrica de una arenisca media no calcárea color gris oscuro.



Figura 5.14 A) Diaclasas tensionales que forman pequeñas fallas normales, afectan depósitos sedimentarios (areniscas) de la Formación Venado (Sitio My575, coordenadas 1168414,928 – 426885,0122); B) y C) Areniscas de la Formación Venado afectado por fallas normales menores que interrumpen la estratificación en los sitios My612 (coordenadas 1172782,934 – 418929,9994) y My628 (coordenadas 1171723,95 – 418560,0072) respectivamente.

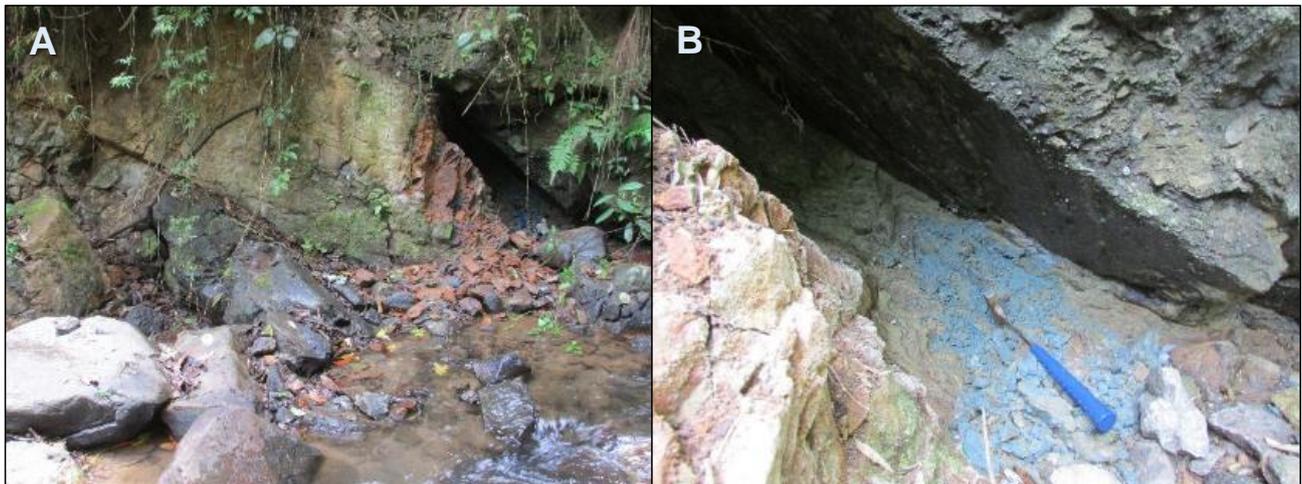


Figura 5.15 Depósitos sedimentarios del Neógeno (Formación Venado). A) Intercalación de areniscas, materia orgánica y calcarenita en zona de falla normal (sitio My172, coordenadas 1166292,26 – 428030,55), cuenca alta del río Purgatorio). B) Mismo sitio My172 acercamiento a la zona de falla activa mostrando arcilla de falla.

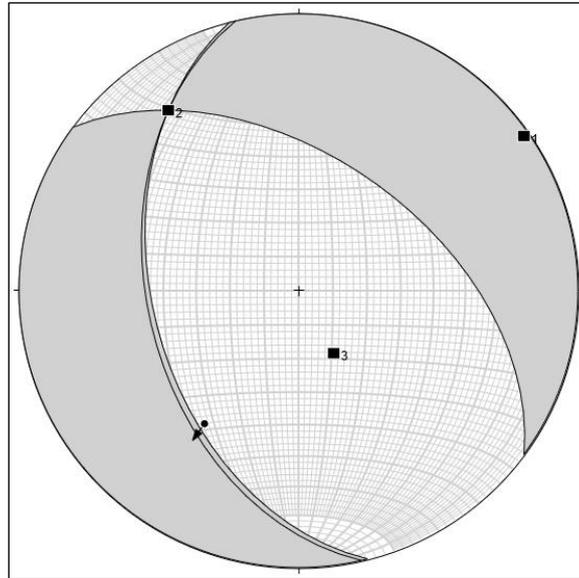


Figura 5.16 Análisis cinemático y solución focal de la falla medida en el sitio My172 [Allmendinger et al., 2012; Merret & Allmendinger, 1990].

Fault strike	Fault dip	Striae trend	Striae plunge	Sense of Slip	T trend	T plunge
167	45	215	41	NL	55.28383	2.141995

----- Fault Plane Solution | 30/09/2016 at 14:38 -----

Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1.	165,7	46,7	216,2	39,3	NR	-060,5
2.	306,2	50,7	075,7	43,3	TL	062,5

P-axis: 150,8, 68,9; T-axis: 055,3, 02,1

-----Moment Tensor Sum | 30/09/2016 at 14:38-----

All data weighted equally

Kostrov's Symmetric Moment Tensor:

Axis	Eigenvalue	Trend	Plunge
1.	+9,3268e-1	055,3	02,14
2.	-8,8404e-17	324,5	20,97
3.	-1,0673e+0	150,8	68,91

-----Linked Bingham Analysis | 30/09/2016 at 14:40-----

Axis	Eigenvalue	Trend	Plunge
1.	0,5000	055,3,	02,1
2.	0,0000	324,5,	21,0
3.	0,5000	150,8,	68,9

5.3 Sistema de fallas de desplazamiento de rumbo y lineamientos asociados

Corresponden con fallas que afectan los depósitos volcánicos del Pleistoceno. Se considera que representan una fase de deformación reciente del arco volcánico y se consideran activas. Se tienen dos sistemas: las de rumbo NO-SE y lineamientos asociados y las de rumbo NE-SO y lineamientos asociados (Tabla 5.1 y Figura 5.2).

5.4 Sistema de fallas de desplazamiento de rumbo dextral y lineamientos asociados

Según el modelo de deformación para Costa Rica en esta área, estas fallas deben de tener rumbo NO-SE o NNO-SSE, como se observa en el sitio My434 (Figura 5.17). Esta es una falla de desplazamiento de rumbo dextral que afecta depósitos volcanoclásticos del Pleistoceno. La Figura 5.18 muestra la solución focal a partir de los indicadores cinemáticos medidos en el sitio (Tabla 5.1). La zona de falla se extiende por al menos 300 metros desde el sitio My434 en la quebrada Catarata hasta el río Nilo (fuera del área del mapa geológico). En el sitio My277 de la quebrada Catarata es evidente la presencia de arcilla de falla y la presencia de estrías de falla con al menos dos direcciones principales. La evidencia de campo de estas fallas principalmente en el sector suroeste de la hoja, son las que se han interpretado en el mapa geológico como fallas dextrales inferidas con la misma tendencia de rumbo. A estas direcciones de fallas inferidas también se han asociado lineamientos con la misma dirección.



Figura 5.17 Depósitos volcánoclasticos del Pleistoceno siendo afectados por fallas de desplazamiento de rumbo dextral (sitio My434 en la quebrada Catarata, coordenadas 1164161,43 – 418007,96). Nótese los indicadores cinemáticos claros de una falla de corrimiento lateral en este caso dextral, rumbo de la falla 124°.

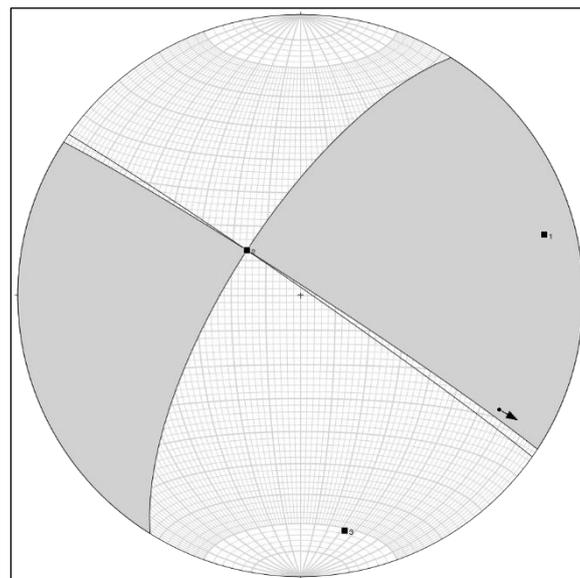


Figura 5.18 Análisis cinemático y solución focal de la falla medida en el sitio My434 [Allmendinger et al., 2012; Merret & Allmendinger, 1990].

----- Fault Plane Solution | 04/06/2019 at 14:41 -----

Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1.	212,1	69,9	213,1	02,7	NR	-002,9
2.	303,1	87,3	122,1	20,1	TL	020,1

P-axis: 169,4, 16,0; T-axis: 075,9, 12,1

----Linked Bingham Analysis | 04/06/2019 at 14:41----

Axis	Eigenvalue	Trend	Plunge
1.	0,5000	075,9,	12,1
2.	0,0000	310,4,	69,7
3.	0,5000	169,4,	16,0

5.5 Sistema de fallas de desplazamiento de rumbo sinistral y lineamientos asociados

De igual forma según el modelo de deformación estas fallas deberían tener direcciones de rumbo NE-SO o NNE-SSO. El sitio My275 (Figura 5.19) muestra una falla de este tipo observada en el campo. La Figura 5.20 muestra la solución focal a partir de los indicadores cinemáticos medidos en el sitio (Tabla 5.1). Al igual que el sitio anterior My434, la zona de falla no aflora dentro de la hoja del mapa geológico, pero fallas inferidas sinestrales con estos rumbos son mostradas en el mapa. De igual forma a estas direcciones de fallas inferidas se han asociado lineamientos de igual rumbo.



Figura 5.19 Depósitos volcanoclásticos del Pleistoceno siendo afectados por fallas de desplazamiento de rumbo sinistral (sitio My275 río Nilo, coordenadas 1164453,17 – 417751,00). Nótese los indicadores cinemáticos de una falla de corrimiento lateral en este caso sinistral, rumbo de la falla 188°.

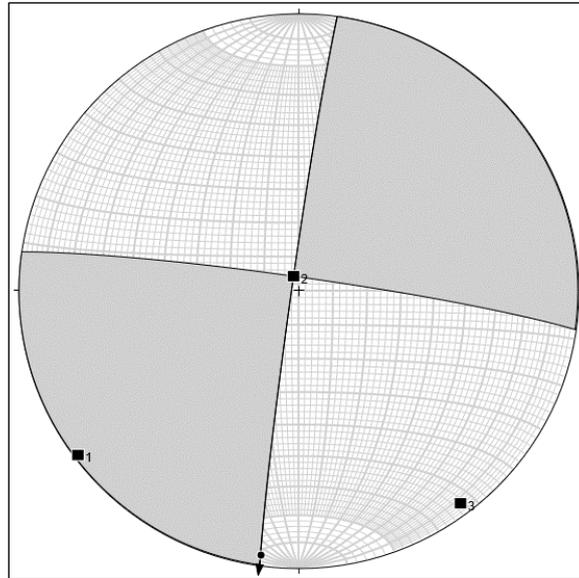


Figura 5.20 Análisis cinemático y solución focal de la falla medida en el sitio My275 [Allmendinger et al., 2012; Merret & Allmendinger, 1990].

Fault strike	Fault dip	Striae trend	Striae plunge	Sense of Slip	T trend	T plunge
188 88	188	4	NL	233.0524 1.414069	142.9476	4.23877

----- Fault Plane Solution | 04/10/2016 at 9:55 -----

Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1.	278,1	86,0	097,9	02,0	NL	-178,0
2.	187,9	88,0	188,1	04,0	TR	176,0

P-axis: 142,9, 04,2; T-axis: 233,1, 01,4

-----Moment Tensor Sum | 04/10/2016 at 9:56-----

All data weighted equally

Kostrov's Symmetric Moment Tensor:

Axis	Eigenvalue	Trend	Plunge
1.	+9,9757e-1	233,1	01,41
2.	+1,3735e-18	341,5	85,53
3.	-1,0024e+0	142,9	04,24

-----Linked Bingham Analysis | 04/10/2016 at 9:56-----

Axis	Eigenvalue	Trend	Plunge
1.	0,5000	233,1,	01,4
2.	0,0000	341,5,	85,5
3.	0,5000	142,9,	04,2

5.6 Diaclasas

Se realizaron mediciones de diaclasas principalmente en las rocas sedimentarias de la Formación Venado y las rocas ígneas de la Formación Grifo Alto. En algunos sitios los depósitos volcanoclásticos endurecidos del Pleistoceno presentaban diaclasas que fueron medidas. La Figura 5.21 ilustra la presencia de estas discontinuidades en roca ígnea y sedimentaria. La Figura 5.22 corresponde al gráfico que muestra las direcciones de rumbo y buzamiento de todos los datos medidos, donde se puede observar dos tendencias principales, una NNO-NO / SSE-SE cuyos rumbos corresponden con las fallas observadas e inferidas de desplazamiento de rumbo dextral, y otra menos representativa NNE-NE / SSO-SO cuyos rumbos corresponden con las fallas inferidas de desplazamiento de rumbo sinistral. La mayoría corresponden con diaclasas de alto ángulo (Figura 5.22).



Figura 5.21 Depósitos volcánicos y sedimentarios siendo afectados por diaclasas de alto ángulo. A) sitio My262 (coordenadas 1164735,64 – 417577,10) cuenca del río Nilo en la Formación Grifo Alto; B) sitio My441 (coordenadas 1171956,71 – 416983,98) cuenca del río La Muerte en sedimentos de la Formación Venado.

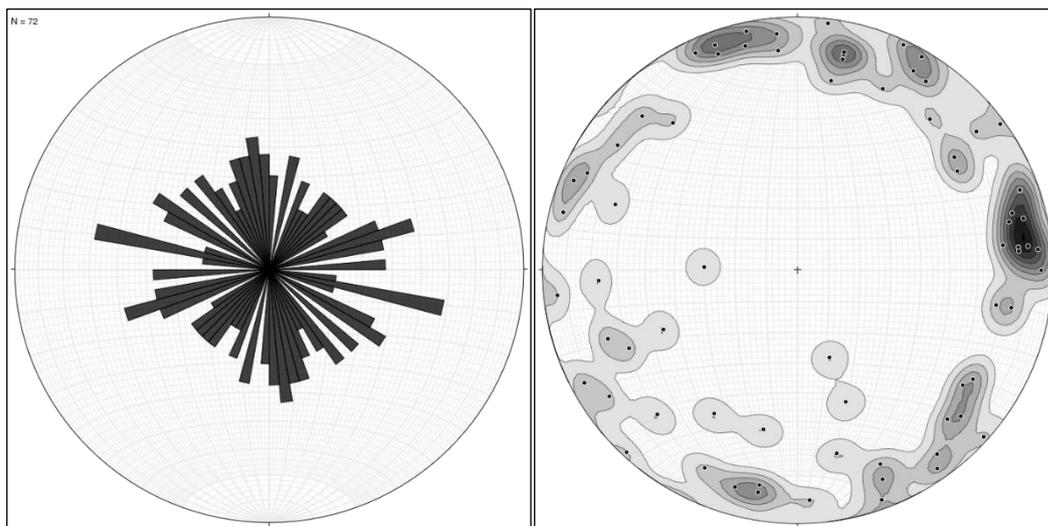
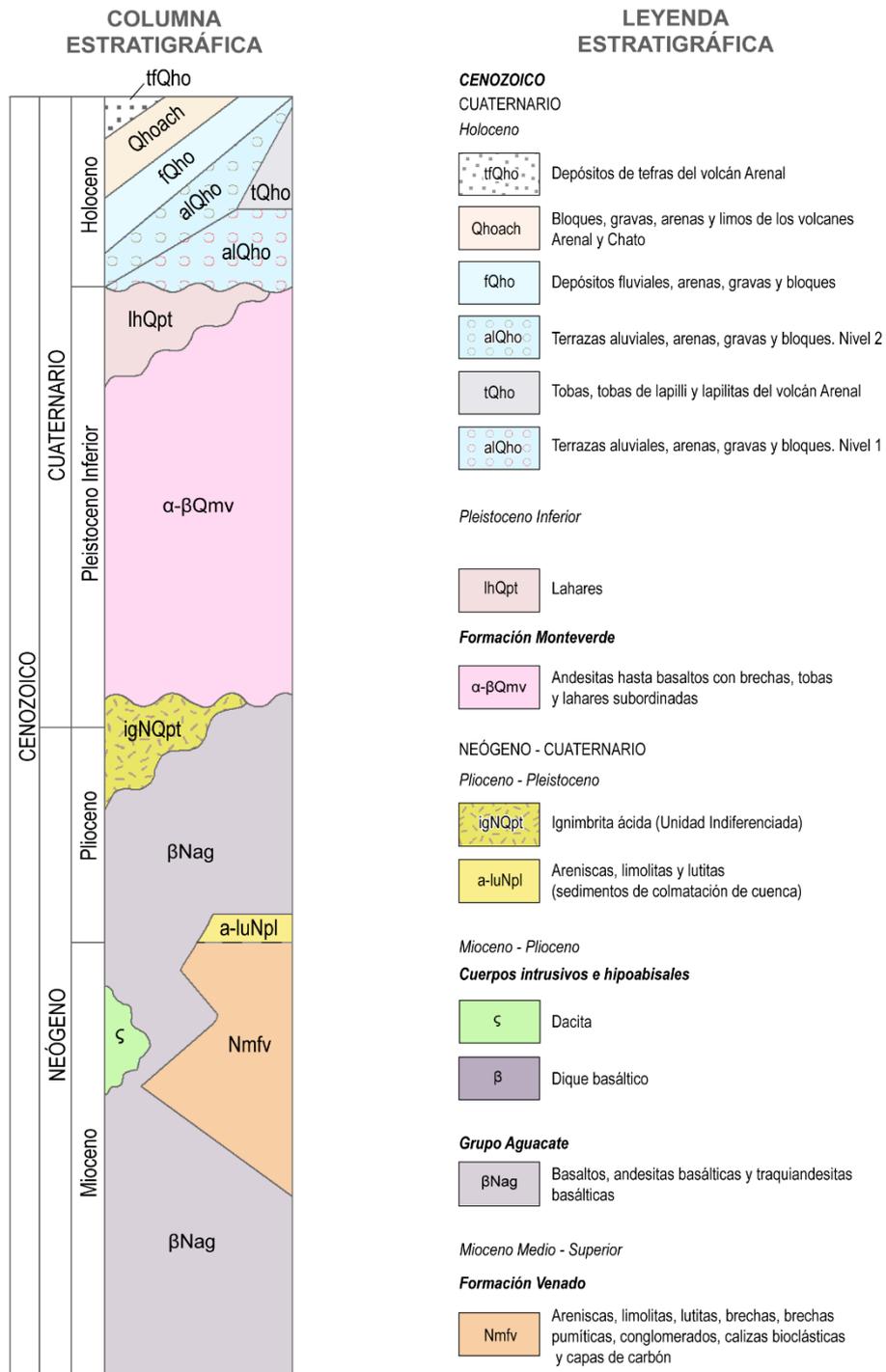


Figura 5.22 Direcciones de rumbo (rosa de rumbos) y buzamientos (diagrama de polos en red estereográfica de igual área) de todas las diaclasas medidas durante el trabajo de campo del área de estudio [Diagrama Stereonet 10.1.0, según Allmendinger et al., 2013 y Cardoso & Allmendinger, 2013].

6. HISTORIA GEOLÓGICA

Durante el Mioceno y Plioceno Inferior se presenta un vulcanismo intenso del arco volcánico (volcanismo de Aguacate), constituido por flujos de lava basálticas hasta andesíticas, flujos piroclásticos ácidos, tobas, brechas y sedimentos volcanoclásticos. Durante el Mioceno Medio se desarrolla una sedimentación clástica y carbonatada de ambiente somero (plataforma) y litoral (Formación Venado), en los márgenes de un arco volcánico activo (margen sur de la Cuenca de San Carlos), considerada una cuenca extensional intra-arco, cuya deformación tectónica se atribuye a fallas normales con formación de grábenes típico de una cuenca de rift. La cuenca se origina con una fase tectónica de fallas normales, lístricas y estructuras roll over de rumbo NO-SE del periodo sin-rift (Eoceno – Mioceno Medio) (Durán et al. 2017). Durante el Mioceno Medio-Superior ocurriría una importante reorganización tectónica, donde el inicio de la convergencia ortogonal desencadenó un periodo contraccional en todo el territorio de Costa Rica (Mescua et al., 2017), lo cual desarrolló un patrón complejo de fallas inversas y plegamiento con rumbo dominante E-W. Estos corrimientos con tendencias E-W, podrían ser el resultado de la reactivación de estructuras preexistentes (Mescua et al., 2017), asociadas a una inversión tectónica positiva (Durán et al. 2017). Esta fase compresiva corresponde con sobre-corrimientos y pliegues asociados con rumbo E-O e intrusiones hipoabisales (Mioceno Superior – Plioceno), desarrollado durante el periodo post-rift (Astorga, 1992; Ballesterero et al., 1995; Barboza et al., 1997; Gazel et al., 2005). El vulcanismo de esta fase en el área se manifiesta por la presencia de numerosos cuerpos ígneos de composición basáltica, andesítica basáltica, traquiandesitas basálticas y dacitas. La sedimentación del Mioceno Medio y Superior de la Formación Venado está constituida principalmente por areniscas, limolitas, lutitas y calizas todo el conjunto con faunas de moluscos, artrópodos, equinodermos, balánidos, coloenterata, lumuquelas, ostras, ostrácodos, pelecípedos y foraminíferos bentónicos y plantónicos. Así también como la presencia de lentes de carbón. Durante el Plioceno Inferior ya con el cierre del istmo, se desarrolla una sedimentación de colmatación de la cuenca, expuesta en algunos sitios del área. Una discordancia angular observada entre la sedimentación del Mioceno y Plioceno marca el cambio y que posiblemente se asocia con el evento tectónico regional documentado de finales del Mioceno e inicios del Plioceno. Se desarrolla también durante este periodo flujos piroclásticos de composición intermedia – ácida que cubren la sedimentación del Mioceno y Plioceno. Durante el Pleistoceno Inferior a Medio se desarrolla la Formación Monteverde, constituida por flujos de lava andesítica y basáltica, con asociaciones de brechas, tobas y lahares subordinados. La mayor parte de esta formación en el área forma suelos residuales laterizados. Hacia el Pleistoceno Superior se tiene el desarrollo de flujos de lahar pertenecientes a la Formación Buena Vista, los cuales ocupan en su momento las depresiones de las

cuencas de los ríos principales, su mejor exposición es a lo largo de la cuenca alta y media del río Arenal, donde forman brechas volcánicas muy endurecidas. El Holoceno se caracteriza por la presencia de depósitos piroclásticos de caída de la actividad histórica del volcán Arenal en el sector suroeste de la hoja, así como la formación de sedimentos aluviales y fluviales principalmente en el sector sureste y noroeste de la hoja.



7. GEOLOGÍA ECONÓMICA

Los recursos geológicos de interés económico en el área se limitan a la minería no metálica (extracción de materiales pétreos) en canteras y ríos. También existió en el pasado la extracción de carbón en los sedimentos de la Formación Venado, de lo que se tiene reporte en forma artesanal muy posiblemente con fines domésticos. En el área se ubican tres tajos, dos en roca ígnea (uno con expediente N°2700 y otro ilegal), y un tercero en materiales aluviales vigente (N°2651). Otros sitios de extracción en cauces de dominio público donde se extraen materiales aluviales se ubican en el sector sureste de la hoja (6 en total).

7.1 Rocas ígneas

El principal recurso geológico identificado durante la cartografía geológica que podría ser de interés económico, son las rocas ígneas que fueron mapeadas como una serie de cuerpos ígneos subvolcánicos en diferentes sitios del cuadrante suroeste de la hoja. Estas rocas por lo general están poco alteradas y son de muy alta resistencia mecánica, por lo que constituye un material de muy alta calidad para ser utilizado como agregado industrial, en tanto se le dé un procesamiento adecuado (Figura 7.1). Sin embargo, la mayoría de estos sitios se ubican en áreas que no son de fácil acceso, por ejemplo cauces de ríos, y por tanto pueden no ser un prospecto viable. Todo dependerá de la demanda local o regional para este tipo de material. Además, las características genéticas de esta formación geológica no parecen indicar mucha continuidad y por tanto requeriría de estudios de factibilidad en cuanto a reservas.

7.2 Hidrogeología

Se tiene registro de 38 pozos para extracción de agua subterránea en el área de la hoja, con profundidades que varían entre los 21 y 200 metros (Tabla 7.1). Los caudales de explotación reportados varía entre los 0,5 – 50 l/s. En general estos pozos extraen agua subterránea de profundidad somera a intermedia, la mayoría de profundidad intermedia entre los 50 – 100 metros con caudales entre los 0,5 – 5 l/s. De los 38 pozos, el 71% explota acuífero volcánico (roca ígnea o material volcanoclástico), y el 29% explota acuífero aluvial (gravas y/o arenas).

El pozo Monterrey I [620 m, PCIAC/RECOPE (1987-1988)], localizado en el campo mantiene una surgencia regulada con una válvula de aproximadamente 1 l/s, y con temperatura del agua en 38 – 40°C. Existen otros dos pozos, el My-27 y My-28 (Tabla 7.1) que también reportan agua con temperatura de 38°C.

Durante el trabajo de campo se reconocieron manifestaciones de salida de agua subterránea en al menos en 11 sitios y 2 en los registros del SENARA (2015). Estos forman manantiales de bajo caudal, zonas de suamos y pequeñas lagunas que son alimentadas por flujos de agua sub-superficiales, que

se interpretan por infiltración y escorrentía sub-superficial donde la condición climática de la zona juega un rol importante (Figuras 7.2, 7.3 y 7.4).

Los datos anteriores indican que en la zona existe un potencial de agua subterránea no despreciable de profundidad somera a intermedia, principalmente en materiales de origen volcánico y aluvial. Así mismo, a mayor profundidad >500 metros podría existir recursos de aguas termales.

NUM_POZO	AGUAUSO	CAUDAL	PROFUNDIDA	Y	X	ALTITUD
MY-1	ABAST. PUBLICO	9.50	21.00	275800	480600	
MY-10	DOMEST-RIEGO	3.50	160.00	276100	459300	
MY-11	DOMESTICO	0.50		275950	460450	
MY-12	RIEGO	2.00	82.00	276100	460175	
MY-13	DOMESTICO	0.50		275950	460050	
MY-14	DOMESTICO	2.50	80.00	275700	460875	340.00
MY-15	DOMESTICO	2.00	91.00	289950	477750	0.00
MY-16	VARIOS	3.00	60.00	276250	480850	
MY-17	TURISTICO	3.00	35.00	275560	461100	
MY-18	RIEGO-TURISMO	0.30	24.40	275765	461085	
MY-19	DOMEST-RIEGO	2.80	70.00	284000	466320	
MY-2	DOMESTICO	1.26	70.00	290100	458750	
MY-20	TURISTICO	2.00	85.00	276055	461700	
MY-21	TURISTICO	2.00	75.00	275949	460337	
MY-22	DOMESTICO	0.50	60.00	275830	460367	
MY-23	TURISTICO	1.00	50.00	276033	460779	
MY-24	TURISTICO	2.00	50.00	275812	460508	
MY-25	DOMEST-RIEGO	1.50	90.00	287075	469002	
MY-26	TURISTICO	3.00	65.00	276575	459116	
MY-27	TURISTICO	50.00	60.00	277150	461200	
MY-28	TURISTICO	30.00	40.00	276900	460900	
MY-29	RIEG_DOM_TUR	3.00	70.00	276164	461080	
MY-3	DOMESTICO	2.00	40.00	287930	477650	
MY-30	DOMEST-RIEGO	2.80	60.00	275700	460754	
MY-31	RIEGO	5.00	84.00	286860	480861	
MY-32	DOMEST-RIEGO	2.00	60.00	275969	460927	
MY-33	DOMEST-RIEGO	2.00	50.00	276051	461057	
MY-35	AGROINDUSTRIAL	6.00	150.00	276894	461788	
MY-36	INDUSTRIAL	2.00	50.00	285834	480752	110.00
MY-37	Turístico	2	200	276143	460926	380
MY-38	Agroindustrial	6.5		277377	479304	80
MY-39	Agroindustrial	3.33		291720	479907	
MY-4	DOMEST-RIEGO	2.00	50.00	283130	454826	
MY-5	ABAST. PUBLICO	9.50		292800	465330	
MY-6	DOMESTICO	2.20	80.00	288900	478800	
MY-7	AGROINDUSTRIAL			290350	478600	
MY-8	DOMESTICO	2.00	90.00	289650	477250	
MY-9	DOMESTICO	0.50	70.00	285929	480652	

Tabla 7.1 Registro de pozos utilizados para extracción de agua subterránea en la Hoja Monterrey (Fuente: AyA)

7.3 Hidrocarburos

La campaña de exploración de hidrocarburos [PCIAC/RECOPE (1987-1988)] y Barboza & Segura (1998) reportan la presencia de hidrocarburos en cuatro sitios al oeste de Patate y noroeste de Monterrey. Durante el trabajo de campo se localizó un sitio correspondiente a esta área donde se han reportado las manifestaciones. En el mapa geológico cerca del sitio del pozo Monterrey II, se ubica el sitio donde se determinó la presencia de salida de aceite y gas en un pequeño yurro. La manifestación se da con la presencia de una sustancia aceitosa en la superficie del agua y burbujas de gas. El sitio se ubica a unos 80 metros al noreste del pozo Monterrey II [320 m, PCIAC/RECOPE (1987-1988)]. Es muy posible que estas manifestaciones de hidrocarburos en esta área estén siendo migradas desde la cuenca hacia las zonas marginales o bordes de la cuenca a través de zonas de falla.



Figura 7.1 Vulcanismo de la Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate) en el sitio My467 (coordenadas 1167349,80 – 417345,01), cercanías del pueblo de Venado camino que conduce a La Tigra, área de cinturón de empate de la hoja. A) Talud vertical expuesto cerca del camino de roca ígnea muy resistente; B) Acercamiento al talud que muestra las características de muy alta dureza y resistencia de esta litología.



Figura 7.2 Manifestaciones de agua subterránea en forma de manantiales en niveles sub-superficiales, sitio My728 (coordenadas 1160934,55 – 421788,1267) de la cuenca media – alta del río Arenal. A) Muestra el talud en depósitos piroclásticos del volcán Arenal donde se da la manifestación; B) un acercamiento al afloramiento de agua como escorrentía sub-superficial.



Figura 7.3 Área de suampo y saturación del suelo producto del drenaje de escorrentías sub-superficiales, sitio My735 (coordenadas 1173320,976 – 421320,0638) sector noroeste de Jicarito. Estos drenajes en algunos sectores del noreste de la hoja forman pequeñas lagunas que son alimentadas durante la época lluviosa.



Figura 7.4 Drenaje de escorrentía sub-superficial que forma pequeños manantiales, sitio My740 (coordenadas 1171462,958 – 424002,0015), sector sureste de Jicarito.

8. RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS

8.1 Minerales metálicos / no metálicos

Como se mencionó en el apartado 6.1, los recursos minerales disponibles en el área que pueden ser de interés económico son los no metálicos asociados a roca volcánica. Estas rocas se calcula afloran en un área de 4,9 km², pertenecientes al vulcanismo de la Formación Grifo Alto del Grupo Aguacate. La Tabla 8.1 resume los principales sitios donde se observaron estos materiales. La mayoría de estos sitios se localizaron en cauces de río, por lo que habría que realizar un estudio de factibilidad dependiendo de la demanda para este tipo de material.

8.2 Recursos energéticos

La ocurrencia de carbón e hidrocarburos en el área de estudio como se mencionó en el apartado 7.3, no representan prospectos económicamente atractivos. En el caso del carbón se presentan como capas subordinadas, con espesores no mayores a los 2 o 3 metros solo en unos pocos casos observados, además sin continuidad aparente, y no como yacimientos de consideración. En el caso de hidrocarburos existen manifestaciones en los alrededores de Pataste Arriba (noroeste de Monterrey) y los pozos Monterrey I y II, área también de ocurrencia de madera fósil, invertebrados y vertebrados fósiles. De igual forma, estas ocurrencias no constituyen prospectos de interés, ya que posiblemente son manifestaciones en superficie producto de la migración a través de las zonas de falla desde la cuenca.

Punto Afloramiento	Norte (m)	Este (m)	Elevación (msnm)	Tipo de roca	Localidad administrativa (Distrito)	Morfología	Mineralogía	Petrología	Observaciones	SD
M212	1166013,30	418639,54	288,67	Dacita	Venado	Cerro-talud	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	Tajo ilegal	X
M251	1168572,11	417136,19	312,22	Andesita basáltica	Venado	Cerro-talud	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	Tajo Exp. 2018-CAN-PRH-021, en trámite de otorgamiento. Cinturón de empate.	X
M253	1167480,44	419477,77	277,62	Basalto	Venado	Cerro-talud	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	Tajo Exp. 2700, archivado	
M262	1164735,64	417577,10	330,85	Dacita	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	río Nilo, cinturón de empate	X
M263	1164615,81	417639,31	335,10	Dacita	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	río Nilo, cinturón de empate	
M264	1164565,53	417757,29	343,01	Dacita	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	río Nilo, cinturón de empate	
M265	1164550,72	417752,22	348,47	Dacita	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río Nilo, cinturón de empate	X
M266	1164527,50	417749,21	349,50	Dacita	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río Nilo, cinturón de empate	
M274	1164431,06	417700,38	372,13	Dacita	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino/Toleítico	río Nilo, cinturón de empate	X
M276	1164386,45	417710,56	378,34	Dacita	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino/Toleítico	río Nilo, cinturón de empate	
M291	1166001,93	418071,47	303,79	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río Nilo, cinturón de empate	X
M292	1166099,12	417993,33	275,95	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río Nilo, cinturón de empate	X
M293	1166212,02	418242,49	273,17	Dique basáltico	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río Nilo	X
M317	1168785,13	423055,29	298,68	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	río Jicarito	X
M318	1168840,64	423162,78	292,07	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	río Jicarito	X
M321	1169079,47	423297,49	286,74	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	río Jicarito	X
M322	1169425,43	423311,51	260,62	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	río Jicarito	
M323	1169669,42	423366,55	235,69	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	río Jicarito	
M374	1166643,69	418491,20	241,30	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río Nilo	X
M377	1170159,32	418072,67	183,61	Basalto	Venado	Cerro-talud	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	Sobre camino, 3 km norte de Venado, cinturón de empate	X
M378	1168794,32	417091,10	271,22	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	Quebrada La Mina	X
M379	1160258,89	434952,69	126,11	Andesita	Fortuna	Cerro-talud	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	Tajo Exp.2592 vigente, 2 km noroeste del El Tanque. Tasa extracción 3500 m ³ . Cinturón de empate	X
M397	1169669,46	418476,53	175,62	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río La Muerte	
M444	1166225,20	427938,91	355,69	Andesita basáltica	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río Purgatorio	X
M452	1162949,89	422256,38	496,51	Traquiandesita basáltica	Monterrey	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	Afluente del río Arenal, Alterado	X
M461	1169887,08	418223,26	171,20	Andesita basáltica	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río La Muerte	X
M467	1167349,80	417345,01	283,00	Andesita basáltica	Venado	Cerro-talud	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	Noroeste de Venado, camino hacia La Tigra. Cinturón de empate.	X
M468	1167273,47	417489,52	304,67	Andesita basáltica	Venado	Cerro	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	Noroeste de Venado, camino hacia La Tigra. Cinturón de empate.	
M477	1166583,43	418387,96	288,2	Basalto	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Toleítico	río Nilo	
M616	1165582,92	418916,965	333	Dacita	Venado	Cauce de río	Si / Qz / Ferromagnesianos	Calco-alcalino	Quebrada Danta, alterado	

Tabla 8.1 Resumen de los sitios donde se observó material volcánico que puede ser de interés económico para explotación de agregados industriales.

9. HIDROGEOLOGÍA

Según la información del apartado 7.2, los depósitos de terrazas aluviales del sector sureste de la hoja, presentan un potencial de aguas subterráneas, a profundidades relativamente someras, producto de la infiltración, drenaje y escorrentía desde áreas de mayor elevación y de la cuenca del río Arenal. La porosidad y permeabilidad de estos materiales favorecen esta condición. La presencia de nacientes fue observada en varios sitios de la hoja que favorecen estas condiciones de infiltración y drenaje en la Hoja Monterrey.

Las rocas volcánicas de los volcanes Arenal y Chato, en el sector sur del río Arenal, pueden constituir un recurso de aguas subterráneas a profundidades someras e intermedias (25 – 200 metros), tanto en depósitos de paleoaluviones como rocas piroclásticas y lavas fracturadas.

Las rocas volcánicas de la Formación Monteverde del sector norte y noreste de la hoja, eventualmente pueden constituir un recurso de agua subterránea a profundidades intermedias ≥ 100 metros o más someras, en lavas sanas fracturadas que reciben aporte por infiltración y drenaje subterráneo del norte y las áreas circundantes.

10. PUNTOS DE INTERÉS GEOLÓGICO

En el área existen dos sitios que podrían ser de interés geológico. El sitio My265 (Apartado 3.2.1; Figura 10.1) en la cuenca alta del río Nilo, donde afloran dacitas con la estructura típica de disyunción columnar en la parte superior y brecha basal en la parte inferior por la mecánica del movimiento del flujo de lava dacítica. Este punto, en un talud vertical de la margen derecha del río Nilo, constituye hasta donde se pudo observar, el único punto con estas características de buena exposición y de un cuerpo ígneo hipoabisal.

El otro sitio que podría ser de interés geológico, es el área circundante de Pataste Arriba, al noroeste de Monterrey. Constituye un área de 3,5 km² donde se tiene la ocurrencia de invertebrados fósiles, vertebrados fósiles (dientes de caballo), madera fósil y presencia de hidrocarburos.



Figura 10.1 Dacitas con estructura típica de disyunción columnar de un cuerpo hipoabisal (sitio My265, coordenadas 1164550,72 – 417752,22), en un talud expuesto de la margen derecha del río Nilo.

11. BIBLIOGRAFÍA

ALLMENDINGER, R. W., CARDOZO, N., AND FISHER, D., 2012: Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors: Cambridge, England, Cambridge University Press, 302 pp.

ALLMENDINGER, R. W., CARDOZO, N. C., AND FISHER, D., 2013. Stereonet 10.1.0, Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289 pp.

ALOS PALSAR, 2015: High Resolution Observation Mode (dual polarization) and High Resolution Terrain Corrected ALOS Data. Alaska Satellite Facility.

ALVARADO, G.E., 1984: Aspectos Petrológicos-Geológicos de los Volcanes y Unidades Lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica.- xii + 183 págs. Escuela Centroamericana de Geología Univ. Costa Rica, San José (Tesis Lic.).

ALVARADO, G.E., KUSSMAUL, S., CHIESA, GUILLOT, P.Y., APPEL, H., WORNER, G. & RUNDLE, C., 1992: Resumen cronoestratigráfico de las rocas ígneas de Costa Rica basado en dataciones radiométricas. Journal of South American Earth Sciences, Vol.6, N°3, 151-168 pp.

ALLAN, A., 1993: Compañía Ríos Minerales S.A., Proyecto Mina Bellavista, concesión 21A. Informe geológico anual de labores.

ALVARADO, G.E., 2009: Geología de la Hoja Fortuna, Alajuela, Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, 41: 117 – 122.

ALVARADO, G.E. & GANS, P.B., 2012: Síntesis Geocronológica del Magmatismo, Metamorfismo y Metalogenia de Costa Rica, América Central. Rev. Geol. Amér. Central, 46: 7-122.

ARAUZ, A., 1983: Compañía Ríos Minerales S.A., Proyecto Mina Bellavista, concesión 21A. Informe geológico anual de labores.

ASTORGA, A., FERNÁNDEZ, J., BARBOZA, G., CAMPOS, L., OBANDO, J., AGUILAR, A. & OBANDO, L., 1991: Cuencas Sedimentarias de Costa Rica: Evolución Geodinámica y Potencial de Hidrocarburos. Rev. Geol. Amér. Central, 13: 25 – 59.

ASTORGA, A., 1992: Descubrimiento de Corteza Oceánica Mesozoica en el Norte de Costa Rica y el Sur de Nicaragua. Rev. Geol. Amér. Central, 14: 109 – 112.

BALLESTERO, L., DOBRINESCU, M., JAGER, G. & MAYERS, I., 1995: An Intregrated Geological and Geophysical Interpretation of the San Carlos Basin, Costa Rica. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Energy and Mineral Potential of the Central American-

Caribbean Regions, Miller, R.L., Escalante, G., Reinemund, J.A. & Bergin, J. (eds.), Earth Science Series, 16: 95 – 1003.

BARBOZA, G., FERNÁNDEZ, J., BARRIENTOS, J. & BOTTAZI, G., 1997: Costa Rica: Petroleum geology of the Caribbean margin. *The Leading Edge*, 16 (12): 1787-1794.

BARBOZA, G. & SEGURA, G., 1998: San Carlos Basin Time Structure Map on Blue Horizon Top of Miocene. Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

BELLON, H., & TOURNON, J., 1978: Contribution de la geochronometrie K-Ar a l'étude du magmatisme de Costa Rica, Amerique Centrale. *Bulletin de La Societe Geologique de France*, S7-XX(6), 955–959. doi:10.2113/gssgfbull.s7-xx.6.955

BERMÚDEZ, M., 2005: Regiones climáticas de Costa Rica, Capítulo 4: en *Historia Natural de Costa Rica*, Instituto Nacional de Aprendizaje.

CALVO, V. & BOLZ, A., 1987: La secuencia de Venado, un estuario lagunar del Mioceno Medio, San Carlos, Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 6: 1-24.

CALVO, C., & BOLZ, A., 1994: The oldest calcalkaline island arc volcanism in Costa Rica. Marine tephra deposits from the Loma Chumico Formation (Albian to Campanian). *Geology of an Evolving Island Arc*, 7, 235-264.

CARDOSO, N & ALLMENDINGER, R.W., 2013: Spherical projections with OSXStereonet *Computers & Geosciences*, v. 51, no. 0, p. 193 – 205, doi:10.1016/j.cageo.2012.07.021

CHAVES, R. & SÁENZ, R., 1974: *Geología de la Cordillera de Tilarán*. Ministerio de Economía Industria y Comercio, Dirección de Geología, Minas y Petróleo, San José, Costa Rica, Bol. N°53, 49 p.

CIGOLINI, C. & CHAVES, R., 1986: Geological, petrochemical and metallogenic characteristics of the Costa Rica gold belt: contribution to new explorations. *Geologische Rundschau* 75/3, Stuttgart, 737 – 754 pp.....

COSTA RICA AIRBORNE RESEARCH AND TECHNOLOGY APPLICATIONS (CARTA), 2005: *Fotos aéreas del área de la Hoja Monterrey*. Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT).

DENGO, G., 1962: *Estudio Geológico de la Región de Guanacaste*, Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas, Instituto Geográfico de Costa Rica, San José, Costa Rica, 121 p.

DENYER, P. & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 12: 1-59.

DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G.E., 2003: Atlas Tectónico de Costa Rica, San José, Ed. Univ. de Costa Rica, 81 pp.

DENYER, P. & ALVARADO, G., 2007: Mapa Geológico de Costa Rica, Librería Francesa, 1:400 000.

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA Y MINAS (MINAE), 2017: Lineamientos y Estándares del Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1: 50 000, San José, Costa Rica.

DURAN, P., PORRAS, H. & ROJAS, M., 2017: Estructura de la cuenca de San Carlos: Evidencias de inversión tectónica durante el Mioceno Superior / Plioceno en el norte de Costa Rica. Manuscrito no publicado.

GAZEL, E., ALVARADO, G.E., OBANDO, J. & ALFARO, A., 2005: Geología y Evolución Magmática del Arco de Sarapiquí, Costa Rica. *Rev. Geol. de Amér. Central*, 32: 13-31.

GAZEL, E., CARR M.J., HOERMLE, K., FEIGENSON, M.D., SZYMANSKI, D., HAUFF, F. & VAN DEN BOGAARD, P., 2009: Galapagos-OIB signature in southern Central America: Mantle refertilization by arc-hot spot interaction, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q02S11, doi: 10.1029/2008GC002246.

GUILLOT, P-Y., CHIESA, S. & ALVARADO, G.E., 1994: Chronostratigraphy of Upper Miocene-Quaternary Volcanism in Northern Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 17: 45-53.

GIUNTA, G., NAVARRO, E., BECCALUVA, L., BELLIA, S., COMIN-CHIARAMONTI, P., DENG, G., MONTERO, W., URBANI, F., CARNEMOLLA, S., 1996: Geología de las Márgenes de la Placa Caribe: Generalidades en Guatemala, Costa Rica, La Española y Resultados Preliminares del Análisis de una Trnasversal en la Cordillera de la Costa de Venezuela. *Rev. Geol. Amér. Central*, 19/20: 7-28.

DeMETS, C., 2001: A new estimate for present-day Cocos-Caribbean Plate motion: Implications for slip along the Central American Volcanic Arc. *Geophysical Research Letters*, 28(21), 4043–4046. doi:10.1029/2001gl013518

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (I.G.N.), 1987: Hoja Cartográfica Monterrey, Edición 2-IGNCR, escala 1: 50 000.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (I.G.N.), 1985: Fotos aéreas del área de la Hoja Monterrey, escala 1: 35 000.

IMN, 2009: Atlas Climatológico de Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones.

JANOŠEK, V., FARROW, C. & ERBAN, V., 2006: Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology* 47(6): 1255-1259. doi: 10.1093/petrology/egl013

JANOŠEK, V., MOYEN, J-F., MARTIN, H.M., ERBAN, V. & FARROW, C., 2016: GCDkit 4.1. *Geochemical Modelling of Igneous Process – Principles and Recipes in R Language*. Springer Geochemistry. ISBN 978-3-662-46791-6 (ebook); doi 10.1007/978-3-662-46792-3.

KEATING, L.F., 1985: *Evaluation of the Hydrocarbon Potential of Costa Rica for Petro- Canada International Assistance Corporation*, 67 pp.

KYCL, P., ZACEK, V., CECH, S., GRYGAR, R., HRAZDIRA, P., HUAPAYA, S., KARENOVA, J., KONDROVA, L., MENDOZA, E., METELKA, V., MIXA, P., SEVCIK, J., VORE, T., HRADECKA, L., REJCHRT, M. & SVABENICKA, L., 2006-2009: *Estudio Geológico de las Hojas Miramar, Chapernal y Juntas, Costa Rica*. Servicio Geológico Checo (CGS) en cooperación con Dirección de Geología y Minas (DGM) y Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Praga – San José: 263 pp.

KUSSMAUL, S., 2000: *Estratigrafía de las Rocas Ígneas*. *Geología de Costa Rica*, Denyer, P. & Kussmaul (eds). Editorial Tecnología de Costa Rica: 63-86 pp.

LINKIMER, L. & AGUILAR, T., 2000: *Estratigrafía Sedimentaria*. *Geología de Costa Rica*, Denyer, P. & Kussmaul (eds). Editorial Tecnología de Costa Rica: 43-62 pp.

MALAVASSI, E. & MADRIGAL, R., 1970: *Reconocimiento Geológico de la Zona Norte de Costa Rica*. Ministerio de Industria y Comercio, Dirección de Geología, Minas y Petróleo y Escuela Centroamericana de Geología, N°38, 18 pp.

MALAVASSI, E. & CHAVEZ, R., 1970: *Estudio geológico regional de la zona atlántica norte de Costa Rica*, *Inf. Tecn. Notas Geol., Dir. Geol. Minas Pet. Costa Rica*, 9(35), 16.

MARRETT, R.A. & ALLMENDINGER, R.W., 1990: Kinematic analysis of fault-slip data: *Journal of Structural Geology*, v. 12, p. 973 -986.

McBIRNEY, A.R., 2007: *Igneous Petrology (Third Edition)*. Jones and Bartlett Publishers, Inc., 550 pp.

MESCUA, J.F., PORRAS, H., DURÁN, P., GIAMBIAGI, L., DE MOOR, M., CASCAMTE, M., SALAZAR, E., PROTTI, M. & POBLETE, F., 2017: Middle to Late Miocene Contractional Deformation in Costa Rica Triggered by Plate Geodynamics. *Tectonics*, 36. <https://doi.org/10.1002/2017TC004626>.

MONTERO, W., LEWIS, J.C. & ARAYA, M.C., 2017: The Guanacaste Volcanic Arc Sliver of Northwestern Costa Rica. *Scientific Reports*, 7:1797, doi:10.1038/s41598-017-01593-8.

MORELL, K., KIRBY, E., FISHER, D & VAN SOEST, M., 2012: Geomorphic and exhumational response of the Central American Volcanic Arc to Cocos Ridge subduction. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, B04409, doi:10.1029/2011JB008969, 2012

OBANDO, L., 1986: Estratigrafía de la Formación Venado y rocas sobreyacentes (Mioceno-Reciente), provincia de Alajuela, Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 5: 73-104.

PCIAC/RECOPE (PETRO-CANADA INTERNATIONAL ASSISTANCE CORPORATION for RECOPE), 1987: Normal Polarity Structure Section of Line N° 43, Veritas Seismic LTD.

PCIAC/RECOPE (PETRO-CANADA INTERNATIONAL ASSISTANCE CORPORATION for RECOPE), 1987: PCIAC Pataste #1, Final Well Report, XL Geological Consultants, 47 pp.

PCIAC/RECOPE (PETRO-CANADA INTERNATIONAL ASSISTANCE CORPORATION for RECOPE), 1988: Geological Evaluation of the Well PCIAC/Pataste #1, AHM International, 22 pp.

PCIAC/RECOPE (PETRO-CANADA INTERNATIONAL ASSISTANCE CORPORATION for RECOPE), 1988: Geological Evaluation Log of Pataste #1, XL Geological Consultants.

PCIAC/RECOPE (PETRO-CANADA INTERNATIONAL ASSISTANCE CORPORATION for RECOPE), 1987: PCIAC Tonjibe #1, Final Well Report, XL Geological Consultants, 55 pp.

PCIAC/RECOPE (PETRO-CANADA INTERNATIONAL ASSISTANCE CORPORATION for RECOPE), 1988: Geological Evaluation of the Well PCIAC/Tonjibe #1, AHM International, 20 pp.

PCIAC/RECOPE (PETRO-CANADA INTERNATIONAL ASSISTANCE CORPORATION for RECOPE), 1988: Geological Evaluation Log of Tonjibe #1, XL Geological Consultants.

PINDELL, J. L., & KENNAN, L., 2001: Kinematic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. In *Transactions of the Gulf Coast Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (GCSSEPM) 21st Annual Bob F. Perkins Research Conference, Petroleum Systems of Deep-Water Basins*, Houston, Texas, December (pp. 2-5).

PIZARRO, D., 1993: Los pozos profundos perforados en Costa Rica: Aspectos litológicos y bioestratigráficos. *Rev. Geol. Amér. Central*, 15:81-85.

PORRAS, H., DURAN, P., MESCUA, J., ROJAS., M, CASCANTE, M: The role of tectonic inversion in structural architecture of the San Carlos basin, Northern Costa Rica (10° 30' - 11°N). En preparación.

PROTTI, M., 1995: The most recent large earthquakes in Costa Rica (1990 M(w) 7.0 and 1991 M(w) 7.6) and three-dimensional crustal and upper mantle P-wave velocity structure of central Costa Rica. PhD thesis, University of California, Santa Cruz, USA.

QUESADA, R., 2007: Los Bosques de Costa Rica. IX Congreso Nacional de Ciencias. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

ROCLWELL D.W. & ASSOCIATES/RECOPE, 1985: Interpretation of Land and Marine Seismic Data for RECOPE. Final Report, Novato CA 94947, 29 pp.

RSN, 2018: Registro de sismos reportados en la Hoja Monterrey, RSN-ICE.

SEN GUPTA K., MALAVASSI, L. R. & MALAVASSI, E., 1986: Late Miocene shore in northern Costa Rica: Benthic foraminiferal record. *Geology*, v. 14, p. 218 – 220.

SOLARI, L., 2018: Informe de fechamientos por U-Pb en zircones. Universidad Autónoma de México, Centro de geociencias, Laboratorio de Estudios Isotópicos, 15 p.

TAYLOR, H., 1966: Informe interno visita a Venado. Instituto Costarricense de Electricidad.

TOURNON, J., 1984: Magmatismes du Mesozoique a l' Actuel en Amerique Centrale: L' exemple de Costa Rica, des Ophiolites aux Andesites. – 335 págs. Univ. Curie, Paris (Tesis doctoral).

TOURNON, J. & BELLON, H., 2009: The southern Central American puzzle: chronology and structure. A review. – *Rev. Geol. Amér. Central*, 40: 11 – 47.

ULLOA, F., 2000: Compañía Ríos Minerales S.A., Proyecto Mina Bellavista, concesión 21A. Anexo al programa de Explotación.

ULLOA, A., AGUILAR, T., GOICOECHEA, C. & RAMIREZ, R., 2011: Descripción, Clasificación y Aspectos Geológicos de las Zonas Kársticas de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 45: 53-74.

UCR, ACCS & INTA, 2013: Mapa digital de Suelos de Costa Rica. Recuperado de: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139

USDA & NRCS, 2006: Claves para la Taxonomía de Suelos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Décima Edición.

VAN DE KAMP, P.C., 1985: Evaluation of Stratigraphy, Source Rock Potential, Tectonics, Structure, and Reservoir Potential for Hydrocarbon Exploration in Costa Rica. GeoResources Associates, Partners Corneils Corp. Informe Interno RECOPE, 155 pp.

VARGAS, F. & ALFARO, A., 1992: Presencia de serpentinitas, basaltos alcalinos y rocas volcánicas ácidas en la zona norte-atlántica de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 14: 105-107.

WESTERN ATLAS INTERNATIONAL, INC/RECOPE, 1988: Synthesis Report on The Hydrocarbon Potential of Costa Rica, 48 pp.

ŽÁČEK., V., VOREL, T., KYCL, P., HUAPAYA, S., MIXA, P., GRYGAR, R., HAVLÍČEK, P., ČECH, S., HRAZDÍRA, P., METELKA, V., ŠEVČÍK, J. & PÉCSKAY, Z., 2012: Geología y Estratigrafía de la Hoja 3246-II Miramar, Costa Rica. *Rev. Geol. de Amér. Central*, 47: 7 – 54.