



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“ESTRATIGRAFÍA Y MORFOLOGÍA DE LOS FLUJOS DE
LAVA Y DEPÓSITOS ASOCIADOS A LA ACTIVIDAD
EFUSIVA DEL VOLCÁN TACANÁ, MÉXICO-GUATEMALA”**

T E S I S
P A R A O B T E N E R E L G R A D O D E :
MAESTRIA EN CIENCIAS (VULCANOLOGÍA)
P R E S E N T A :
CECILIA GUADALUPE LIMÓN HERNÁNDEZ

JURADO EXAMINADOR

- 1) José Luis Arce Saldaña (Director de Tesis)
- 2) Jorge Enrique Gama Castro (Presidente)
- 3) Sergio R. Rodríguez Elizarrarás (Vocal)
- 4) Lorenzo Vázquez Selem (Suplente)
- 5) José Luis Macías Vázquez (Suplente)



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico esta tesis a:

Mis padres, **Margarita Hernández y Antonio Limón**, que son la base de mi vida. Sin su apoyo y confianza nunca hubiera podido lograr este objetivo. Los amo con toda mi alma. Gracias por ser mis padres!!!!!!

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que estuvieron presentes a lo largo de este proyecto.

Le agradezco a mi tutor el Dr. José Luis Arce Saldaña, por sus enseñanzas y amistad, ya que sin su apoyo no hubiera sido posible concretar este trabajo.

A mi Comité Académico, Dr. Jorge Gama Castro, Dr. Sergio Rodríguez Elizarrarás, Dr. José Luis Macías Vázquez y Dr. Lorenzo Vázquez Selem, por el tiempo dedicado a la revisión de este escrito, así como sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar el contenido de éste trabajo. En particular al Dr. José Luis Macías Vázquez, por haberme proporcionado información bibliográfica y fotográfica, así como sus acertados comentarios a lo largo de la Maestría.

A la Dra. Elizabeth Solleiro, porque siempre tuvo tiempo para un buen consejo. Al Dr. Paul Layer de la Universidad de Alaska, Fairbanks, EUA por su apoyo con los fechamientos mediante el método de Ar-Ar.

Gracias al Posgrado en Ciencias de la Tierra (Gloria Alba, Ma. Luisa Reyes, Araceli Chaman y Adriana López) y al Instituto de Geofísica por la accesibilidad de sus instalaciones, al Instituto de Geología por la beca otorgada para culminar la tesis, a CONACYT por el apoyo económico concedido durante la maestría y a los proyectos de PAPIIT IN103205 y IN107409 a cargo del Dr. José Luis Arce Saldaña.

Agradezco inmensamente el apoyo técnico proporcionado por Patricia Girón, Fabiola Mendiola, Teodoro Hernández, Francisco Montaña, Rosario Flores, Miguel Ángel García, Manuel Velásquez, Santiago Avilés Puntos y Joaquín Aparicio. A la maestra Ana María Rocha por la revisión de redacción y estilo de este trabajo, pero principalmente por sus sugerencias y amistad.

A mis amigos, Lilia Arana, Juan Manuel Sánchez, Mario Ramos, Javier Agustín, Lorenzo Meriggi, Denis Avellan, Gema Velásquez, Elizabeth Rangel, Paola Molina, Anaid Pérez, Amiel Nieto, Araceli Reyes, Norma Dávila, Oscar Aragón, Miguel Silva, Carla González, Eduardo Pérez, Gabriela Palma y Sergio Salinas que siempre estuvieron ahí, proporcionándome su ayuda, enseñanzas y escuchándome en los momentos difíciles de esta etapa. Gracias Eli por haber sido mi compañera y amiga de campo. También agradezco a J. Hernández, por haber estado en esta última etapa, la cual ha sido difícil y me dio ánimos para continuar.

Especialmente agradezco a Rafael Hernández, por haber estado a mi lado y hacer que este sueño fuera posible. Gracias por todo...

Índice	Página
Resumen	1
Abstract	2
Capítulo 1. Introducción	3
1.1. Flujos de lava	6
1.2. Objetivo general	10
1.3. Objetivos particulares	10
1.4. Justificación	10
1.5. Metodología	12
<i>Trabajo de gabinete</i>	12
<i>Trabajo de Campo</i>	14
<i>Trabajo de laboratorio</i>	14
Capítulo 2. Antecedentes	17
2.1. Estudios previos	17
2.2. Actividad reciente del Complejo Volcánico Tacaná (CVT)	19
2.3. Geología regional	22
2.4. Geología local	23
2.5. Geomorfología	25
Capítulo 3. Estratigrafía y distribución de las lavas del volcán Tacaná	28
3.1. Estratigrafía del Complejo Volcánico Tacaná (CVT)	28
<i>Mesozoico</i>	28
<i>Terciario</i>	28
<i>Cuaternario</i>	30
<i>Pre-CVT</i>	30
<i>Caldera San Rafael</i>	30
<i>Caldera Chanjalé</i>	30
<i>Caldera Sibinal</i>	31
<i>Complejo Volcánico Tacaná (CVT)</i>	31
<i>Chichuj</i>	31
<i>Tacaná</i>	32
<i>Plan de las Ardillas</i>	33
<i>San Antonio</i>	34

3.2 Flujos de lava del volcán Tacaná	34
3.2.1. Etapa 1.....	36
3.2.2. Etapa 2.....	43
3.2.3. Etapa 3.....	49
3.3. Distribución de los flujos de lava del Tacaná	58
3.4. Morfología de los flujos de lava	60
3.4.1. Primera Etapa Eruptiva (E1)	60
3.4.2. Segunda Etapa Eruptiva (E2)	65
3.4.3. Tercera Etapa eruptiva (E3).....	68
3.5. Parámetros morfométricos de los flujos de lava	75
Capítulo 4. Petrografía y Geoquímica	80
4.1. Petrografía	80
<i>Plagioclasa</i>	82
<i>Anfíbol</i>	84
<i>Piroxenos</i>	85
<i>Olivino</i>	86
<i>Óxidos de Fe-Ti</i>	87
<i>Vidrio</i>	87
4.2. Geoquímica	88
4.2.1. Elementos mayores (diagramas de variación)	93
4.2.2. Elementos Traza	95
Capítulo 5. Discusión	97
5.1. Evolución del CVT	97
5.2. Evolución del volcán Tacaná	98
5.3. Tasa de efusión de lavas	104
5.4. Cálculo de la tasa de efusión	105
5.5. Parámetros físicos de las lavas del Tacaná	108
5.6. Implicaciones del peligro	113
Conclusiones	115
Bibliografía	117

Resumen

El Tacaná (4 080 msnm) es un estratovolcán ubicado en el extremo noroeste del Arco Volcánico Centroamericano y forma parte del Complejo Volcánico Tacaná, cuya actividad se ha caracterizado por erupciones explosivas y efusivas, que han producido diversos depósitos piroclásticos intercalados con flujos de lava distribuidos en torno al volcán. Mediante las características geomorfológicas, estratigráficas, descripciones de campo y fechamientos radiométricos, fue posible cartografiar 22 flujos de lava agrupados en tres etapas eruptivas. En general se trata de flujos de lava en bloques, masivos, con longitudes que varían de 1.3 a 5.2 km, con frentes pronunciados de hasta 20 m y *levées* bien definidos. Las tres etapas cubren un área de $\sim 27 \text{ km}^2$ y comprenden un volumen mínimo de $\sim 2.4 \text{ km}^3$, con una composición química predominantemente andesítica (57.87 a 62.43% en peso de sílice), aunque también afloran dacitas poco evolucionadas (63.3% en peso de SiO_2), así como enclaves máficos (54.55% en peso de SiO_2). La mineralogía de la mayoría de las lavas es de fenocristales de $\text{Plg} > \text{Anf} > \text{Px} > \text{óxidos de Fe-Ti} \pm \text{Ol}$ inmersos en una matriz microlítica y en ocasiones vítrea. La actividad efusiva en el Tacaná inició hace $30\,900 \pm 3\,700$ años, con la emisión de ocho flujos de lava correspondientes a la Etapa 1. Posteriormente el edificio volcánico sufrió un colapso en el flanco suroeste, generando una avalancha de escombros, seguida por la emisión de seis flujos de lava de la Etapa 2, emplazadas dentro del cráter de colapso de la avalancha Agua Caliente. Finalmente la actividad efusiva, culminó con la emisión de ocho flujos de lava correspondientes a la Etapa 3, con edades de más de $370 +80/-75$ años A.P. La tasa de efusión de las lavas varía de 0.25 a $6.89 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiendo a erupciones tranquilas, de duración corta y poca longitud, representando un peligro bajo para las poblaciones asentadas en un radio de 6 km, sin embargo capaces de destruir todo a su paso.

Abstract

Tacaná volcano (4 080 masl) is located in the northwestern end of the Central America Volcanic Arc. It represents the tallest structure of the Tacaná Volcanic Complex. Its volcanic activity has been characterized by mixed effusive and explosive eruptions that have emplaced interbedded lava flows and pyroclastic deposits around the volcano. Based on geomorphological features, detail mapping and stratigraphy of the volcano flanks we recognized 22 lava flow units that were grouped into three eruptive stages the past 31 ka. In general, the lava flows are massive and blocky and vary from 1.3 to 5.2 km in length, with terminal fronts up to 20 m high and *levées*. These stages cover a total of ~ 27 km² and a minimum volume of ~ 2.4 km³, with predominantly andesitic compositions (57.87 to 62.43 wt.% silica), a few evolved dacites (63.3 wt.% SiO₂), and mafic enclaves (54.55 wt.% SiO₂). A common mineral assemblage is represented by phenocrysts of Plg>Amph>Px>Fe-Ti oxides \pm Ol, immersed in a microlitic and sometimes glassy matrix. Effusive activity at Tacaná started $30,900 \pm 3,700$ yr B.P., with the emission of eight lava flows (Stage 1). This activity was interrupted around ~ 15 ka by a NW sector collapse of the volcano that emplaced the Agua Caliente debris avalanche. The volcano began a new emission of six lava flows (Stage 2) that partially filled the amphitheater left by the sector collapse. Finally, effusive activity restarted through the emission of eighth lava flows (Stage 3) ending around $370 +80/-75$ yr B.P. Lava flow effusion rates vary from 0.25 to 6.89 m³/s, that correspond to shorted-lived, calm eruptions as those of Volcán de Colima that produced lava flows with short-runouts. Today this type of eruptions represent a low hazard for people living within a radio of 6 km from the Tacaná summit (>7 000 inhabitants) although these flows are capable of destroying everything through their paths.

Capítulo 1. Introducción

El volcán Tacaná (4 080 msnm) es un estratovolcán de composición andesítica, que se ubica en el extremo noroeste del Arco Volcánico Centroamericano (AVCA) (Fig. 1.1), formando parte del Complejo Volcánico Tacaná (CVT). Dicho complejo está conformado por cuatro estructuras volcánicas, alineadas en dirección NW-SE (Chichuj, Tacaná, domo Plan de las Ardillas y San Antonio) como se muestra en la figura 1.2. Este complejo fue emplazado durante los últimos 100 000 años, dentro de los remanentes de una caldera denominada San Rafael, fechada en 2 Ma (García-Palomo *et al.*, 2006).

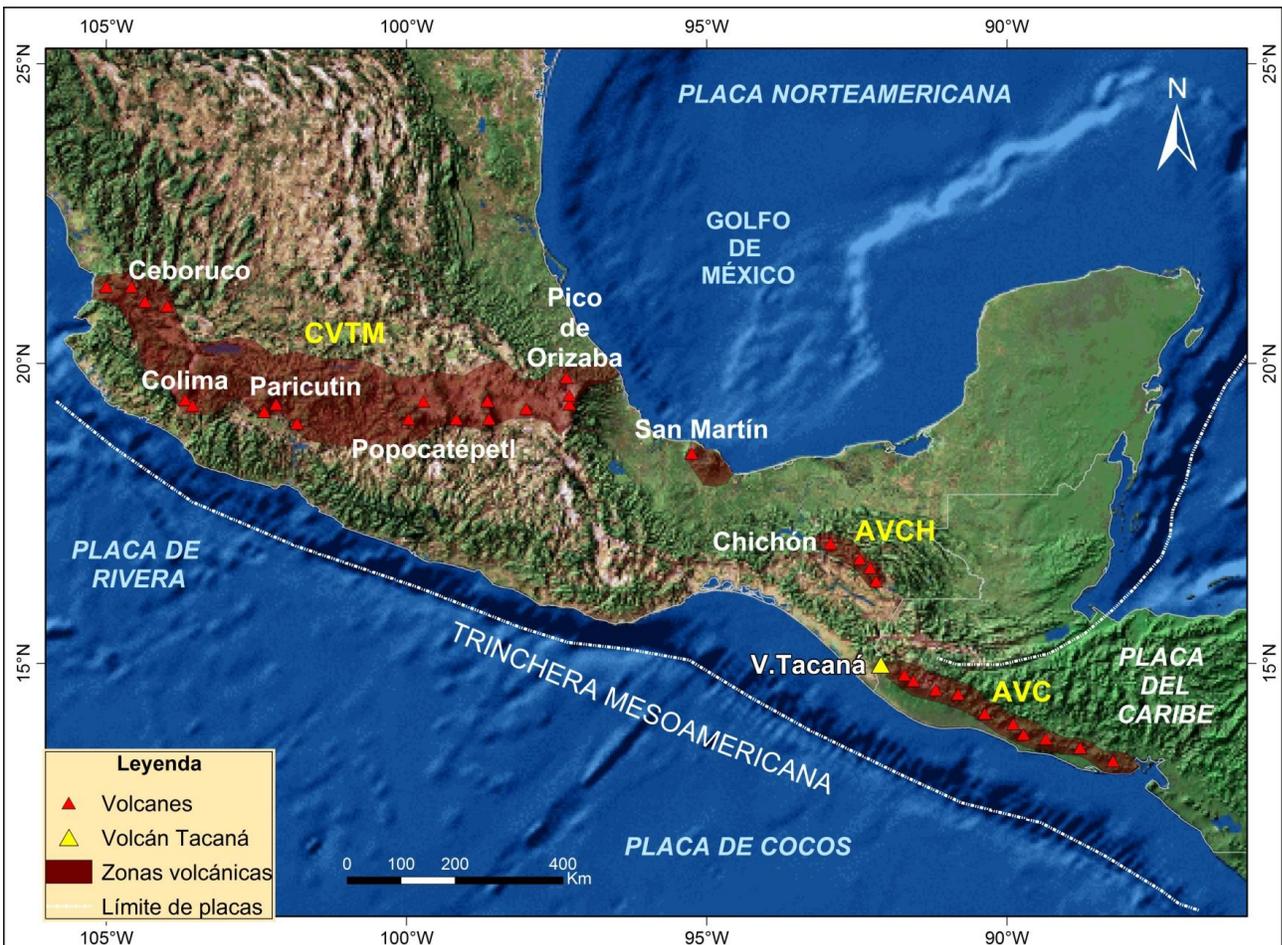


Figura 1.1. Modelo digital de relieve sombreado, generado con el programa Arc Map 9.2, donde aparece el centro y sur de México, así como la localización del volcán Tacaná con respecto a los rasgos más sobresalientes de la región. Abreviaturas: Arco Volcánico Centroamericano (AVCA), Arco Volcánico Chiapaneco (AVCH) y en el centro de la República Mexicana el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM).

El Tacaná (15°08'N y 92° 06'W) se localiza en la frontera sureste de la República Mexicana, en el estado de Chiapas, a una distancia de 30 km al NE de la ciudad de Tapachula y en la parte noroeste de la República de Guatemala. Está ubicado a una distancia de 6.8 km de Sibinal, población guatemalteca de mayor importancia, en el Departamento de San Marcos.

El origen del CVT (así como el AVCA) se debe a la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa del Caribe, que junto con la Placa de Norteamérica crean un punto de unión triple (Guzmán-Speziale *et al.*, 1989). Datos químicos publicados de las rocas, tanto del volcán Tacaná como de las otras estructuras, indican que los productos volcánicos tienen afinidad calcialcalina (Mercado y Rose, 1992; Mora *et al.*, 2004; García-Palomo *et al.*, 2006; Macías *et al.*, 2010).

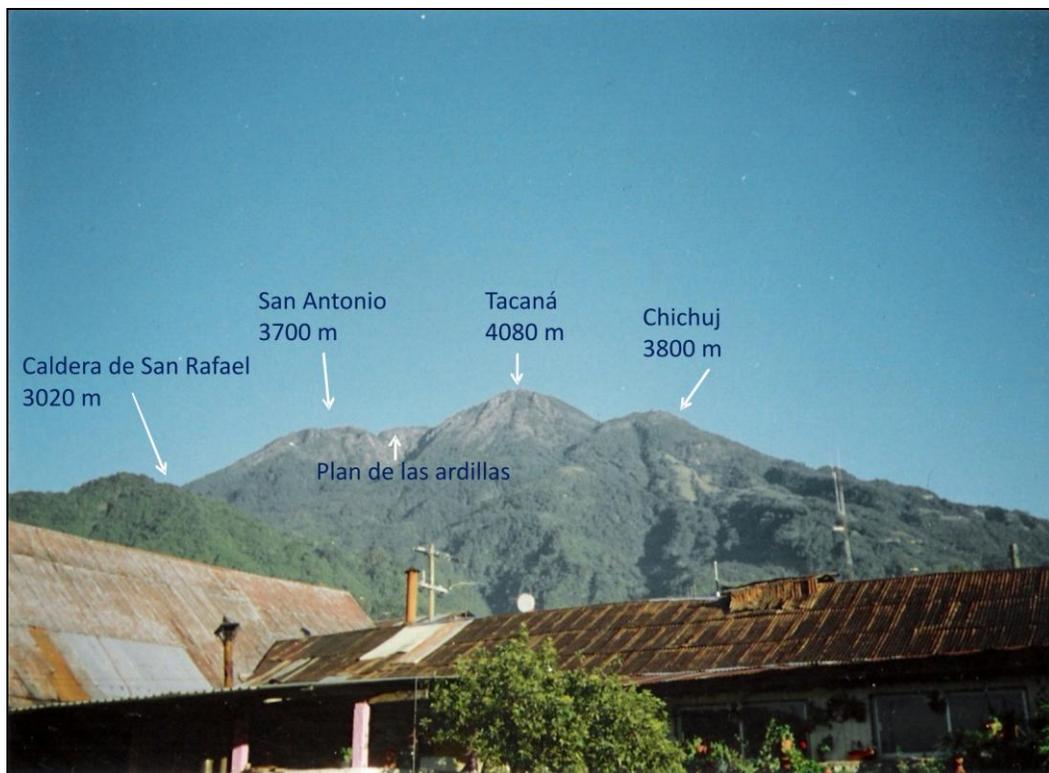


Figura 1.2. Vista panorámica del Complejo Volcánico Tacaná, desde el poblado de Unión Juárez, Chiapas, México, donde se pueden observar las cuatro estructuras que conforman el CVT.

La actividad volcánica del Tacaná, se ha caracterizado por una alternancia de erupciones explosivas y efusivas, que han dejado como resultado diversos depósitos piroclásticos, de avalancha de escombros intercalados con flujos de lava, todos éstos emplazados en los alrededores del cono principal del Tacaná. Con base en la fotointerpretación y trabajo de campo, así como la compilación de información cartográfica y bibliográfica, fue posible llevar a cabo un mapa de la distribución de los derrames de lava del volcán Tacaná, así como un muestreo para análisis petrográfico y químico de roca total. Cabe destacar que la actividad efusiva, ha ocurrido a lo largo de toda la historia eruptiva del Tacaná, ya que se han observado lavas con una cubierta importante de piroclastos, suelos, así como por depósitos de avalancha de escombros, mientras que otras lavas y domos se observan sin desarrollo de suelo, lo que sugiere una edad relativamente reciente, ya que lavas cercanas y con la misma exposición a estas unidades, presentan características distintas, con mayor desarrollo de suelo y vegetación.

La mayoría de los trabajos realizados sobre al CVT, se han enfocado a los productos piroclásticos (Mercado y Rose, 1992; Espíndola *et al.*, 1989; Macías *et al.*, 2000; Ordaz, 2006; Borjas, 2006; Macías *et al.*, 2010), sismología, geología general y ambiente estructural (Espíndola *et al.*, 1993; García-Palomo *et al.*, 2006) y no se ha llevado a cabo ningún trabajo sobre la actividad efusiva de dicho volcán.

1.1. Flujos de lava

Las erupciones volcánicas son las manifestaciones más poderosas de la energía existente en el interior de la Tierra. Se reconocen ~60 000 volcanes activos en todo el mundo y cada año 50 de éstos entran en erupción (Gutiérrez, 2008), afectando la vida y las propiedades de millones de personas. Por otro lado, las personas también se ven beneficiadas de la actividad volcánica, por este motivo se encuentran grandes asentamientos humanos en las faldas de los volcanes, ya sean activos, extintos o dormidos, como por ejemplo la ciudad de Tapachula ubicada a 30 km al SW de la cima del activo volcán Tacaná.

La actividad volcánica se puede clasificar en efusiva y explosiva (Tilling, 1993), la cual está determinada por distintas condiciones relacionadas a las propiedades físicas del magma y cómo es su ascenso a la superficie, así como características morfológicas de la estructura y del conducto del volcán (Gutiérrez, 2008). Durante la actividad efusiva se generan flujos de lava, con distintas morfologías (aa, pahoehoe, en bloque), dependiendo de las propiedades reológicas del flujo, siendo las más importantes la viscosidad, la composición química y la temperatura, así como otros agentes externos como la topografía y la pendiente del terreno sobre el cual se emplaza el flujo (Gutiérrez, 2008). Estos parámetros también determinan la velocidad y extensión (área cubierta y longitud) de los flujos de lava. Otros parámetros importantes que repercuten en la velocidad y extensión de los flujos de lava son el volumen y la tasa de emisión (Kilburn, 2000). La extensión que alcanzan los flujos de lava individuales puede variar de metros a kilómetros, así como el tiempo de emisión, que puede ser de pocas horas hasta años (Kilburn, 2000).

Con base en la composición química se pueden agrupar distintos tipos de lava (Kilburn, 2000), las lavas básicas pobres en sílice (<57 % en peso), de temperatura relativamente elevada (1200°C) y baja viscosidad, originan flujos de lava que pueden desplazarse a decenas de kilómetros, mientras que las lavas ácidas, ricas en sílice (>57 % en peso), de temperatura relativamente baja (800-900°C) y viscosidad alta, dan lugar a flujos de lava que fluyen lentamente y alcanzan poca extensión (Gutiérrez, 2008).

Flujos de lava basálticas

Las lavas basálticas tienen una temperatura típica de 1200°C, con velocidades promedio de 25-75 km/hora (Gutiérrez, 2008), pero esta velocidad disminuye por la liberación de volátiles y además sufre enfriamiento debido al contacto con la atmósfera, formando una costra provocando que la parte interna de la lava aumente su viscosidad y fluya con mayor lentitud, al igual que el frente del flujo. Dicho flujo puede tomar una forma longitudinal, donde sus bordes se enfrían y la lava se canaliza, dejando paredes sub-verticales denominados *levees* (Kilburn, 2000).

Dentro de esta clasificación se diferencian dos tipos de lavas, la **aa** y **pahoehoe**, cuyos nombres son de origen hawaiano, estas lavas muestran una tendencia de evolución simple. Las lavas aa son las más frecuentes y presentan superficies rugosas y espinosas, denominadas malpaís, y tienden a avanzar en unidades simples. Los frentes de estas lavas muestran un cambio en el patrón de crecimiento, en general inician como fluido y finalizan como una masa semisólida que se fragmenta durante el avance del flujo (Kilburn, 2000). Por otra parte, se ha propuesto que las lavas aa se forman cuando la tasa de emisión es mayor de 5-10 m³/seg (Rowland y Walker, 1990). Otra variedad son las lavas en bloques, que se caracterizan por fragmentos individuales de 0.25 a >1 m (Gutiérrez, 2008), cuyos frentes alcanzan hasta 10 veces su espesor inicial conforme avanzan.

Los espesores de las lavas aa son de 20 m o menos, mientras que de las lavas en bloque llegan a alcanzar varias decenas de metros. Los mayores flujos pueden lograr volúmenes de 1-100 millones de metros cúbicos y tienden a ser emplazados en días para las lavas aa y en meses cuando son flujos de lava en bloques (Kilburn, 2000).

Las lavas pahoehoe son las menos viscosas de todos los tipos y por consiguiente, forman superficies fluidales, lisas y suaves. También al escapar el gas lentamente del flujo, se producen muchas burbujas que producen oquedades someras en superficie (Bullard 1976). La lava puede fluir en cuerpos cilíndricos, dando origen a las lavas cordadas, y debido a la plasticidad que presenta este tipo de lava son capaces de rodear todo lo que se encuentra a su paso y carbonizar troncos de árboles.

En ocasiones la diferencia entre lavas aa y pahoehoe es sutil y se ha observado que la lava pahoehoe puede cambiar a aa (Schminke, 2004), sin embargo nunca de aa a pahoehoe. Las lavas pahoehoe se originan a partir de magmas basálticos de baja viscosidad, mientras que las lavas aa se desarrollan en una amplia gama de composiciones (Gutiérrez, 2008).

Flujos de lava ácidas

Las lavas ricas en sílice y algunas lavas intermedias (riolítica, dacítica y andesítica) se comportan de manera diferente, como consecuencia de su viscosidad (Gutiérrez, 2008). En general las velocidades de desplazamiento de estas lavas son menores que las basálticas y suelen desplazarse a menos de 10 km/hr, por lo tanto estos flujos son cortos, de 1 a 2 km del punto de emisión, llegando a ser de poca distribución y gran espesor (Fink y Anderson, 2000).

Las lavas en bloques con frentes abruptos de más de 100 m de espesor son típicas de las andesitas y constan de bloques apilados. En las lavas dacíticas y riolíticas la viscosidad es mayor, por lo tanto su movimiento es más lento y tienden a formar domos, ya que emergen a la superficie y su enfriamiento es relativamente rápido. Los diámetros de los domos varían de pocos metros a varios kilómetros, llegando a tener distintas formas, como circular, elíptica o irregular con variedad de color y texturas. La tasa de efusión varía de 1 m³/s a 100 m³/s (Fink y Anderson, 2000), muchos de los cuales pueden fluir una distancia corta dando lugar a los domos de tipo “*coulée*” (Fink y Anderson, 2000).

Estos domos de lava no representan un peligro directo para las poblaciones cercanas a los volcanes, ya que éstos se desplazan muy lentamente, recorren poca distancia y generalmente se localizan en las cimas de los volcanes, el peligro asociado con los domos de lava en la mayoría de los casos, es cuando éstos obstruyen por completo el conducto del volcán y ocasionan una sobrepresión del sistema magmático, dando como resultado la actividad explosiva o bien el colapso del domo o de una parte originando flujos piroclásticos (Fink y Anderson, 2000).

Tipos de flujo vs Tasa de emisión

Existe otra clasificación de los flujos de lava de acuerdo a su complejidad, en flujos simples, flujos compuestos y campos de lava compuestos (Walker, 1973), los cuales dependen esencialmente de la tasa de emisión. Este mismo autor define que el componente más pequeño del cuerpo de lava corresponde a una unidad de flujo, definido también como “enfriamiento y solidificación considerable de la parte superior del flujo, antes de que otra unidad de flujo se sobreponga a éste (Nichols (1936). Por lo tanto se entiende que cada unidad de flujo está separada por una unidad de enfriamiento (Walker, 1973). En este sentido, un flujo de lava simple, es aquel que consiste de una a pocas unidades de flujos individuales, los cuales son de mayor longitud que de anchura (Kilburn y Lopes, 1988). Estos flujos de lava se desarrollan principalmente durante erupciones de corta duración, donde la tasa de efusión disminuye rápidamente (Wadge, 1981). Un flujo de lava compuesto, se conforma de muchas unidades de flujo (Walker, 1973). Una erupción de larga duración, puede comprender muchos flujos de lava compuestos, emplazados cada uno de éstos en un episodio eruptivo (Mattox *et al.*, 1993). Por último, los campos de lava compuestos inician con flujos de lava compuestos durante una erupción completa. Los campos de lavas compuestos pueden ser producidos por erupciones constantes con tasas de efusión baja, que duran de meses a años, logrando construir estos campos de lava que generalmente son de poca longitud (Kilburn y Lopes, 1988). Estos campos de lava también se pueden formar por erupciones de poca duración pero de varios cráteres (Wadge *et al.*, 1994).

Debido a que el emplazamiento de los flujos de lava de cualquier tipo son regidos por la gravedad, su trayectoria puede ser pronosticada con facilidad y por lo tanto es posible realizar evacuaciones de manera ordenada, sin embargo, los flujos de lava pueden enterrar, triturar o incendiar todo lo que encuentren a su paso, inclusive, dejan el suelo infértil por miles de años (Tilling, 1993).

1.2. Objetivo general

- Establecer la historia de la actividad efusiva del volcán Tacaná, cuáles han sido los alcances de los flujos de lava, volúmenes y área cubierta, con el fin de establecer la evolución del volcán, ya que las lavas fueron responsables de edificar la estructura principal.
- Determinar la distribución de los flujos de lava del volcán Tacaná, sus características morfológicas, estratigráficas, petrográficas y químicas.

1.3. Objetivos particulares

- Conocer la historia eruptiva del volcán Tacaná e identificar aquellos eventos que han generado flujos de lava.
- Describir la morfología característica de los flujos de lava.
- Establecer la distribución, espesor, alcance máximo, área y volumen de los flujos de lava.
- Obtener la edad (relativa y absoluta) y las relaciones estratigráficas de las lavas en estudio.
- Determinar la composición química y mineralógica de las lavas.
- Calcular la tasa de efusión de los flujos de lava, provenientes del edificio principal.

1.4. Justificación

Las erupciones volcánicas son un peligro natural, que mantiene en constante riesgo a las poblaciones asentadas en las cercanías de los volcanes activos, dormidos o extintos. La mayoría de las erupciones volcánicas están relacionadas con catástrofes humanas, como por ejemplo la erupción del volcán Krakatoa, Indonesia (1883), en la que perecieron 36 000 personas. En el Monte Pelée, Isla Martinica la erupción de 1902 causó 29 000 muertes (Bourseiller y Durieux, 2001), el volcán El Chichón, México hizo erupción en 1982 después

de 550 años de quietud, ocasionando la muerte de 2 000 personas y sepultando nueve comunidades cercanas al volcán (Duffield *et al.*, 1982; Báez-Jorge *et al.*, 1985; Espíndola *et al.*, 2000, Limón y Macías, 2008). El Nevado del Ruíz, Colombia durante su erupción de 1985 ocasionó la pérdida de 25 000 vidas y sepultó el poblado de Armero (Blaike *et al.*, 1994). A pesar de que, en ningún caso se trata de actividad efusiva, las emisiones de lava también pueden llegar a ser catastróficas, ya que aunque las velocidades de emplazamiento son bajas, dichas lavas destruyen todo a su paso. Más que pérdidas humanas, se producen pérdidas económicas como infraestructuras, carreteras, sembradíos, casas, entre otros (Tilling, 1993).

En México, actualmente existen doce volcanes activos (Lugo e Inbar, 2002). Entre los más importantes se encuentran el Popocatepetl, Chichón, Tacaná y el volcán de Colima, este último considerado el más activo del país (Macías y Capra, 2005). De los volcanes activos, sólo tres cuentan con mapas de peligros (Popocatepetl, Colima y Pico de Orizaba). Estos mapas constituyen la base para la evaluación del riesgo y la elaboración de programas de contingencia, por parte de las autoridades estatales y municipales de cada lugar. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo la zonificación de los diversos peligros de los volcanes activos de México, ya que es de vital importancia, conocer su potencial destructivo y poder tener planes adecuados de contingencia volcánica.

En tiempos modernos el volcán Tacaná ha tenido erupciones importantes, en 1855 (actividad sísmica) en 1878 (caída de ceniza), en 1949- 1950 (actividad sísmica y caída de ceniza) y en 1986 registró una pequeña explosión freática (Sapper, 1927; Böse, 1902 y 1903; Mullerrierd, 1951) por lo que es necesario realizar trabajos detallados sobre las diversas erupciones que ha tenido en el pasado y conocer su potencialidad para una erupción futura.

La historia eruptiva del volcán Tacaná, indica que los flujos de lava se encuentran intercalados con diversos materiales piroclásticos (De Cserna *et al.*, 1988; Saucedo y Esquivias, 1988; Espíndola *et al.*, 1989; Mercado y Rose, 1992; Espíndola *et al.*, 1993; Macías *et al.*, 2000; García-Palomo *et al.*, 2006 y Macías *et al.*, 2010). Con base en los

estudios mencionados anteriormente, el volcán Tacaná es considerado como uno de los más peligrosos de nuestro país (Macías y Capra, 2005), detrás del volcán Popocatepetl, dado que una erupción futura del Tacaná, podría afectar a más de 350 000 personas, incluyendo Tapachula que representa una de las ciudades fronterizas más importantes. Considerando lo ya expuesto, el estudio detallado de las lavas del volcán Tacaná (geomorfología, espesor, área, volumen, distancia máxima, composición química, petrografía y tasa de efusión), que no han sido consideradas en trabajos previos del CVT, aportará nuevos datos en cuanto a la estratigrafía, peligros volcánicos, la posible recurrencia de la actividad efusiva y su relación con cambios en la composición química del magma, lo que permitirá entender la actividad volcánica en general. Cabe resaltar en este trabajo, que por primera vez se llevará a cabo un mapa, con la distribución de los flujos de lava de la estructura principal, el volcán Tacaná.

1.5. Metodología

La metodología utilizada en este trabajo, se basa principalmente en los métodos tradicionales de un estudio vulcanológico, el cual consta de tres procedimientos: trabajo de gabinete, campo y laboratorio.

Trabajo de gabinete.

Esta parte del trabajo consistió principalmente en la recopilación de la bibliografía, cartográfica, fotografías aéreas, información digital (vectorial y raster) existente de la zona de estudio, así como el análisis de dicha información. Posteriormente se adquirieron las cartas topográficas en formato impreso y digital, correspondientes a la zona de estudio a escala 1:50,000; una del lado mexicano, Pavencul (D15B43) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y dos del lado guatemalteco: Tacaná (E754; hoja 1761 I) y Sibinal (E754 hoja 1761 II), así como fotografías aéreas e imágenes de satélite. Para la parte NE de Guatemala, donde no existía información vectorial, fue necesaria la

digitalización de curvas de nivel en pantalla, de algunas zonas del volcán, con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como ILWIS 3.3 y Arc Map 9.2.

Posteriormente, con toda el área de estudio en formato digital y las curvas de nivel a escala 1:50,000 con equidistancia de 20 m entre curvas, se realizaron mapas altitudinales, de pendientes, fluvial, modelo digital del terreno (MDT) entre otros. Este último es la representación digital del terreno con información altitudinal en formato *raster*, donde cada *pixel* tiene una resolución de $5m^2$, así como el valor de *x*, *y* y *z*. Con toda la información generada anteriormente, fue posible procesarlos mediante la sobreposición de diversas capas y obtener información variada. Este procedimiento se llevó a cabo con el programa ILWIS 3.3 y Arc Map 9.2. De esta manera la información preexistente de la zona, como la geología general del CVT (García-Palomo *et al.*, 2006) se vació al modelo digital obtenido con ILWIS 3.3 y Arc Map 9.2.

La delimitación de la zona de estudio, se estableció mediante la distribución y distancia de los flujos de lava del volcán Tacaná, las que se obtuvieron con la sobreposición de las imágenes escaneadas y georeferenciadas, usando la información digitalizada (ver figura 3). Los límites de los flujos de lava, se trazaron con la fotointerpretación de fotografías aéreas, modelos de relieve sombreado y modelos 3D. Posteriormente, se reconocieron los principales flujos de lava del área provenientes del volcán Tacaná, empleando criterios geomorfológicos, como pendiente, longitud y altitud, así como la sobreposición de las curvas de nivel (Lugo, 1991). El producto más importante de esta parte fue el mapa fotogeológico, el cual fue de mucha ayuda durante la etapa de campo, ya que permitió la ubicación exacta de las unidades y la corroboración de los límites inferidos.

Con la información que se obtuvo durante el trabajo de campo, fue posible verificar las unidades determinadas en el mapa fotogeológico. Los datos obtenidos en campo con coordenadas geográficas, mediante el uso de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) se vaciaron en los mapas digitales para obtener su ubicación exacta y realizar las correcciones pertinentes en gabinete. El mapa final fue editado con los programas ILWIS 3.3, ArcGis 9.2 y CorelDraw X4.

Trabajo de Campo

Una vez realizado el mapa fotogeológico, se llevó a cabo el trabajo de campo, dividido en dos etapas: la primera se realizó en el mes de marzo de 2008 y la segunda etapa al final de abril del 2009. Dicho trabajo consistió en caminamientos en el edificio volcánico, para realizar descripciones e identificar los distintos depósitos volcánicos. En total se levantaron 57 secciones estratigráficas detalladas, considerando el color, espesor, tipo de estructura y componentes que conforma cada depósito, mineralogía y tipo de contacto, entre otros parámetros como su distribución espacial. En suma fueron recolectadas 31 muestras de roca fresca, incluyendo flujos de lava, flujos de bloques y cenizas y avalanchas de escombros, con el fin de llevar a cabo análisis petrográficos y químicos. Además, durante el trabajo de campo se trató de seguir cada una de las unidades identificadas y al mismo tiempo, cuando era posible, en las barrancas de la ladera del volcán se intentó hacer correlaciones estratigráficas. De este modo, el mapa fotogeológico fue modificado en campo, con base en las características de cada unidad (tipo de depósito, constituyentes, mineralogía, morfología y color, entre otros).

Trabajo de laboratorio

El trabajo del laboratorio (análisis químico y petrográfico) se realizó en dos etapas:

La primera etapa consistió en la preparación de 28 muestras para los análisis químicos. En primer lugar, se secó y limpió perfectamente cada muestra de roca (Fig. 1.3 a), después fueron trituradas a un tamaño menor a 2 cm, con una trituradora de quijadas (Fig. 1.3 b) y finalmente, pulverizadas a un tamaño inferior a 74 micras, con ayuda de un pulverizador de anillos de acero (Fig. 1.3 c y d). Las muestras fueron pesadas para obtener un poco más de 20 gr de polvo, para los análisis químicos. Este procedimiento se llevó a cabo en el Taller de Triturado del Instituto de Geofísica, bajo la supervisión del Ing. Teodoro Hernández. Posteriormente, las muestras fueron enviadas al Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) de la UNAM, para su análisis químico cuantitativo (Fig. 1.3 e) mediante el método de Fluorescencia de rayos X (FRX) por la Qim. Patricia Girón. El método de FRX, sirve para determinar la composición química de roca total y obtener los

elementos mayores (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O y P_2O_5) y pérdida de agua por calcinación, los que se analizaron en muestra fundida, utilizando un espectrómetro secuencial de FRX, *Siemens SRS 3000* y los elementos traza (Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Th, y Pb), mezclando 4g de polvo de muestra, con 0.4g de aglutinante *wax-c* micropolvo de *Hoechst*, para ser prensados a $30\text{ton}/\text{cm}^2$ durante 30 segundos, en una prensa automática *Graseby/Specac*, empleando posteriormente el software *TRAZA07.QAN* (Verma *et al.*, 1996).

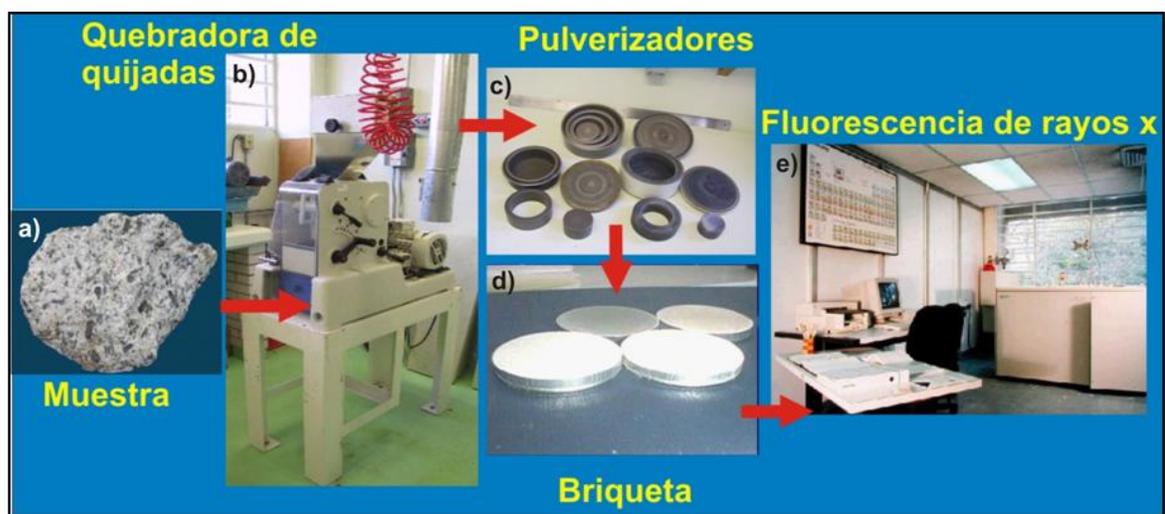


Figura 1.3. Fotografías donde se muestra el procedimiento empleado en la preparación de las muestras, para el análisis químico por FRX, realizados en el laboratorio de trituration del instituto de Geofísica (a-d) y en el laboratorio de fluorescencia de rayos x del instituto de Geología (e), UNAM.

La segunda parte de los análisis de laboratorio, consistió en la preparación y elaboración de 28 secciones delgadas, para el análisis petrográfico. Dichas secciones se realizaron en el Taller de Laminación del Instituto de Geología de la UNAM. Para este análisis, se limpiaron las muestras seleccionadas, procediendo a cortar fragmentos pequeños de aproximadamente 4×6 cm y puliendo una de las caras con abrasivo de 600 micras, para después pegarla a un portaobjetos. A continuación se deja secar el pegamento por algunas horas, después se corta y desgasta con diversos abrasivos hasta llegar a un espesor de 30 micras, para permitir que la luz pase a través de todos los minerales y se pueda realizar la descripción petrográfica de cada una de las láminas. Las descripciones petrográficas se realizaron en el Laboratorio de Microscopios del Instituto de Geofísica de

la UNAM, utilizando un microscopio petrográfico *Olympus*. En la petrografía, se describieron las principales características de cada lámina como textura, minerales presentes, forma y abundancia de dichos minerales, características peculiares de éstos y matriz, entre otros. Para los fechamientos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se enviaron muestras de roca total al Laboratorio de Geocronología de Alaska, Fairbanks. E.U.A. a cargo del Dr. Paul Layer.

Finalmente, con la integración, análisis e interpretación de todos los datos, se llevó a cabo la redacción del presente trabajo.

Capítulo 2. Antecedentes

El volcán Tacaná ha llamado la atención de una gran diversidad de personajes, probablemente por su imponente presencia, ya que sobresale desde cualquier punto que se le observe, desde la costa del Pacífico y también desde la ciudad de Tapachula, que tiene una altitud de 170 msnm. El volcán Tacaná es la elevación más importante de la región del Soconusco con una altura de 4080 msnm.

2.1. Estudios previos

Los trabajos de investigación hechos sobre el volcán Tacaná o sobre el Complejo Volcánico Tacaná, se pueden agrupar en orden cronológico de la siguiente manera:

La persona que describió por primera vez al Tacaná, fue Humboldt (1862), quién lo llamó volcán Soconusco, tomando el nombre de la región geográfica en que se encuentra.

El primer grupo consta de los trabajos realizados por Dollfus y Monserrat (1867), Sapper (1896 y 1899) y Bergeat (1894), quienes realizan descripciones muy generales del volcán Tacaná, como su forma, algunas manifestaciones de la actividad volcánica y descripciones petrográficas de todo el complejo volcánico. Mullerried (1951), estableció que el Tacaná, estaba construido sobre un basamento de rocas metamórficas laminadas del Precámbrico, rocas intrusivas, granitos y dioritas. También mencionó que las erupciones que formaron el Tacaná fueron flujos de lava, cenizas y piroclastos.

Otro grupo de investigadores llevó a cabo estudios geológicos de la zona, como De la Cruz y Hernández (1985), quienes realizaron el primer estudio y mapa geológico semidetallado del volcán, así como la interpretación de los depósitos volcánicos, incluyendo una reconstrucción de la evolución del Tacaná; De Cserna *et al.* (1988), Mercado y Rose (1992), Saucedo y Esquivias (1988) y Espíndola *et al.* (1989), trazaron los primeros mapas del volcán Tacaná, donde lo definieron como un volcán poligenético integrado por tres

estructuras (Talquián, El Águila y Tacaná), efectuando una evaluación preliminar de su peligrosidad por flujos de lava, depósitos de caída, flujos piroclásticos y lahares. Espíndola *et al.*, (1993), llevó a cabo descripciones más detalladas de algunos depósitos, logrando diferenciar flujos piroclásticos de bloques y cenizas, avalancha de escombros, flujos de cenizas y horizontes de material retrabajado.

Posteriormente Macías *et al.* (2000), obtuvieron datos de estudios estratigráficos, geoquímicos y petrológicos, donde se estableció que el Tacaná constituía un complejo volcánico conformado por tres estructuras: *Chichuj* que significa “arilla de temazcal”, el *Tacaná* y *San Antonio*. Propusieron que la actividad magmática del Tacaná ha migrado del NE al SW, dentro de una caldera de 9 km de diámetro. La última gran erupción provino del San Antonio, la estructura más joven de este complejo, de tipo Peleano ocurrida hace aproximadamente 1950 años, produciendo un flujo piroclástico de bloques y cenizas, al que denominaron Flujo Mixcun.

Un nuevo grupo de estudios petrológicos y químicos fue realizado por Medina-Martínez (1986), sobre la evolución geoquímica de la zona del volcán con potencial geotérmico. Mora *et al.*, 2004 efectuaron un estudio petrológico y geoquímico del CVT de los últimos 40 000 años, analizando muestras de los tres edificios que conforman este complejo. También propusieron un modelo general, de la evolución y mecanismos de ascenso de los magmas del Complejo Volcánico Tacaná. Por otro lado Rouwet *et al.* (2004), determinaron la composición química de los manantiales, que actualmente existen en los alrededores del CVT y que son ricos en CO₂.

Cabe resaltar que en el trabajo realizado por García-Palomo *et al.* (2006), se propone la evolución geológica del CVT y describen cuatro estructuras que conforman este complejo, alineadas NE-SW (Chichuj, Tacaná, Plan de las Ardillas y San Antonio). Además, reportaron dos episodios magmáticos previos al CVT: uno durante el Eoceno temprano-Oligoceno tardío y otro en el Mioceno temprano-medio. También en 2006, se llevaron a cabo tesis de licenciatura enfocadas al estudio de eventos particulares del CVT. Por ejemplo Borjas (2006), efectuó un estudio estratigráfico de la zona NE del CVT, donde describió diez

depósitos piroclásticos y Ordaz (2006), realizó la reconstrucción de la historia eruptiva del volcán Tacaná. Para esto se basó en el estudio de depósitos piroclásticos, que afloran en la parte alta del cono del Tacaná; estos resultaron ser muy jóvenes (Holoceno) y al menos se reportaron siete erupciones.

El último trabajo publicado sobre el volcán Tacaná, fue hecho por Macías *et al.* (2010). Trata sobre el colapso del flanco NW de la cima del Tacaná, debido al crecimiento de un domo andesítico que desestabilizó a la estructura hace >10 000 años AP y ocasionó una avalancha de escombros denominada Avalancha Agua Caliente, que dejó en la cima un cráter de colapso abierto 30° al NW de 600 m de ancho.

Como se puede constatar en este apartado, se han llevado a cabo diversos trabajos geológicos, desde lo más general (mapas geológicos, descripciones morfológicas, etc.), hasta estudios tan particulares como este último de Macías *et al.* (2010). Sin embargo, resalta la ausencia de estudios enfocados a la actividad efusiva en todo el CVT, la cual está representada por las lavas que han edificado a las cuatro estructuras y que seguramente, han ocurrido en toda la historia de actividad del CVT. Este es el motivo principal del presente estudio y solamente está enfocado en la estructura principal que es el Tacaná, lo que permitirá entender su actividad volcánica en general.

2.2. Actividad reciente del Complejo Volcánico Tacaná (CVT)

Según los registros históricos el Tacaná, presentó actividad en 1855 e inició con un sismo violento que generó fisuras en los flancos del volcán, dando lugar a la actividad fumarólica (Sapper 1896, 1927). En 1878 se observó vapor de agua del lado mexicano, así como caída de cenizas en el flanco sur del volcán (Mercado y Rose, 1992). Böse (1903), aunque no reportó actividad volcánica alguna, sí mencionó la presencia de cráteres de explosión reciente, ubicados en una especie de escalones localizados a 3 448, 3 655 y 3 872 metros respectivamente, en la porción SW de las laderas del Tacaná (Fig. 2.1). En los dos primeros escalones (en orden ascendente), se ubicaron cráteres antiguos y el tercer escalón

corresponde a un cráter preservado sólo en la porción sur y sureste. En la cima del volcán, observó cráteres pequeños y en la ladera SW a 3 804 msnm encontró un cráter de explosión en forma elíptica, de 50 m de diámetro y 5 m de profundidad, en cuyo borde aparecen brechas volcánicas (depósitos piroclásticos), así como fuerte olor a azufre y aguas azufrosas.

En 1949-1950, de nuevo ocurrió un sismo en los alrededores del volcán Tacaná y las poblaciones cercanas observaron pequeñas fumarolas de vapor blanco en el flanco SW, percatándose de un fuerte olor a azufre, así como caída de ceniza en la comunidad de Unión Juárez. Las fumarolas se presentaron en 16 cráteres, localizados en tres sitios al suroeste de la cima (Mullerried, 1951).

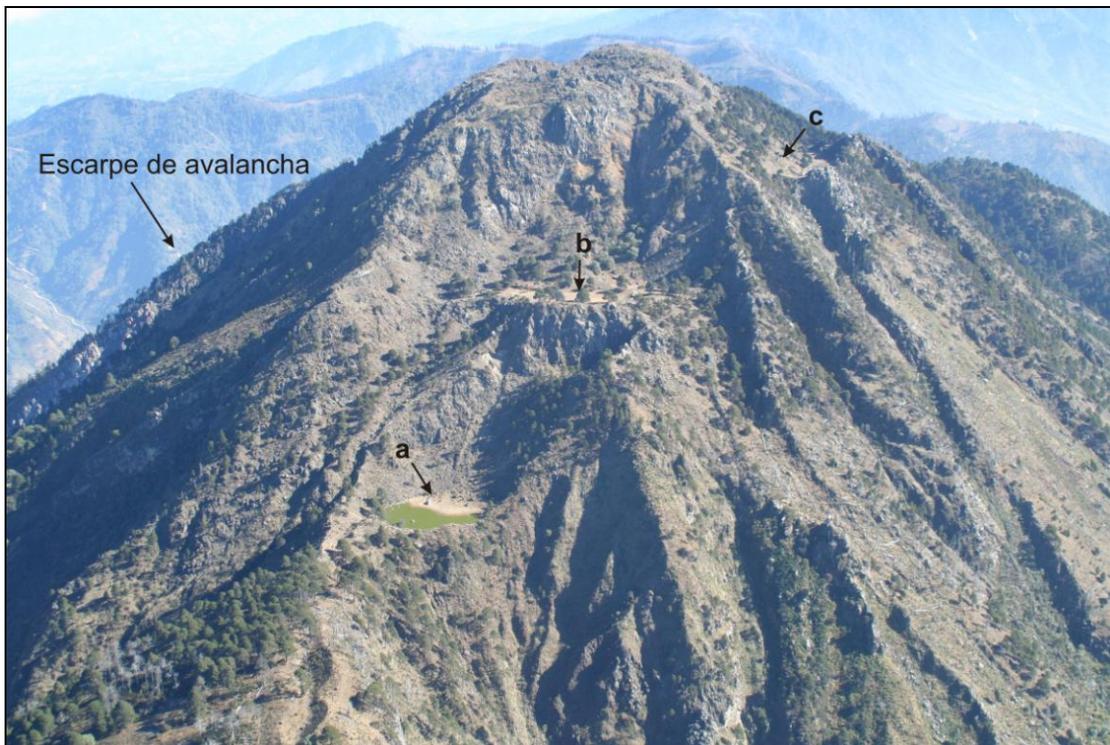


Figura 2.1. Fotografía del volcán Tacaná tomada en dirección noreste, donde se observan los tres escalones que menciona Böse (1903). a) Muestra el primer escalón ubicado a 3448 msnm, b) segundo escalón 3665 msnm y c) el tercer escalón a 3872 msnm. Cortesía J.L. Macías

Finalmente, la última actividad registrada en el volcán Tacaná fue la de 1986, que consistió en pequeñas explosiones freáticas. Dicha actividad comenzó el 19 de diciembre de 1985, con algunos sismos someros que se localizaban a 20 km al noroeste del volcán. En febrero de 1986, se registraban de 2 a 3 sismos por día y en marzo se identificaron eventos como posibles ondas explosivas (De la Cruz-Reyna, 1986a). La erupción del 8 de mayo fue precedida por un enjambre de sismos, que comenzaron desde el 7 de mayo y para esta fecha se sentían cada minuto, acompañados por fuertes estruendos (De la Cruz-Reyna, 1986b).

Las erupciones freáticas del 8 de mayo de 1986, originaron una fumarola en la ladera NW del Tacaná (Fig. 2.2). Esta chimenea se localizó del lado mexicano del volcán, a una elevación de 3 000 msnm, muy cerca del límite fronterizo. Tenía una anchura de 20 m por donde emitía vapor a alta presión, con fuertes estruendos. La emisión de vapor era visible hasta 500 m de altura (Mercado y Rose, 1992). Los niveles bajos de sismicidad continuaron hasta finales de 1986 (De la Cruz-Reyna *et al.*, 1989, Mercado y Rose, 1992).



Figura 2.2. Vista aérea de la fumarola del volcán Tacaná en junio de 1986, mirando hacia el sureste en dirección de la cumbre. Tomada de Mercado y Rose, 1992.

2.3. Geología regional

El Complejo Volcánico Tacaná, es la expresión más activa al noroeste del Arco Volcánico de Centro América (AVCA), que está conformado por un conjunto de 40 estratovolcanes de composición andesítica y basáltica (Stoiber y Carr, 1973), con edades del Eoceno al Reciente (Carr *et al.*, 1982; Donnelly *et al.*, 1990, García-Palomo *et al.*, 2006). Este arco volcánico tiene una orientación general WNW y corre paralelamente a la costa del Océano Pacífico, con una longitud aproximada de 1 100 km, desde la frontera México-Guatemala, hasta el centro de Costa Rica. Los volcanes Tacaná y Tajomulco son los de mayor elevación en Centro América y están localizados en un segmento, donde no se ha registrado actividad magmática importante, en tiempos históricos (Mercado y Rose 1992).

El Complejo Volcánico Tacaná (CVT), se encuentra ubicado muy cerca de la zona de triple unión de las placas tectónicas, que se encuentra delimitada por la Trinchera Mesoamericana y el sistema de fallas Motagua-Polochic, (Guzmán-Speziale *et al.*, 1989; Meschede y Frisch, 1998; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2004). Dicho complejo está constituido por un sistema, de grandes fallas de desplazamiento lateral izquierdo, con dirección E-W (Fig. 2.1), que penetra en el sur de México (Harlow *et al.*, 2004), dentro del bloque cortical Chortis (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2004), que ha estado activo durante los últimos 10 Ma (Deaton y Burkart, 1984).

El basamento del CVT a nivel regional, lo constituye el Macizo Granítico Chiapaneco con diversas formaciones de origen marino y continental, integrado en el conjunto montañoso denominado Sierra de Chiapas. Esta sierra tiene una orientación NW, paralela a la costa del Pacífico, con una superficie de ~20 000 km², está limitada al oeste por el Istmo de Tehuantepec y hacia el sureste por el sistema de fallas Motagua-Polochic hasta Guatemala (Fig. 2.3) (Weber *et al.*, 2002). En Guatemala integra la unidad fisiográfica de la Cordillera Central de Guatemala, formada por esquistos, gneises y rocas volcánicas (De la Cruz y Hernández, 1985, García-Palomo *et al.*, 2006). El Macizo de Chiapas está compuesto por rocas ígneas intrusivas: granito y granodiorita e intrusionado por diques andesíticos, dacíticos, pegmatíticos o aplíticos del Pérmico tardío. En el Terciario se encuentran rocas

intrusivas graníticas que son del Mioceno y Plioceno; también rocas de origen volcánico que forma flujos lávicos y piroclásticos de composición intermedia (De la Cruz y Hernández, 1985).

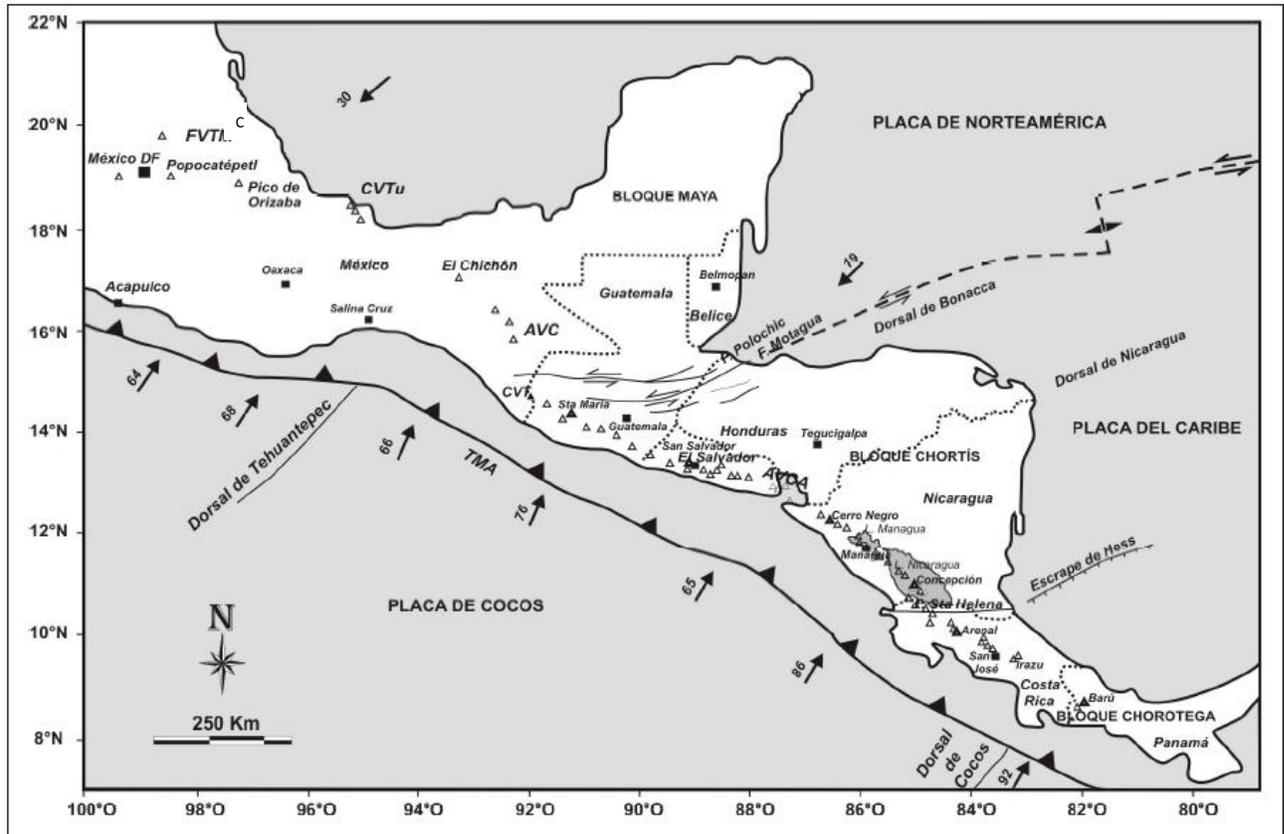


Figura 2.3. Mapa de localización de placas tectónicas de América Central y el sur de México. Se muestra también la ubicación del Complejo Volcánico Tacaná (CVT) en el extremo NO del Arco Volcánico de Centro América (AVCA). CVTM. Cinturón Volcánico Trans-Mexicano; CVTu. Campo Volcánico de los Tuxtlas; AVCh. Arco Volcánico Chiapaneco (Tomado de Murcia-Agudelo, 2008).

2.4. Geología local

De acuerdo con estudios realizados por García-Palomo *et al.* (2006), las rocas más antiguas reportadas en el área del Tacaná son gneises, metavolcánicas, pizarras y granitos del Cretácico. Las rocas metamórficas fueron intrusionadas por dos pulsos magmáticos en el Terciario, incluyendo granitos y tonalitas. El primer pulso ocurrió desde el Eoceno tardío hasta el Oligoceno temprano, probablemente relacionado con la subducción de la placa Farallón, por debajo de la placa de Norteamérica (Meschede y Frisch, 1998). El segundo

pulso se presentó durante el Mioceno temprano llegando al Mioceno medio, posiblemente asociado con la subducción de la placa de cocos, por debajo de la placa del Caribe. Posteriormente, la región fue afectada por la tectónica compresiva del Mioceno (Mugica, 1987). Las rocas del basamento fueron inclinadas y levantadas después del Mioceno medio y antes del Plioceno como resultado de los procesos de subducción (García-Palomo *et al.*, 2006).

Durante el Plioceno y Pleistoceno las tres estructuras caldéricas: San Rafael (2 Ma), Chanjalé (1 Ma) y Sibinal (edad desconocida) fueron emplazadas de manera discordante en el basamento inclinado de rocas que canalizaron los productos volcánicos, hacia la porción sur del área (García-Palomo *et al.*, 2006). Las estructuras caldéricas están afectadas por fallamiento normal, desde el Plioceno tardío hasta el Pleistoceno temprano, formando el graben Tacaná con una tendencia NE-SW, donde fue emplazado el CVT.

El episodio inicial de la formación del Complejo Volcánico Tacaná, comenzó en el Pleistoceno tardío con el emplazamiento del volcán Chichuj. Esto inició con la emisión de flujos de lava de composición andesítica, que construyó el edificio principal (García-Palomo *et al.*, 2006). Posteriormente la intensa alteración hidrotermal, originó el colapso parcial de la porción SE del volcán, produciendo una avalancha de escombros denominada Avalancha Muxbal (Espíndola *et al.*, 1993). Esta fue altamente controlada por la morfología pre-existente y emplazada hacia el SE hasta las paredes de la Caldera San Rafael. El volcán Chichuj está destruido en su porción W-SW, probablemente por un colapso, donde sólo se puede observar actualmente la mitad del cono principal (Macías *et al.*, 2004).

La estructura del Tacaná, se formó al oeste de los remanentes del volcán Chichuj, mediante emisiones de flujos de lava de composición andesítica seguidas por erupciones de tipo Peleana, Pliniana y actividad efusiva (Mora *et al.*, 2004). El edificio original del Tacaná, fue parcialmente destruido por un colapso dirigido hacia la porción NW del cráter (Macías *et al.*, 2010). La avalancha de escombros originada por este colapso, fue confinada

en el valle del río San Rafael y detenida por el margen E del valle del río Coatán (García-Palomo *et al.*, 2006).

De acuerdo con García-Palomo *et al.* (2006), la actividad del CVT siguió con el emplazamiento del domo Plan de Las Ardillas (~30 000 años) y probablemente fue contemporáneo al colapso del Tacaná. Este domo intrusionó al SW del mismo Tacaná. Finalmente, el volcán San Antonio se formó al SW de la cima del Tacaná, manteniendo una alineación volcánica NE-SW, con pendientes escarpadas de flujos de lava de composición andesítica. El volcán San Antonio fue destruido por una erupción de tipo Peleano que originó un flujo piroclástico denominado Flujo Mixcun, fechado en 1 950 años antes del presente (Macías *et al.*, 2000).

2.5. Geomorfología del CVT

Como ya se mencionó en secciones anteriores, el CVT consta de cuatro estructuras alineadas en dirección NE-SW, que han evolucionado en los últimos 100 000 años o menos (García-Palomo *et al.*, 2006; Macías, 2005) dentro de los remanentes de una caldera semicircular de 9 km de diámetro, denominada Caldera San Rafael de 2 Ma (García-Palomo *et al.*, 2006). Las estructuras volcánicas que conforman el CVT son denominadas *Chichuj*, que representa la estructura más antigua con una altura de 3 800 msnm, con forma semicónica debido a que el cráter se encuentra partido a la mitad debido al colapso de la estructura y un domo central, dicho volcán presenta superficies suavizadas. El *Tacaná* es el edificio más alto (4 080 msnm), conformado por un cráter de colapso de 600 m de ancho, abierto hacia el NW y un domo central, la topografía existente en esta estructura es de crestas puntiagudas y valles más profundo. La estructura denominada *Plan de las Ardillas*, consta de un domo de forma asimétrica con una altitud de 3 780 msnm. Por último, el volcán *San Antonio* tiene una elevación aproximada de 3 700 msnm, con un cráter en forma de herradura, abierto hacia el S con un domo central y topografía muy irregular. (Macías *et al.*, 2000; García-Palomo *et al.*, 2006). El CVT,

presenta una red de drenaje radial, concéntrico y dendrítico, característico de las zonas volcánicas y con pendiente fuerte.

El volumen calculado por Mercado y Rose (1992) para el complejo es de 20 a 30 km³ (Mercado y Rose 1992) y el calculado en este trabajo es ~50 km³. Este volumen es difícil de precisar por la irregularidad del basamento, el cual del lado mexicano se inclina hacia el SE, mientras que del lado guatemalteco, topografía y drenaje son montañosas e irregulares (Mercado y Rose 1992). El Tacaná presenta un drenaje radial, concéntrico y dendrítico, peculiar de las zonas montañosas.

El volcán Tacaná es un estratovolcán, que está formado por depósitos de erupciones sucesivas, que han producido lavas y piroclastos, al menos durante los últimos 100 mil años (Macías, 2005), normalmente por erupciones centrales (emisiones que surgen por un conducto o chimenea, de cráteres de cumbre o por conductos en sus flancos) o areales (actividad que se caracteriza por la carencia de centros de erupción en puntos concretos durante mucho tiempo; Gutiérrez, 2008). Como comúnmente ocurre en los estratovolcanes, las erupciones del Tacaná han alternado con periodos de quietud, en los cuales el volcán ha sufrido procesos erosivos y de intemperismo (clima, suelo, fauna, vegetación, acción del hombre, entre otras). Cuando el volcán ha tenido una manifestación eruptiva de tipo efusiva, las coladas se han canalizado por las depresiones topográficas o barrancos, resultado de la erosión fluvial o por el sistema de fallas que existe en la zona. Esto ha ocasionado que los cursos de los ríos se modifiquen y cambien su cauce.

La forma de los aparatos volcánicos, depende de la composición de las lavas que emiten y del tipo de actividad que han tenido a lo largo de su historia eruptiva (Gutiérrez, 2008). El volcán Tacaná ha tenido distintos tipos de erupciones volcánicas a través de su historia eruptiva - Peleano, Plinianio- (García-Palomo *et al.*, 2006), originando diversos tipos de depósitos que incluyen avalanchas, flujos y oleadas piroclásticas, lahares, flujos de bloques y cenizas.

La actividad efusiva en el Tacaná, ha quedado de manifiesto por el emplazamiento de flujos de lava, principalmente en la ladera N del volcán y por la formación de domos semicirculares en la cima del mismo (Fig. 2.4). El tipo de flujo, velocidad y extensión de las lavas, depende básicamente de la topografía, volumen y viscosidad; esta última a su vez, depende de la composición química, contenido de vesículas, grado de cristalinidad y temperatura. En este trabajo las lavas del Tacaná, fueron clasificadas como lavas en bloque, que se caracterizan por tener fragmentos de 0.25m hasta más de 1 m, con poco contenido de vesículas, poca distancia del punto de emisión (3 km en promedio) y frentes pronunciados (hasta 100 m).

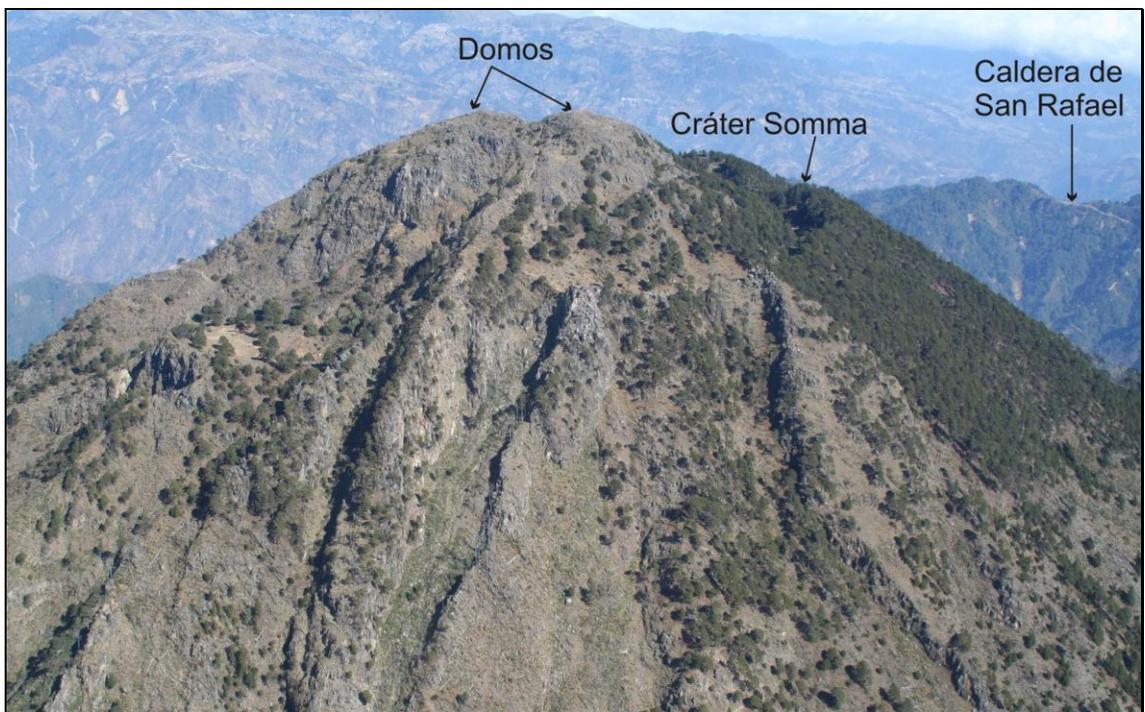


Figura 2.4. Fotografía tomada en dirección de sur-norte, donde se observan los domos del Tacaná dentro del cráter somma. Al fondo se puede observar los remanentes de la Caldera de San Rafael. Cortesía J.L. Macías

Capítulo 3. Estratigrafía y distribución de las lavas del volcán Tacaná.

En este capítulo, se describe la distribución de los flujos de lava del volcán Tacaná, así como las relaciones estratigráficas entre las lavas y otros depósitos volcánicos.

3.1. Estratigrafía del Complejo Volcánico Tacaná (CVT)

La estratigrafía del CVT está conformada por seis grandes unidades estratigráficas, tal como se muestra en la figura 3.1. Se dividen cronológicamente de la siguiente manera:

Mesozoico

Rocas con edad de 142 ± 5 Ma, (Mugica, 1987), compuestas por una alternancia de rocas metamórficas (esquistos), con bandas de color verde claro a oscuro, así como gneises con bandas verdes-blancas. Estas rocas se encuentran en la parte NW del CVT (García-Palomo *et al.*, 2006) y conforman el basamento local del mismo (Fig. 3.1).

Terciario

El segundo grupo de rocas más antiguas del área del CVT, está conformado por cuerpos intrusivos del Eoceno tardío-Oligoceno temprano (Fig. 3.1), que corresponden a granodioritas de biotita-hornblenda y fueron fechadas en 35 Ma. También dioritas gnéissicas de hornblenda-biotita de 29 Ma, ambas fechadas por el método K-Ar (Mugica, 1987). Estas rocas se localizan al oeste de la cima del CVT (García-Palomo *et al.*, 2006).

Además, se han reportado otros cuerpos intrusivos del Mioceno medio-Mioceno tardío, (Fig. 3.1) localizados al S del CVT y formados por tonalitas gnéissicas de biotita-hornblenda y granodiorita de biotita-hornblenda de 20 Ma (Mugica, 1987). En trabajos más recientes (García-Palomo *et al.*, 2006), se reportaron granodioritas de 13.3 y 12.2 Ma con feldespato potásico, plagioclasa, biotita y cuarzo en el noroeste del volcán Tacaná y al sur del volcán San Antonio.

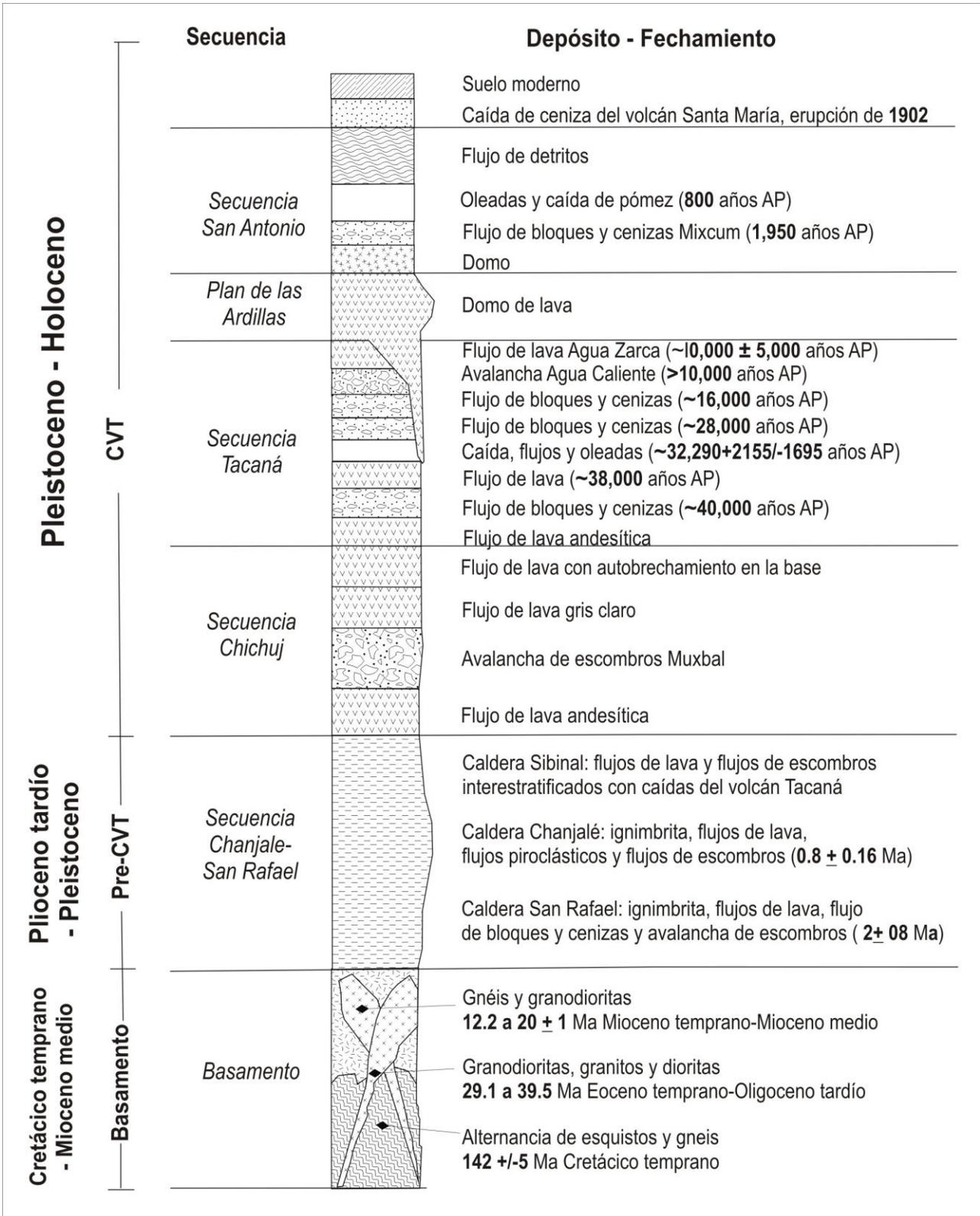


Figura 3.1. Columna estratigráfica compuesta de el Complejo Volcánico Tacaná, conformado por el basamento, rocas pre-CVT y rocas del CVT (Modificado de García-Palomo *et al.*, 2006).

Cuaternario

Pre-CVT

Asimismo, se han reportado rocas volcánicas del Plioceno tardío-Pleistoceno (Fig. 3.1), agrupadas en una secuencia denominada “secuencia Chanjalé-San Rafael”. Esta consiste de tres estructuras caldéricas, llamadas: San Rafael, Chanjalé y Sibinal, que se localizan en la porción norte del CVT (García-Palomo *et al.*, 2006).

Caldera San Rafael

Está ubicada al norte y este del CVT, formada por una estructura discontinua de 9 km de diámetro aproximadamente y constituida principalmente por una capa basal de ignimbritas de color verde, con un espesor de 200 m que cubre las rocas graníticas del Terciario. Las ignimbritas están cubiertas por flujos de lava de composición andesítica, con espesores de >20 m y una edad de 2 Ma (García-Palomo *et al.*, 2006). Los flujos de lava andesíticos se ocultan bajo un depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas, masivo y también de composición andesítica. En algunas zonas al NE del CVT, se encuentran depósitos de avalancha de escombros de composición andesítica que son considerados como los productos más jóvenes de esta caldera (García-Palomo *et al.*, 2006).

Caldera Chanjalé

Se localiza al oeste del CVT, conformada por un cráter en forma de herradura de 6.5 km de diámetro, abierto al este y cortado por el Río Coatán. Las paredes de la caldera presentan varias unidades, siendo los depósitos más antiguos, los flujos de lava de ~200 m de espesor, seguidos por depósitos de flujos piroclásticos (ignimbrita blanca muy alterada) y coronada por depósitos de flujos de escombros. Las lavas fueron fechadas en 0.81 Ma (García-Palomo *et al.*, 2006).

Caldera Sibinal

Está ubicada al NE del complejo y contiene varios flujos de lava de composición andesítica, de 60 m de espesor. Estos flujos de lava se localizan en la parte alta de la caldera, sobreyaciendo a los granitos del Terciario. Actualmente no se cuenta con fechas radiométricas para esta caldera; sin embargo, se considera más joven que las calderas San Rafael y Chanjalé (García-Palomo *et al.*, 2006).

Complejo Volcánico Tacaná (CVT)

El Complejo Volcánico Tacaná, se encuentra dentro de los remanentes de la Caldera San Rafael, conformado por cuatro secuencias volcánicas: Chichuj, Tacaná, Domo Plan de las Ardillas y San Antonio (Fig. 3.2).

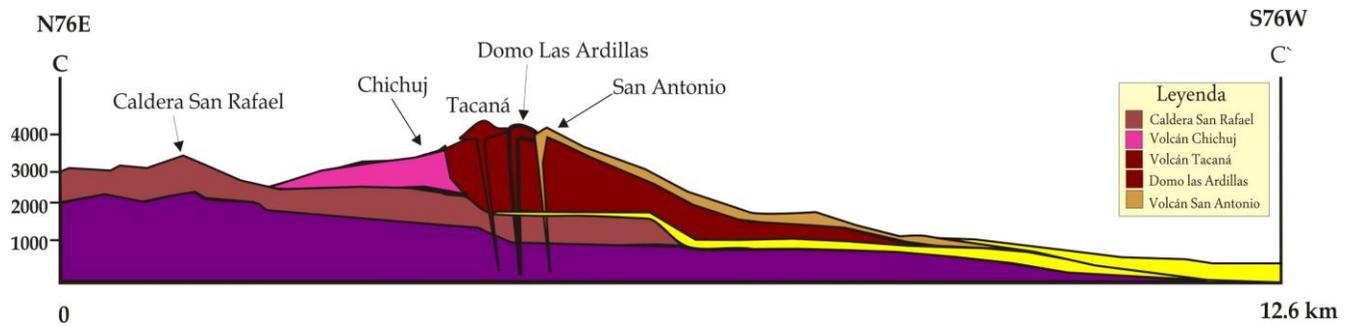


Figura. 3.2. Sección esquematizada de las estructuras que conforman el Complejo Volcánico Tacaná. Tomado de García-Palomo *et al.* (2006).

Chichuj

Esta estructura presenta un cráter abierto hacia el oeste; en cuyo interior, se emplazó el volcán Tacaná. La geología del volcán Chichuj consta de seis unidades principales: la primera consiste de una secuencia de flujos de lava de color gris, de composición andesítica con ~10 m de espesor (García-Palomo *et al.*, 2006). La segunda unidad corresponde a un depósito masivo de avalancha de escombros con alteración hidrotermal, que se localiza en la base de la barranca de Muxbal, denominada avalancha de escombros

Muxbal (Espíndola *et al.*, 1993). Fechado con el método de C^{14} en $24\ 540 \pm 260$ años AP (Espíndola *et al.*, 1993) y se encuentra cubierto por una secuencia lacustre y un flujo de bloques y cenizas de 25 m de espesor, que provienen del volcán Tacaná (Mora *et al.*, 2004). La quinta unidad se conforma de un flujo de lava gris claro con textura porfirítica, que cubre al flujo de bloques y cenizas.

Finalmente, en la cima de la secuencia Chichuj, se encuentran flujos de lava brechados, de color rosa a gris oscuro, de 2.5 m de espesor, así como lavas laminadas con bandeamiento (50 cm de espesor) que cambian a un flujo de lava masivo de ~1m de espesor (García-Palomo *et al.*, 2006).

Tacaná

La secuencia Tacaná consta de diez unidades de flujos de lava, avalancha de escombros, flujos de bloques y cenizas, oleadas piroclásticas, depósitos de caída y lahares, enumerándose de la más antigua a la más reciente.

El flujo de lava más antiguo es de composición andesítica, está expuesto en la base de las barrancas que rodean al Tacaná, sobreyacido por un flujo de bloques y cenizas de color gris, que aflora en la ladera sur del volcán entre Talquián y Santo Domingo (García-Palomo *et al.*, 2006). Ese flujo de bloques y cenizas, fue fechado con el método C^{14} por Espíndola *et al.* (1989) en 42 000 años AP y en $38\ 630 +5\ 100/-3\ 100$ años AP (Espíndola *et al.*, 1993). Otro flujo de bloques y cenizas de color gris claro, se fechó en $28\ 540 \pm 260$ años A.P. mediante el método de C^{14} (Mora *et al.*, 2004) y se localiza cerca de la población de Córdoba, sobreyaciendo al depósito de avalancha de escombros Muxbal.

La porción norte del volcán Tacaná, se encuentra dominada por un flujo de bloques y cenizas, que se acuña hacia la Caldera de San Rafael. Este flujo consta por lo menos de cuatro unidades masivas de color gris, fechadas con C^{14} en $16\ 350 \pm 50$ años AP (Mora *et al.*, 2004). Hacia la porción E-NE del CVT, se ubica una secuencia compleja conformada por tres horizontes de caída ricos en pómez e intercalados con depósitos de flujos

piroclásticos. Esta secuencia fue fechada 32 290 \pm 2155/ -1 695 años AP con el método de C^{14} (Arce *et al.*, 2004).

El depósito de la avalancha de escombros de Agua Caliente, se localiza al noroeste del volcán, delimitado por los ríos San Rafael, Tochab y Coatán, con una longitud máxima de 8 km y un espesor aproximado de \sim 200 m (Macías *et al.*, 2010). La Avalancha Agua Caliente fue fechada con el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en $>10\ 000$ años AP, durante el Pleistoceno tardío (Macías *et al.*, 2010). Asociado a la avalancha de escombros, se encuentra un depósito de flujo de bloques y cenizas de color gris claro de composición andesítica, con un espesor de entre 20 y 25 m (Macías *et al.*, 2010). Tanto la avalancha de escombros como el flujo de bloques y cenizas, están cubiertos por un depósito de flujo de escombros (García-Palomo *et al.*, 2006).

Posteriormente, en la secuencia del Holoceno del volcán Tacana, se presenta un depósito de flujo piroclástico de color amarillo, rico en pómez, con un espesor de 6 m y cubierto por otros 6 m de material retrabajado. Éste depósito fue fechado con el método de radiocarbono en 6,910 \pm 95 años AP (García-Palomo *et al.*, 2006).

Finalmente, en la cima se encuentra una secuencia de seis unidades de oleadas piroclásticas y un depósito de caída de pómez gris oscuro, con una edad de \sim 800 años AP obtenida mediante el método de C^{14} (Ordaz, 2006), siendo éste el depósito más joven del volcán.

Plan de las Ardillas

Esta estructura se ubica entre los volcanes San Antonio y Tacaná, conformado por un domo y dos flujos de lava asociados, que se localizan al noroeste y sureste de los flancos del volcán San Antonio y Tacaná. Tanto el domo como los flujos de lava son de composición andesítica, de color gris oscuro con textura porfírica. Uno de estos flujos de lava, fue fechado mediante $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 30 000 \pm 9 000 años A.P., (García-Palomo *et al.*, 2006).

San Antonio

La estructura San Antonio, se localiza al suroeste del domo Plan de las Ardillas y está conformado por varios flujos de lava de 2 m a 5 m de espesor, de composición andesítica-basáltica, de color gris y textura porfirítica (García-Palomo *et al.*, 2006). Uno de los depósitos más jóvenes, aflora en la ladera sur de esta estructura y corresponde a un flujo de bloques y cenizas, denominado como Flujo Piroclástico Mixcun (Macías *et al.*, 2000), fechado en 1 950 años A.P. con el método de C¹⁴.

Adicionalmente, en las cercanías de las poblaciones de San Salvador Urbina y Unión Roja, se exponen secuencias conformadas por flujos de escombros, flujos hiperconcentrados y depósitos fluviales. De hecho, la ciudad de Tapachula se encuentra asentada sobre un abanico compuesto por depósitos de escombros, provenientes de todo el Complejo Volcánico Tacaná, definidos como Tapachula inferior y Tapachula superior (Murcia-Agudelo, 2008; Murcia y Macías, 2009) fechados con C¹⁴ en 23 000 y 13 000 años AP, respectivamente.

3.2 Flujos de lava del volcán Tacaná

Como ya se mencionó anteriormente, la mayoría de los productos provenientes del volcán Tacaná cubre un intervalo de edad entre el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Durante el trabajo de campo se levantaron 57 columnas estratigráficas. Los sitios de cada una se observan en el mapa (Fig. 3.3) y afloramientos descritos en trabajos previos, que logran cubrir el área donde se encuentran los flujos de lava, en particular los provenientes del volcán Tacaná.

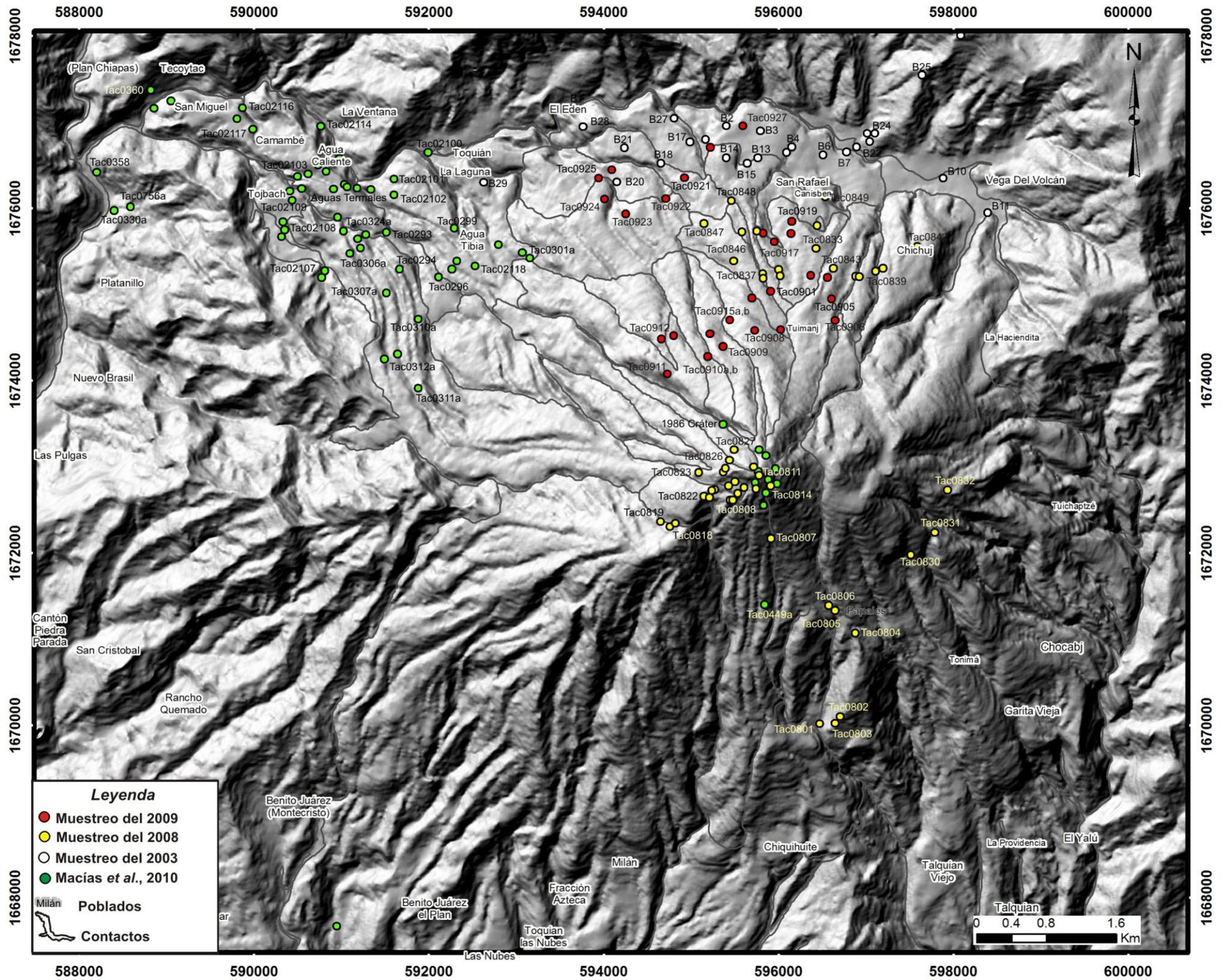


Fig. 3.3. Modelo digital del terreno sombreado generado en ILWIS 3.3; con equidistancia entre curvas de 20m y resolución de 5 m. Se presenta el muestreo realizado en el volcán Tacaná durante diversos años. Muestreo 2008 y 2009 se realizaron en este trabajo.

Con las columnas estratigráficas descritas, se llevó a cabo una correlación de las distintas unidades de la zona, con el fin de simplificar dicha estratigrafía, se establecieron tres etapas principales de la actividad efusiva que constan de varios flujos de lava (algunas cubiertas por depósitos volcánicos más recientes) y otros depósitos asociados a la actividad explosiva del volcán Tacaná.

A continuación, se hace una descripción en orden cronológico de cada una de las unidades de lava, que conforman las tres etapas de la actividad efusiva del volcán Tacaná.

3.2.1. Etapa 1

La Etapa 1, es la de mayor antigüedad en la fase eruptiva del Tacaná, puesto que en la parte alta del volcán, se pueden observar las unidades de esta etapa cortadas por un gran escarpe. Dicha etapa consta de una secuencia de siete unidades, distribuidas hacia el norte y una hacia el sur de la cima del Tacaná. La descripción de esta etapa se basó en 14 secciones estratigráficas al sur y norte del volcán (Fig. 3.3).

Para llevar a cabo la correlación estratigráfica, se trazó la sección (A-A'), que va de SW a NE, (Fig. 3.4), cuyo perfil topográfico fue interpretado con ayuda de la información de campo y gabinete (Fig. 3.5 a-b).

En la ladera sur, se expone un flujo de lava ~98 m de espesor, que se encuentra desde la aldea de Papales (3 000 msnm), hasta la cima del volcán Tacaná (unidad 1.0, Etapa 1). Esta unidad, no tiene contacto directo con ningún otro depósito de esta etapa eruptiva, pero en la cima esta unidad se encuentra afectada por el escarpe abierto al NW y por lo tanto representa la base de la columna estratigráfica.

En la sección Tac0806, esta unidad (Fig. 3.6), está limitada al este por la ladera del volcán Chichuj. El flujo de lava es masivo de color gris claro, con un espesor de > 98 m. En muestra de mano se observa una andesita, de textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa (<7 mm), anfíboles y piroxenos, inmersos en una matriz fina de color gris claro.

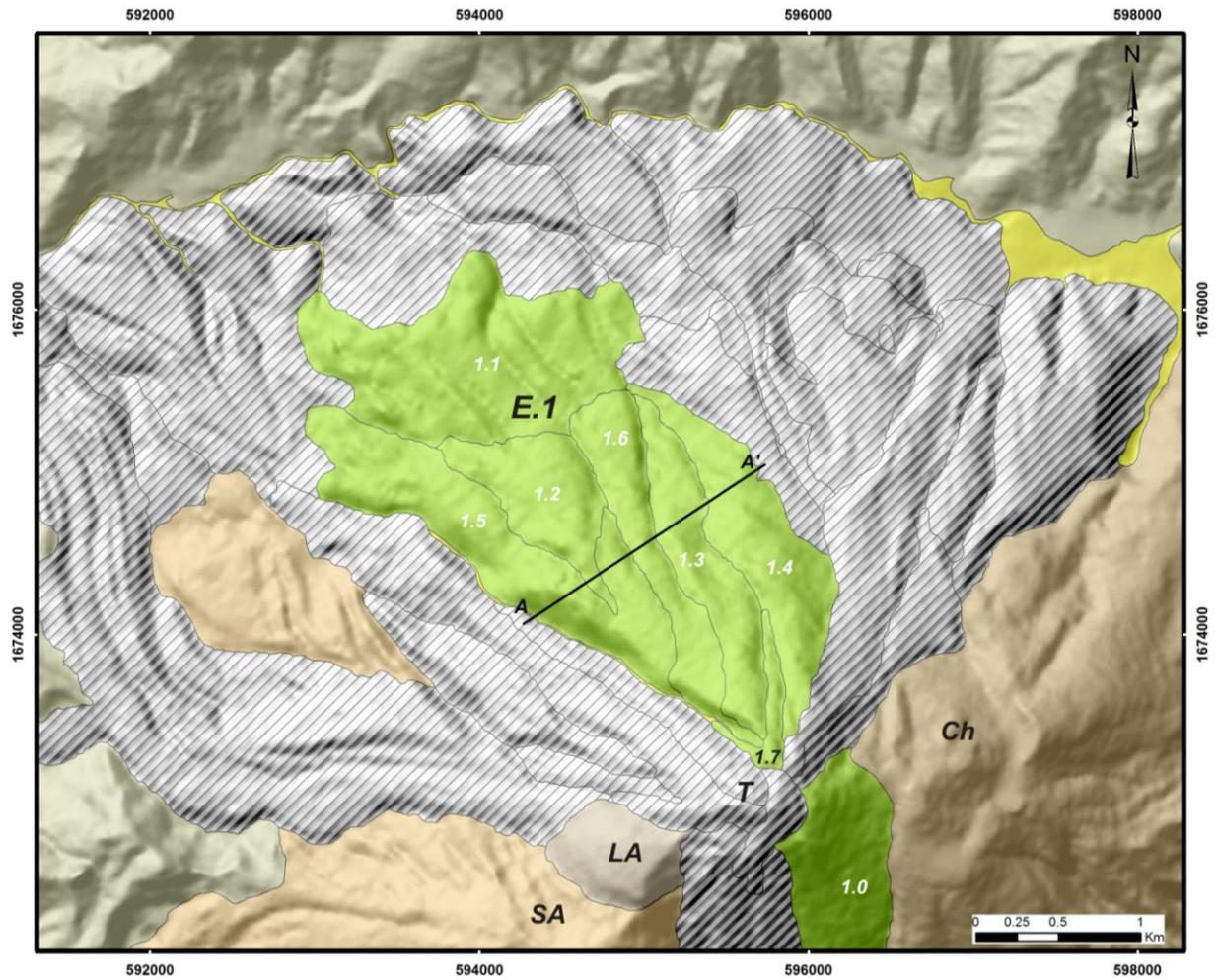


Figura 3.4. Modelo digital del terreno generado en ILWIS 3.3; donde se muestra en color verde la Etapa 1 (con los distintos flujos de lava que la conforman) y la sección del perfil A-A'. Abreviaturas: San Antonio (SA), Domo Las Ardillas (LA), Tacaná (T) y Chichuj (Ch).

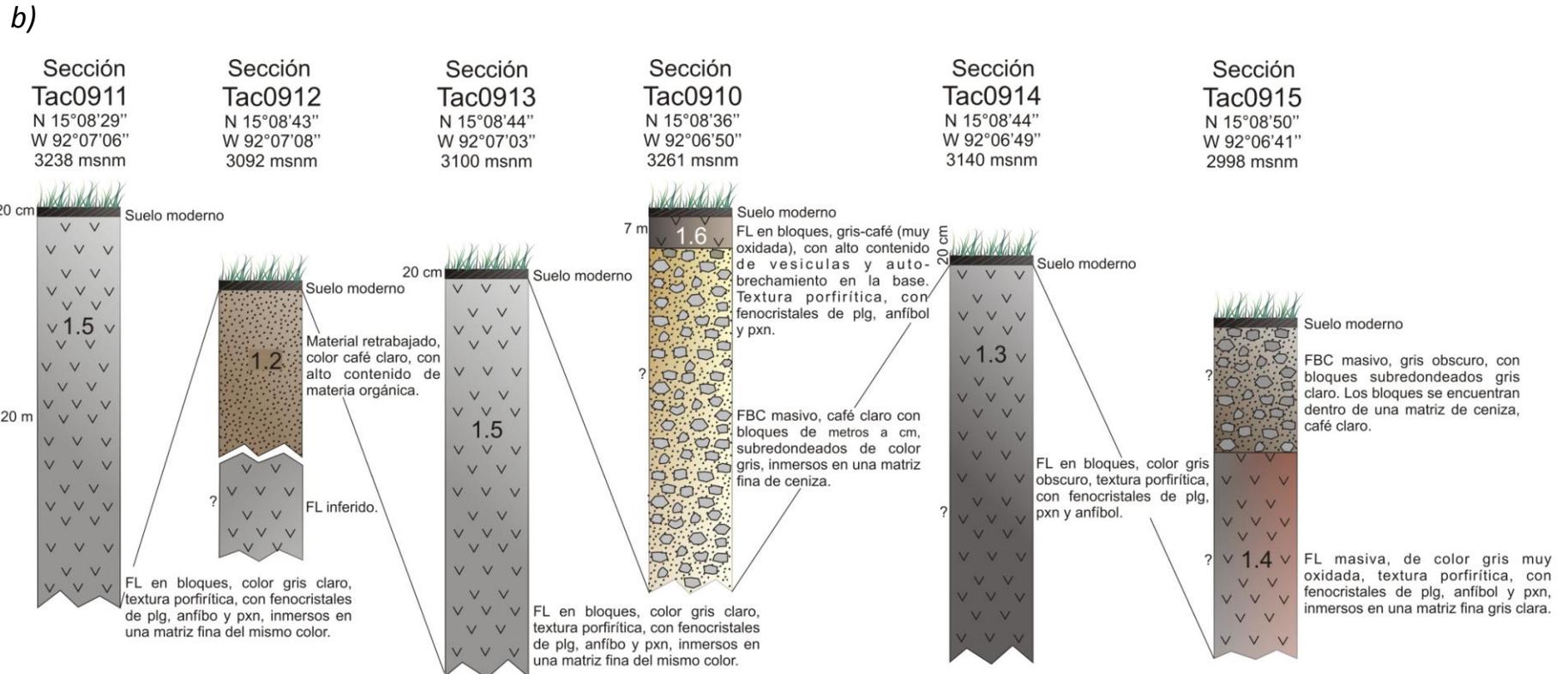
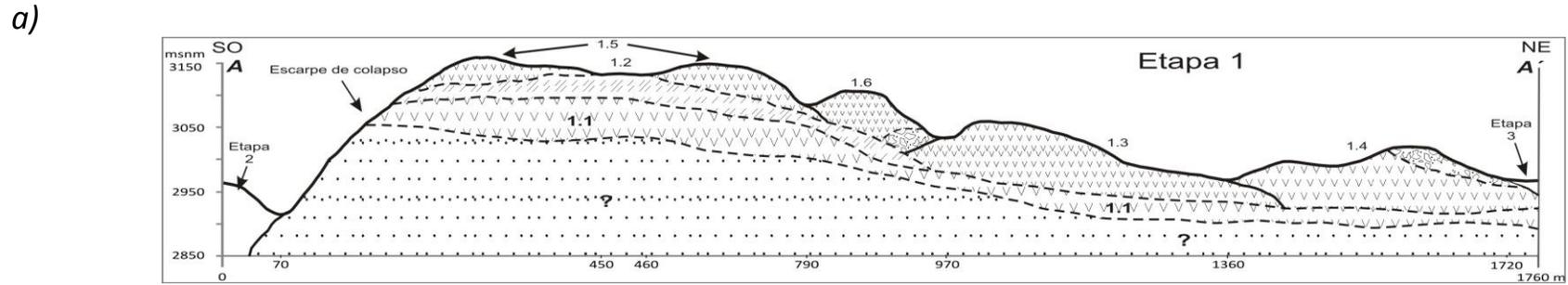


Figura 3.5. a) Perfil interpretado de la sección A-A', donde se muestra la relación de las unidades de la Etapa 1. b) Correlación estratigráfica de la Etapa 1. Abreviaturas. Flujo de bloques y cenizas (FBC), flujo de lava (FL), plagioclasa (plg), piroxeno (pxn), y espesor no determinado (?).



Figura 3.6. Fotografía tomada hacia el norte donde se observa la unidad 1.0 del volcán Tacaná, sobreyaciendo a una lava del volcán Chichuj (flecha). En línea punteada se observa el límite entre las lavas. En el círculo rojo se observa una persona como escala.

La unidad 1.1 se ubica en la ladera N-NW del Tacaná expuesta a 2 400 msnm (Fig. 3.3, sección Tac0922). Se compone de un flujo de lava masivo y denso con estructuras bandeadas, con un espesor promedio de 98 m, composición andesítica y de color gris oscuro. En muestra de mano se observa textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa, anfíboles de gran tamaño (7 mm) y piroxenos, inmersos en una matriz fina de color gris oscuro. Este flujo de lava fue fechado en este trabajo mediante el método de $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ en $30\,900 \pm 3\,700$ años A.P. En las secciones Tac0922, Tac0923 y Tac0924 este flujo de lava está cubierto por un flujo de bloques y cenizas.

Al NW a 500 m del cráter de colapso, a 3 092 msnm se encuentra un flujo de lava (unidad 1.2), que se observó en la sección Tac0912, cubierto por una gruesa capa de material

retrabajado y un suelo bien desarrollado, con alto contenido de materia orgánica y vegetación de gran tamaño (Fig. 3.7).



Figura 3.7. Se observa material retrabajado y suelo de la unidad 1.2, en la que no se pudo encontrar la lava *in situ*, solamente fue posible observar algunos bloques.

A una altitud de 3 200 msnm, en la sección Tac0909 aflora un flujo de lava (unidad 1.3) que contiene grandes bloques (de 3 a 4 m de diámetro) de color gris, con un espesor ~60 m (Fig. 3.8). En muestra de mano se describió como una roca de composición andesítica de color gris clara, de textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa, anfíbol (<2 mm) y piroxenos, inmersos en una matriz vítrea de color gris clara. Arriba de esta unidad, se encuentra una secuencia de >45 m de espesor de un flujo de lava, masivo, de composición andesítica, de color gris claro, con un alto grado de intemperismo, cuyos fenocristales presentan un alto grado de oxidación (unidad 1.4). Esta última lava corresponde a una andesita, en muestra de mano se observa textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa, anfíboles de gran tamaño (entre 2 y 8 mm), clinopiroxeno y ortopiroxeno,

inmersos en una matriz vítrea de color gris. Asimismo, sobre la lava 1.4 yace un flujo de bloques y cenizas de color gris oscuro, cuyo espesor promedio es de 15 m, de color gris, con bloques de color gris oscuro inmersos en una matriz compuesta por ceniza media, de color gris oscuro a ocre (sección Tac0915a, b y Tac0908). Los bloques tienen textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa, anfíboles (>5 mm), aglomeraciones de anfíboles y piroxenos



Figura 3.8. Fotografía de un afloramiento del flujo de lava de la unidad 1.3, que muestra un bloque de aproximadamente 5 m de diámetro.

A continuación se encuentra la unidad 1.5, que aflora desde 2 040 hasta 3 480 msnm y se encuentra limitada al oeste por el cráter de colapso (Fig. 3.9). Esta unidad está compuesta por un flujo de lava en bloques, con >100 m de espesor, de color gris. En muestra de mano se describió como una andesita de color gris claro, con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y piroxeno inmersos en una matriz fina también de color gris claro (sección Tac0911). Posteriormente le sobreyace la unidad 1.6, que corresponde a una secuencia de ~84 m de

espesor, formada por un flujo de bloques y cenizas en la base y cubierto por un flujo de lava. El flujo de bloques y cenizas es masivo de color café claro, con bloques subredondeados de 50 cm de diámetro de color gris, con textura porfirítica, conteniendo fenocristales de plagioclasa, anfíboles (>5 mm), muy pocos piroxenos y algunas vesículas. Los bloques están inmersos en una matriz de ceniza de color café claro. El flujo de lava andesítico se presenta como bloques de ~10 m de diámetro color gris, con un alto grado de oxidación. En muestra de mano (Tac0910b), se observa una textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa, anfíboles (<5 mm) y piroxenos, inmersos en una matriz de color gris oscuro y vesicular. Este último flujo, tiene mayor grado de oxidación y vesículas, que el flujo de bloques y cenizas que le antecede. Finalmente, la unidad 1.7 se ubica desde los 3 380 msnm, hasta la cima del volcán Tacaná. Se trata de un pequeño flujo de lava, con un espesor promedio de 19 m y una longitud máxima de 1.9 km. El último contacto, se obtuvo mediante la fointerpretación y con la ayuda del programa ILWIS 3.3.



Figura 3.9. Fotografía tomada desde la cima del volcán Tacaná, viendo hacia el NE el flujo de lava en bloques de la unidad 1.5. Se aprecia el escarpe originado por la Avalancha Agua Caliente (línea blanca punteada). El círculo en color rojo, señala el cráter de explosión de 1986 de 20 m de diámetro.

3.2.2. Etapa 2

Para la Etapa 2, se describieron 12 afloramientos y se conforma por ocho unidades que se encuentran al W, NW y S del Tacaná. Está compuesta por varios flujos de lava y otros depósitos volcánicos. En el mapa de la figura 3.10, se trazó una sección para poder realizar la correlación estratigráfica y su interpretación de sobreposición de unidades (Fig. 3.11 a y b).

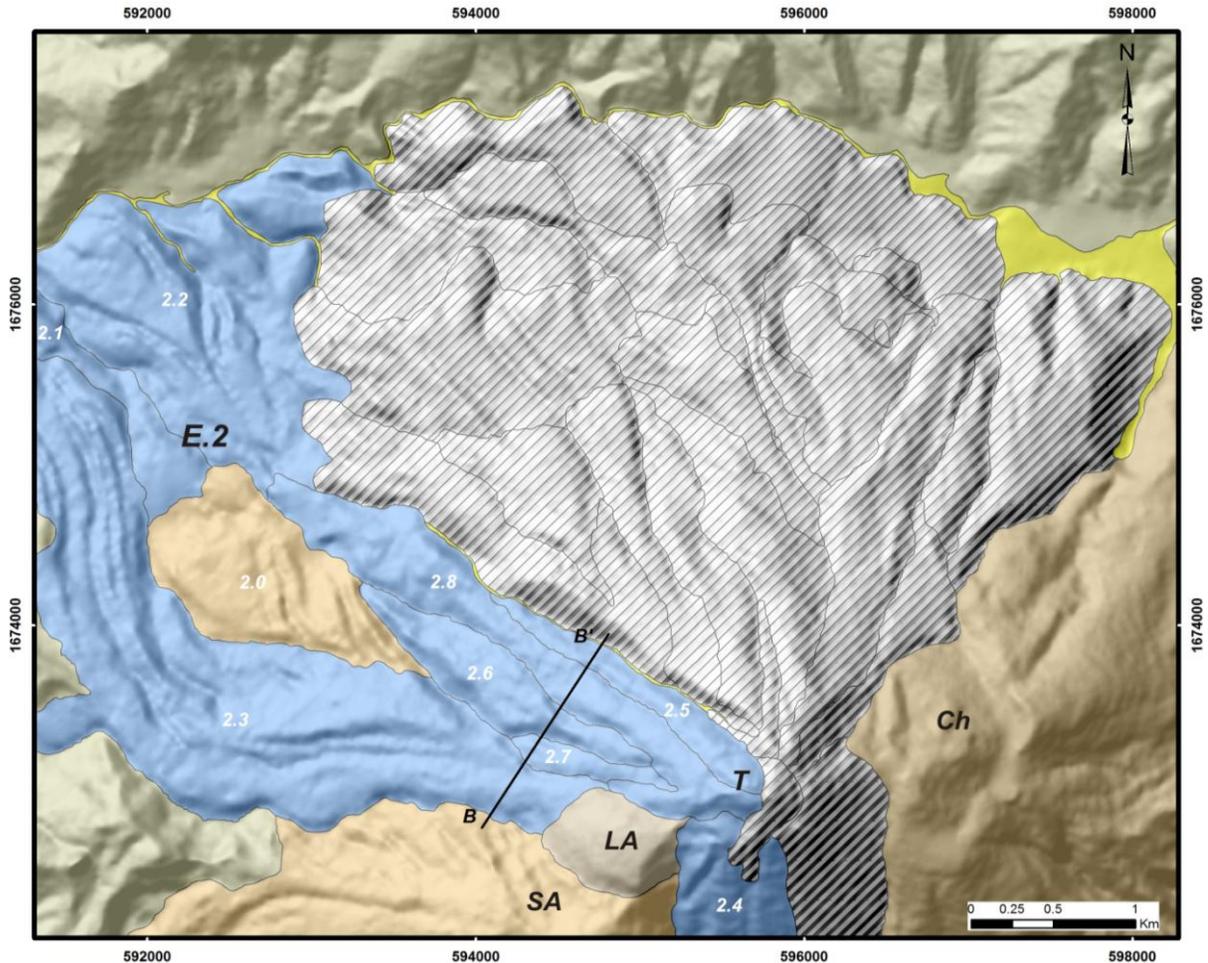


Figura 3.10. Modelo digital del terreno generado en ILWIS 3.3; donde se muestra a detalle en color azul parte de la Etapa 2 y la sección del perfil B-B'. Abreviaturas: San Antonio (SA), Domo Las Ardillas (LA), Tacaná (T) y Chichuj (Ch).

A pesar de que no fue posible realizar una descripción en campo de la unidad 2.0, es probable que sea parte de la estructura San Antonio, con base en características morfológicas, en particular la dirección y patrón de drenaje (Fig. 3.10). Sobre la unidad 2.0 se emplazaron posteriormente los demás flujos de la lava de la etapa 2.

En la base de la Etapa 2, se encuentra la unidad 2.1, que consta de una secuencia descrita por Macías *et al.* (2010) como avalancha de escombros Agua Caliente, conformada por tres unidades que suman más de 132 m de espesor. La parte basal, se expone en la ladera NW del volcán, desde la aldea de Toquían hasta el Río Coatán. El depósito se encuentra confinado por los ríos San Rafael, Tochab y Coatán y tiene un espesor de 35 m. El depósito de avalancha de escombros, presenta bloques con estructura en rompecabezas (Fig. 3.12), de composición andesítica, inmersos en una matriz de ceniza color café claro. Esta avalancha de escombros, está cubierta por un flujo de bloques y cenizas que tiene un espesor de 20 a 25 m, compuesto de bloques de andesita de color gris claro. Finalmente, el flujo de bloques y cenizas, está cubierto por un depósito de flujo de escombros, con espesores de hasta 75 m, que se encuentra expuesto al sur del valle del Río San Rafael y al este de la localidad de Agua Caliente. Los bloques están embebidos en una matriz de ceniza (sección Tac02116, Tac0325a).



Figura 3.12. Bloque de andesita, color gris con estructura en rompecabezas, inmerso en una matriz de ceniza media, de color café. Como escala, la pala mide 35 cm (Tomada de Macías *et al.*, 2010).

Posteriormente se encuentra la unidad 2.2, expuesta en la parte baja del volcán (sección Tac0299, Tac02102 y Tac0301a), limitada por el Río San Rafael, lugar donde actualmente se encuentran las villas de Agua Tibia y La Laguna. Esta unidad está conformada por una secuencia de flujos y oleadas piroclásticas, descrita por Macías *et al.* (2010). Está compuesta de un flujo de bloques y cenizas en la base, de color ocre, con bloques de pocos cm hasta más de 1 m de diámetro. En muestra de mano los bloques presentan textura porfírica con fenocristales de plagioclasa (2 mm), anfíbol (1 cm) y piroxenos (1mm), inmersos en una matriz fina de color gris claro. Sobre este flujo piroclástico, se encuentra una secuencia intercalada de oleadas piroclásticas con paleosuelos. Uno de los paleosuelos (P1), fue fechado en $10\ 610 \pm 330$ /-315 años AP y otro más (P2), en $6\ 175 \pm 70$ años AP (Macías *et al.*, 2010). Encima de P2, se encuentra un flujo piroclástico compuesto por varias capas de ceniza fina a media, que cambia a un tercer paleosuelo (P3), fechado en $5\ 696 \pm 190$ /-185 años AP (Macías *et al.*, 2010). Este último paleosuelo está cubierto por una capa de ceniza de color gris claro. Todos los fechamientos de los paleosuelos fueron obtenidos mediante el método de C^{14} .

Después se tiene un flujo de lava, denominado Agua Zarca (Macías *et al.*, 2010) que cubre la secuencia de Agua Caliente al noroeste del mapa (Fig. 3.10) y corresponde a la unidad 2.3, la cual es la de mayor longitud y anchura de esta etapa, debido a que se encuentra desde la cima hasta la parte baja del volcán (1 520 msnm), con dos direcciones principales, hacia el NW y a los 2 400 msnm cambia de dirección hacia el N. El flujo de lava está conformado de dos partes principales: la parte basal está representada por un autobrechamiento y bloques angulares con diferentes cantidades de vesículas y la parte superior es masiva, con pocas vesículas (Macías *et al.*, 2010). Esta lava fue fechada por estos mismos autores en $10\ 000 \pm 6\ 000$ años AP, mediante $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, (sección Tac0311a, Tac0314a).

Estratigráficamente, le sigue una secuencia compuesta por un flujo de bloques y cenizas y un flujo de lava de ~70 m de espesor, que afloran en la ladera sur del Tacaná (unidad 2.4). En las secciones Tac0807 y Tac0808 se observa el depósito de flujo de bloques y cenizas,

de ~5 m de espesor: en la parte inferior presenta pequeños bloques (centímetros), inmersos en una matriz de ceniza gris clara. La parte superior del flujo de bloques y cenizas mide ~50 cm de espesor, de color rojizo, con bloques de 30-40 cm. La parte superficial se transforma a paleosuelo. En muestra de mano, los bloques de ambos niveles presentan fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol, inmersos en una matriz fina de color café claro. La lava que sobryace al flujo piroclástico consta de dos partes: la basal de ~1 m de espesor de color gris oscuro, con autobrechamiento, que se encuentra en contacto directo con un paleosuelo incipiente sin materia orgánica. La superior, es masiva de color gris (Fig. 3.13). La lava es de composición andesítica, en muestra de mano se observa una textura porfirítica, cuya mineralogía consta de fenocristales de plagioclasa (5 mm), piroxenos (4 mm) y pequeños anfíboles (<2 mm) inmersos en una matriz fina de color gris clara (Sección Tac0807).



Figura 3.13. a) Fotografía que muestra el flujo de lava masivo (unidad 2.4), de color gris que sobryace al flujo de bloques y cenizas color rojizo, sección Tac0807. b) Detalle de la base del flujo de lava, donde se observa oxidación por el contacto entre la lava y el sustrato (flujo de bloques y cenizas color ocre).

Posteriormente se tiene la unidad 2.5, desde la cima hasta los 2 850 msnm. Está limitada al este por el cráter de colapso, donde se localiza el cráter de la explosión de 1986 (Fig.

3.9). Esta unidad, está compuesta por un flujo de lava en bloques de composición andesítica, de color gris oscuro, con espesor promedio de 37 m. En muestra de mano (Tac0827), se observa una roca con textura porfirítica, compuesta por fenocristales de plagioclasa (5 mm), piroxenos (1 mm) y anfíboles (4mm), que se encuentran inmersos en una matriz fina del mismo color. Sobre esta unidad, se encuentra la unidad 2.6, que se ubica desde los 2 100 hasta los 3 660 msnm y la unidad 2.7, fluctúa entre 3 100 y 3 700 msnm. Estas dos últimas unidades, corresponden a flujos de lava que se describieron mediante fotointerpretación y modelos de elevación, sin verificación de campo.

Finalmente, la unidad 2.8, se encuentra desde la cima del volcán (4 080 msnm) hasta los 2 100 msnm, consta de un flujo de lava en bloques de composición andesítica. Esta se bifurca a los 3 660 msnm por un alto topográfico, tiene un espesor promedio de 71 m y una longitud máxima de 3.62 km. En muestra de mano, se observó una textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa (5 mm) clinopiroxeno (1 mm), olivino y anfíboles inmersos en una matriz fina de color gris claro (sección Tac0826). De todos los flujos de lava cartografiados en esta etapa eruptiva, este flujo, fue el único que presentó fenocristales de olivino.

3.2.3. Etapa 3

La Etapa 3, consiste de 10 unidades intercaladas, comprendiendo flujos de lava, flujos de bloques y cenizas, avalanchas de escombros y domos. Se encuentra expuesta en la ladera NE del volcán y limitada al norte por el Río San Rafael. Sobre los depósitos de esta etapa, se encuentran edificadas las poblaciones de Tuimanj, Canisben, Chichuj, San Rafael y Vega del Volcán (Fig. 3.3). Se realizó el perfil C-C' y una sección orientada de W a E (Figs. 3.14 y 3.15 a y b). En esta etapa eruptiva, se describieron 36 afloramientos distribuidos en toda el área. Cabe resaltar que la unidad 3.0, corresponde a un flujo de lava y es el más antiguo de esta etapa, ya que se encuentra cubierto por casi todas las otras unidades.

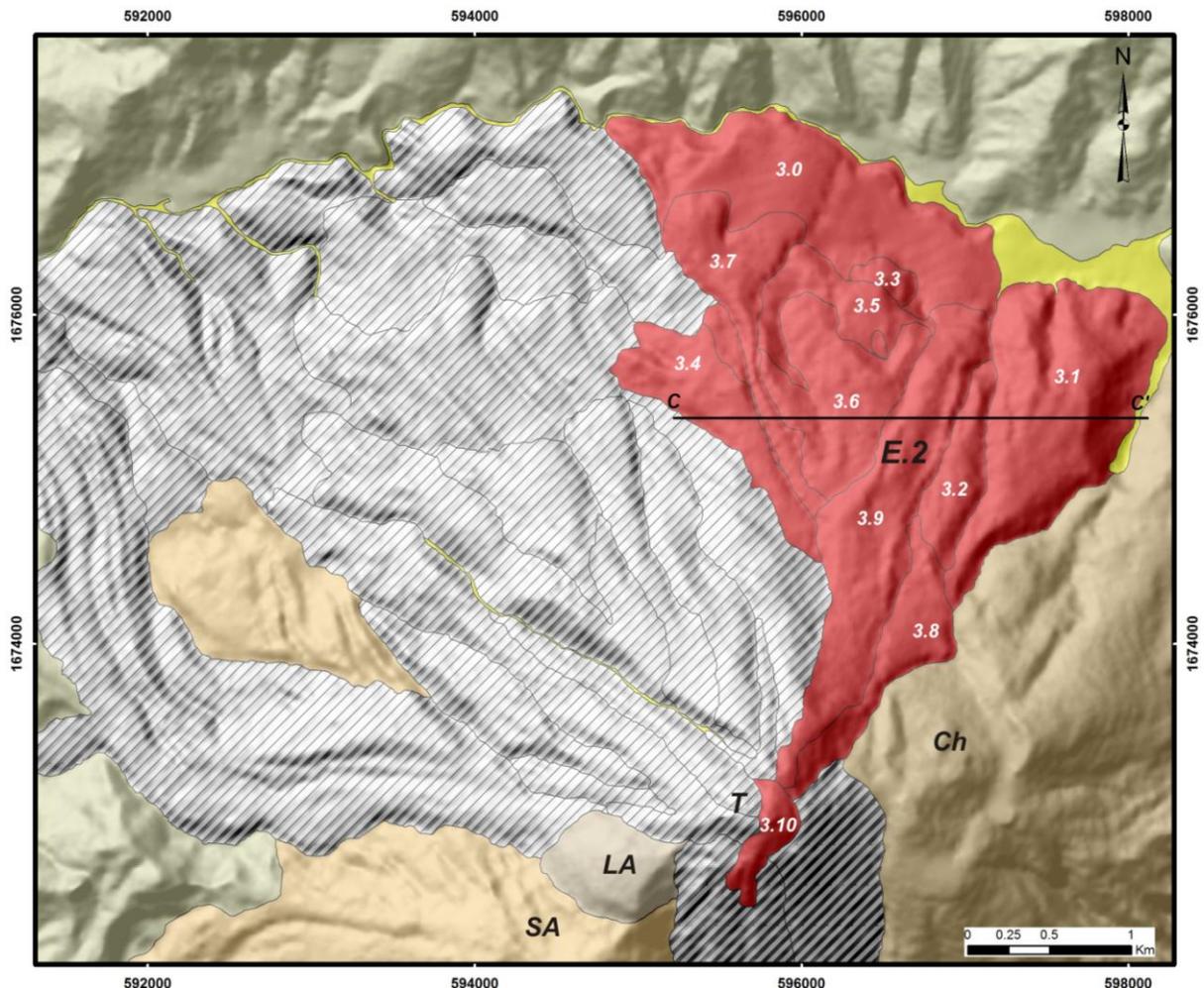
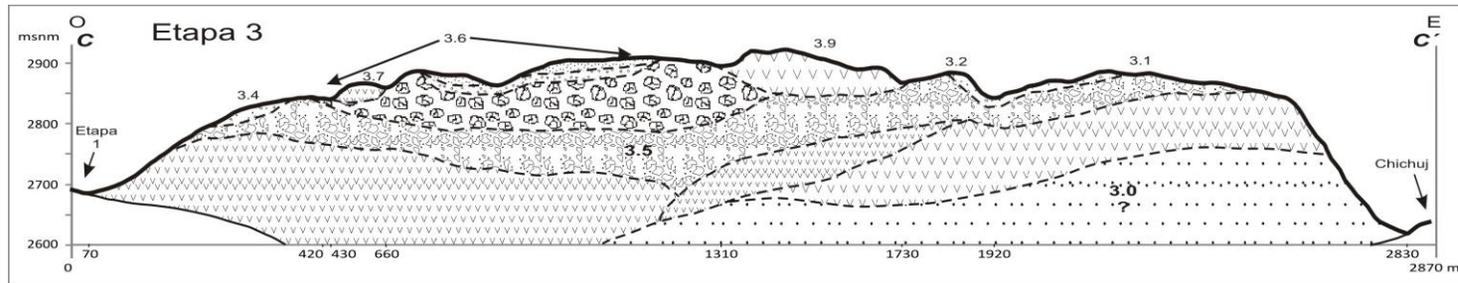


Figura 3.14. Modelo digital del terreno generado en ILWIS 3.3; donde se muestra a detalle en color rojo la Etapa 3 y la sección del perfil C-C'. Abreviaturas: San Antonio (SA), Domo Las Ardillas (LA), Tacaná (T) y Chichuj (Ch).

a)



b)

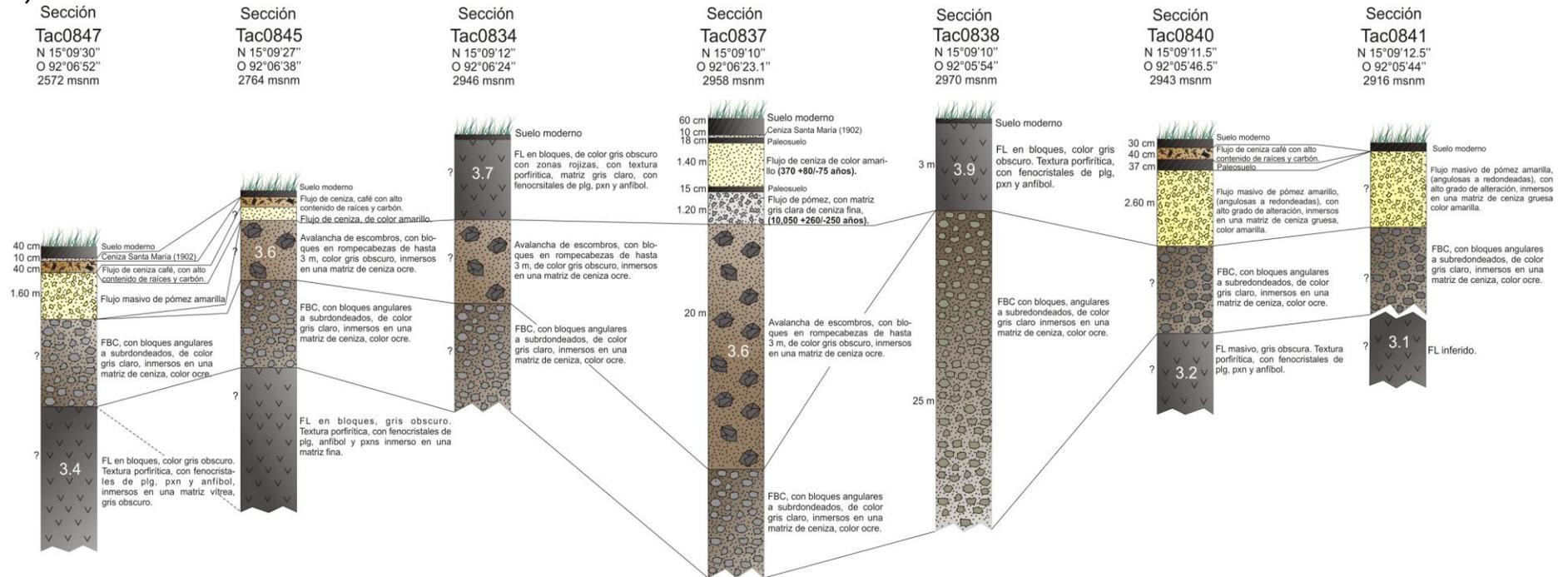


Figura 3.15. a) Perfil topográfico de la sección C-C', donde se muestra la sobreposición de las unidades de la Etapa 3. b) Correlación estratigráfica de secciones seleccionadas de la Etapa 3. Abreviaturas: Flujo de bloques y cenizas (FBC) y flujo de lava (FL).

En la base de la Etapa 3, se encuentra una secuencia conformada por un flujo de lava masivo muy alterado correspondiendo a la unidad 3.0 (Tac0927), sobreyacido por un flujo de bloques y cenizas. El flujo de lava, es de composición andesítica, con un espesor de ~90 m, con alto grado de oxidación y de color gris oscuro a rojizo. En muestra de mano, se observa una textura porfirítica y fenocristales de plagioclasa, anfíboles y piroxenos (2 mm), inmersos en una matriz fina gris oscura. El flujo de bloques y cenizas, tiene un espesor de 20 m (sección B7), de color gris claro a gris oscuro, con bloques de hasta 70 cm de diámetro, de color gris, rosa y blanco, inmersos en una matriz gris, rica en ceniza media. Probablemente corresponda a la unidad 3.5 (mencionada más adelante) y se encuentra expuesta en la localidad de San Rafael y en los límites del Río San Rafael.

Posteriormente se tiene la unidad 3.1, corresponde a un flujo de lava que no se observó en campo, pero se delimitó por medio de la fointerpretación, seguido por un depósito de flujo de bloques y cenizas, de color café claro a ocre, con espesor promedio de 100 m y un volumen calculado de 0.12 km³. Esta unidad, se encuentra expuesta desde la localidad de Chichuj hasta las cercanías de Vega del Volcán (Fig. 3.3) y limita al E con la ladera del volcán Chichuj (sección Tac0842). Los bloques que conforman este depósito, son subangulares a subredondeados, de hasta 70 cm de diámetro, de color gris claro, textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y anfíbol, inmersos en una matriz fina. Estos bloques, se encuentran inmersos en una matriz de ceniza media y color ocre. Después de este depósito, se encuentra otro flujo piroclástico, rico en pómez de color amarillo, con 50 cm de espesor, fragmentos de pómez de hasta 30 cm de diámetro y textura porfirítica.

A continuación se tiene la unidad 3.2, conformada por un flujo de lava masivo, gris oscuro y muy alterado (sección Tac0839). En muestra de mano, se observa una lava de composición andesítica con textura porfirítica, fenocristales de plagioclasa, piroxenos y anfíboles, inmersos en una matriz gris oscura. Le sigue un depósito de flujo de bloques y cenizas, ocre, con bloques de diversos tamaños (12 a 50 cm) con espesor promedio de 34 m. En la pared E de la misma unidad, a los 2 900 msnm se encuentra expuesto un depósito de flujo piroclástico, masivo de pómez amarilla, con alto grado de alteración (Fig. 3.15).

Presenta clastos redondeados de pómez blanquecinos, fragmentos de carbón y en menor proporción líticos pequeños de color gris claro. Los clastos de pómez, contienen vesículas alargadas, textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y anfíboles cuyos minerales se encuentran inmersos en una matriz fina de color amarillo. Todos los clastos y líticos, se encuentran en el interior de una matriz de ceniza de color amarillo claro. Le sigue un paleosuelo de ~37 cm de espesor y finalmente un flujo de ceniza masivo, café claro, de 40 cm de espesor, con fragmentos de pómez del tamaño de lapilli y gran cantidad de materia orgánica y carbón.

Posteriormente se tiene la unidad 3.3, que corresponde a un flujo de lava en bloques de color gris claro, que aflora en la parte baja del volcán (sección Tac0849). Se encuentra entre los 2 460 y 2 580 msnm. En muestra de mano, se observa una roca de composición andesítica, textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol, dentro de una matriz fina de color gris clara. Mientras que la unidad 3.4 (sobreyace a la unidad 3.3), consiste en un flujo de lava en bloques, muy alterado, de color gris oscuro a tonos rojizos. La unidad 3.4, es una lava de composición andesítica, textura porfirítica, fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíboles con coronas de reacción; estos minerales se encuentran inmersos en una matriz vítrea gris oscura (Tac0846). Ambos depósitos, se encuentran cubiertos por un flujo de bloques y cenizas de color ocre, mencionado anteriormente, en la descripción de la unidad 3.2. Sólo sobre la unidad 3.4, se encuentra expuesto el depósito de flujo de pómez amarilla y el de ceniza de color café, con alto contenido de carbón y raíces. Esta secuencia se observa en la sección Tac0847.

La unidad 3.5, corresponde a flujo de bloques y cenizas, color ocre que se encuentra expuesto en la sección Tac0917 con un espesor promedio de 90 m, con bloques de gran tamaño (>50 cm) de color gris, rosa y blanco inmersos en una matriz gris, rica en ceniza media. Este flujo de bloques y cenizas fue fechado mediante el método de C^{14} en $16\ 350 \pm 50$ años AP (Mora *et al.*, 2004). Esta unidad muestra una superficie irregular, que fluctúa desde 2 780 hasta 2 460 msnm. Está cubierta por una capa delgada de ceniza de color café. Enseguida aparece un depósito de avalancha de escombros (Tac0833), denominado

Avalancha Tuimanj, que se ubica en los alrededores de la villa con en el mismo nombre a los 2 900 msnm. Ahí se observa un paisaje de montículos (*hummocks*), conformados por bloques con estructura de rompecabezas, de más de 3 m de diámetro (Fig. 3.16). Dichos bloques tienen una composición andesítica. En muestra de mano, la andesita es de color gris claro y textura porfírica, presentando fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol inmersos en una matriz fina de color gris claro. La mineralogía de los bloques que conforman los montículos de la avalancha de escombros, es muy similar a la de los flujos de lava que la circundan (unidad 3.6). Encima de la avalancha, se ubica el depósito de flujo de pómez de color amarillo, con clastos de pómez blanquecina y carbón, que se encuentran dentro de una matriz ocre conformada por ceniza fina-media. Este flujo de pómez fue fechado mediante C^{14} , en 10 050 +260/-250 años AP, el cual cambia a paleosuelo incipiente. A continuación, se ubica un depósito de flujo de cenizas, color amarillo, con fragmentos de carbón, que fueron fechados en 370 +80/-75 años AP y también grada a otro paleosuelo. Finalmente, se encuentra una capa de ceniza de color blanca, de la erupción de 1902 del volcán Santa María, ubicado en Guatemala (sección Tac0837).

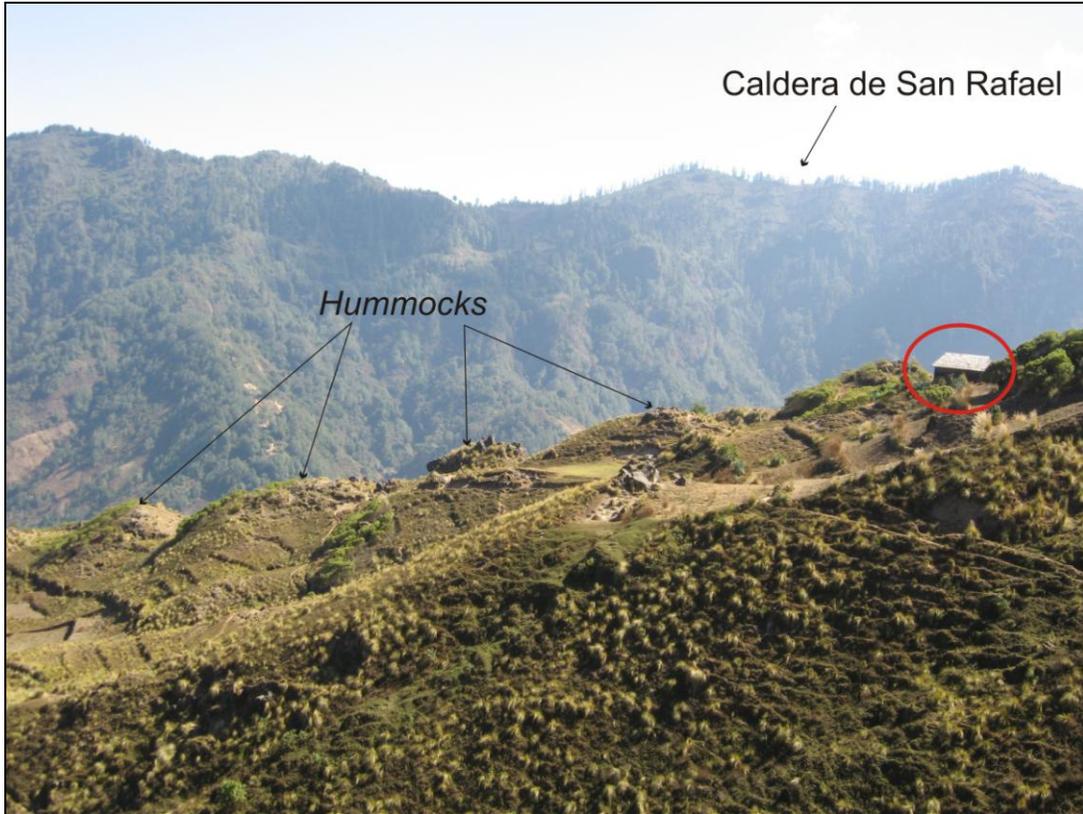


Figura 3.16. Vista panorámica al NE de la Avalancha Tuimanj (unidad 3.6), en la localidad del mismo nombre en Guatemala. Se observa un paisaje de lomeríos conformada por montículos (*hummocks*). En el círculo se observa una casa como escala.

Las unidades 3.7 y 3.8, corresponden a flujos de lava, de 44 y 57 m de espesor respectivamente. La unidad 3.7, se compone de un flujo de lava en bloques, color gris oscuro, con fenocristales oxidados, dentro de una matriz fina muy alterada (Fig. 3.17). Sobreyaciendo a éste, se encuentra un depósito de flujo de bloques y cenizas con suelo bien desarrollado.



Figura 3.17. Fotografía de un afloramiento de la unidad 3.7, en la que se observa un flujo de lava en bloques.

En la unidad 3.8 se observa una morfología irregular de lomeríos, compuesta por un flujo de lava en bloques, mayores a 3 metros (Fig. 3.18) de color gris claro, de composición andesítica. En muestra de mano la andesita es muy densa, con textura porfirítica y fenocristales de plagioclasa (>7 mm), anfíbol (4-5 mm), clinopiroxenos y ortopiroxenos, inmersos en una matriz vítrea de color gris oscuro (Tac0906). Las muestras de lava presentan enclaves de color gris oscuro-negro, con fenocristales de plagioclasa y piroxeno.



Figura 3.18. Fotografía de un afloramiento de la unidad 3.8, en la que se observa la lava en bloques de color gris.

La unidad 3.9 presenta poca vegetación, lo cual concuerda con la lava más joven de esta etapa; se ubica desde la cima hasta la parte baja del volcán (2 500 msnm). En la base de esta unidad, se encuentra un depósito de flujo de bloques y cenizas de color ocre, seguido por un flujo de lava en bloques de color gris oscuro y composición andesítica, que constituye la unidad 3.9. La morfología de esta unidad está muy bien preservada, ya que se observan perfectamente las estructuras de *levées* laterales, tanto en campo como en fotografías aéreas y modelos de elevación, particularmente cerca de la aldea de Tuimanj. En muestra de mano la andesita es de textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa (4 mm), piroxenos (3 mm) y anfíboles (0.8-1.2 cm). El flujo de lava presenta enclaves redondeados muy porosos, de color gris oscuro-negro, con fenocristales de plagioclasa y piroxeno, inmersos en una matriz vítrea de color gris oscuro (sección Tac0843).

Finalmente, la unidad 3.10 se ubica en la cima del volcán Tacaná y corresponde a un domo de lava tipo *coulée* (Fig. 3.19), conformado en la parte superficial por bloques de hasta 5 m

de diámetro de composición andesítica. En muestra de mano se observa una andesita de textura porfirítica, con minerales euhedrales de plagioclasa de 3-5 mm, piroxenos de 2 mm y anfíboles de 3 mm, inmersos en una matriz vítrea, de color gris oscuro. Las plagioclasas presentan aureolas de reacción (Tac0811).



Figura 3.19. Fotografía aérea, en donde se observan los dos domos centrales del Tacaná: uno de composición dacítica correspondiente a la unidad 2.5 y otro de composición andesítica (unidad 3.10). Este último corresponde a un domo tipo *coulée*. A la izquierda se observa la zona de fumarolas de 1950 (Macías *et al.*, 2010).

3.3. Distribución de los flujos de lava

De manera general y como se puede observar en el mapa (Fig. 3.20), los flujos que conforman el edificio principal del Tacaná tienen una distribución espacial y preferencial en la ladera norte, en forma semi-radial. La mayoría de estos flujos son de longitudes cortas y se encuentran controlados por la topografía preexistente. Sólo algunos flujos fueron emplazados en la ladera sur del Tacaná, alcanzando distancias relativamente mayores. Como se aprecia en el modelo digital de elevación (Fig.3.20) el remanente del borde norte de la Caldera San Rafael sirvió como un fuerte, impidiendo que los flujos de lava recorrieran mayor distancia. Además, en general los flujos de lava son de poca extensión y controlados por la gravedad, por lo que es muy difícil la correlación de cada unidad, inclusive de una barranca a otra, de modo que se agruparon en sectores, que fueron clasificados en etapas eruptivas.

A continuación se describe la morfología de los distintos flujos de lava del Tacaná, mencionando también otros rasgos físicos importantes de cada unidad en las tres etapas eruptivas del volcán.

Como ya se mencionó la Etapa 1 consta de 8 unidades de lava, la cual se encuentra afectada por el cráter de colapso, ocurrida hace <21 mil años (Macías *et al.*, 2010). La Etapa 2, también está en contacto directo por dicho cráter (Fig. 3.11), consta de 6 unidades de lava, una unidad de avalancha de escombros y un depósito de flujo de bloques y cenizas. Finalmente la Etapa 3, consta de 8 unidades de lava, un domo central en la cima, un depósito de flujo de bloques y cenizas de 16 mil años; Mora *et al.*, 2004) y otro depósito de avalancha de escombros, no reportado anteriormente.

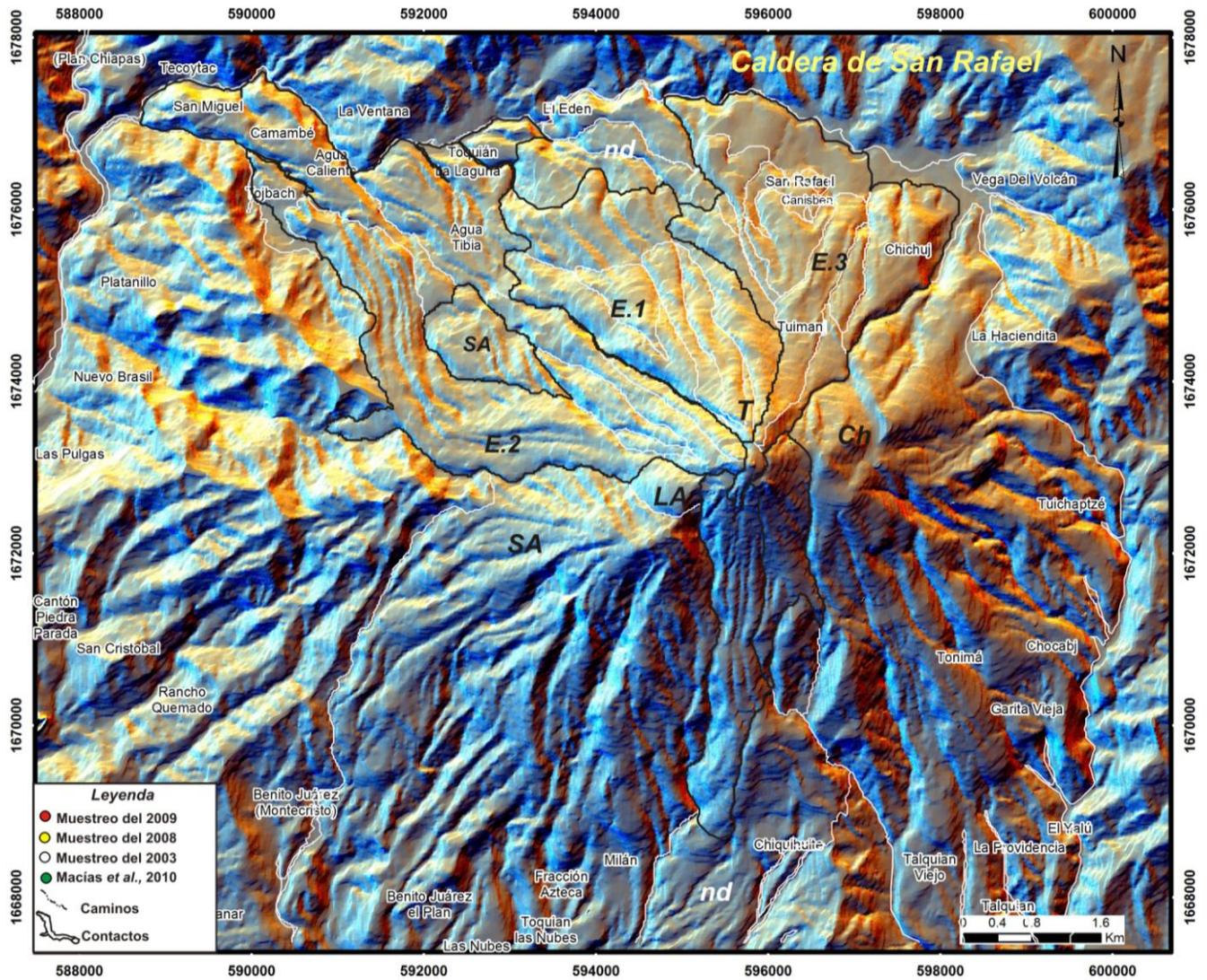


Figura 3.20. Modelo digital de relieve sombreado con filtro colshadow (sombreado dorado- azul), generado en ILWIS 3.3; donde se muestran las cuatro estructuras que conforman el CVT, terracerías, poblaciones y puntos de muestreo. Muestreo 2008 y 2009 realizado en este trabajo. Abreviaturas: San Antonio (SA), Domo Las Ardillas (LA), Tacaná (T), Chichuj (Ch), Etapa 1 (E.1), Etapa 2 (E.2) y Etapa 3 (E.3).

3.4. Morfología de los flujos de lava

Mediante el análisis de fotointerpretación, modelos digitales del terreno y trabajo de campo, se identificaron 21 flujos de lava, un domo y otros depósitos provenientes del volcán Tacaná. Los flujos de lava están agrupados cronológicamente en tres etapas eruptivas (Etapa 1, Etapa 2 y Etapa 3), que constan a su vez de varios flujos de lava o en su caso, de otros depósitos volcánicos que se describen a continuación.

3.4.1. Primera Etapa Eruptiva (E1)

Las lavas que conforman la Etapa 1 son relativamente más antiguas, considerando su posición estratigráfica y el desarrollo de suelo-vegetación, así como su alto grado de intemperismo.

Para esta etapa se describieron en total 12 afloramientos que permitieron reconocer ocho flujos distintos de lava, cubriendo un área de 6.49 km². Siete de los ocho flujos fueron emplazados principalmente en la parte central de la ladera N del volcán y uno en la ladera S (Fig. 3.21). Las lavas que conforman esta etapa, están cortadas por el cráter de colapso del Tacaná, asociado a la avalancha, denominada Agua Caliente (Macías *et al.*, 2010).

Las lavas de esta etapa están limitadas a W, por el cráter mencionado y al E colinda con las lavas de la Etapa 3 (E3). En el mapa (Fig. 3.21) puede observarse la Etapa 1 en color verde, en la parte central del edificio volcánico.

Cinco de los ocho flujos de lava de la Etapa 1 presentan una morfología alargada, desde la cima hasta la mitad de las faldas del volcán, entre 2 500 y 2 100 msnm, con distancias promedio de 2.5 km, tomando como origen el punto más alto del Tacaná (Fig. 3.21).

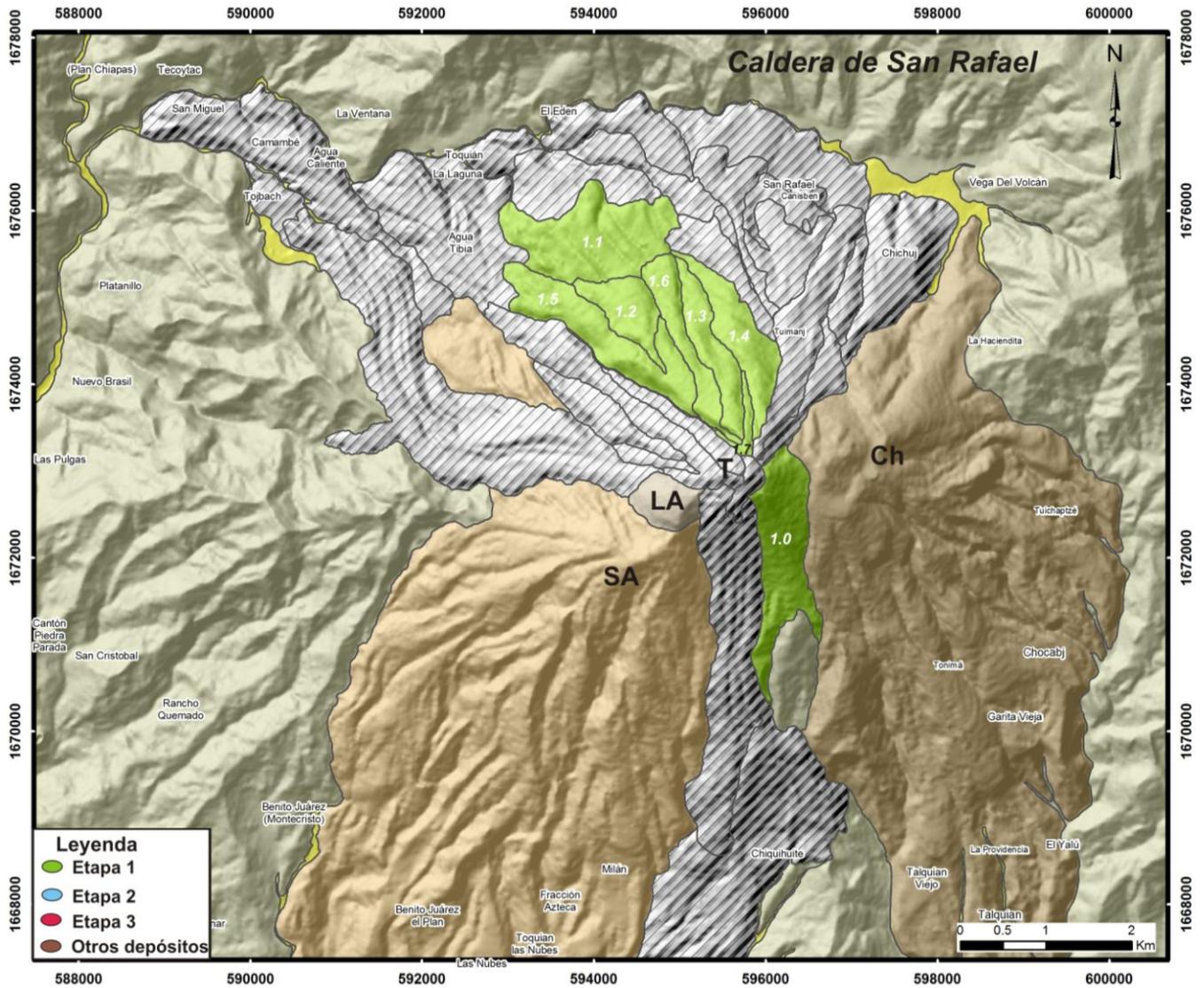


Figura 3.21. Modelo digital del terreno generado en ILWIS 3.3; que muestra las tres etapas eruptivas (color verde la Etapa 1) así como las cuatro estructuras que conforman el Complejo Volcánico Tacaná. Abreviaturas: San Antonio (SA), Domo Las Ardillas (LA), Tacaná (T) y Chichuj (Ch).

La unidad 1.0, es un flujo de lava de grandes bloques (Fig. 3.22) emplazado hacia el S19°E de la cima del Tacaná. El flujo fue controlado por la topografía pre-existente y por una pendiente mayor (entre 43° y 65°) comparado con los flujos de lava que se distribuyeron hacia la ladera norte del volcán (Fig. 3.23). Tiene una distancia de ~2.5 km, presenta una morfología alargada, con anchura regular (~570 m) a lo largo de la unidad, que inicia

desde la cima y termina a 2 600 msnm. Se encuentra bifurcado en su parte final, rodeando una parte alta del basamento del CVT conformada por granitos.



Figura 3.22. Sección Tac0805, corresponde a la unidad 1.0 de la Etapa 1, donde se observa un flujo de lava proveniente del volcán Tacaná, conformada por bloques de ~3 m, de color gris claro a ocre.

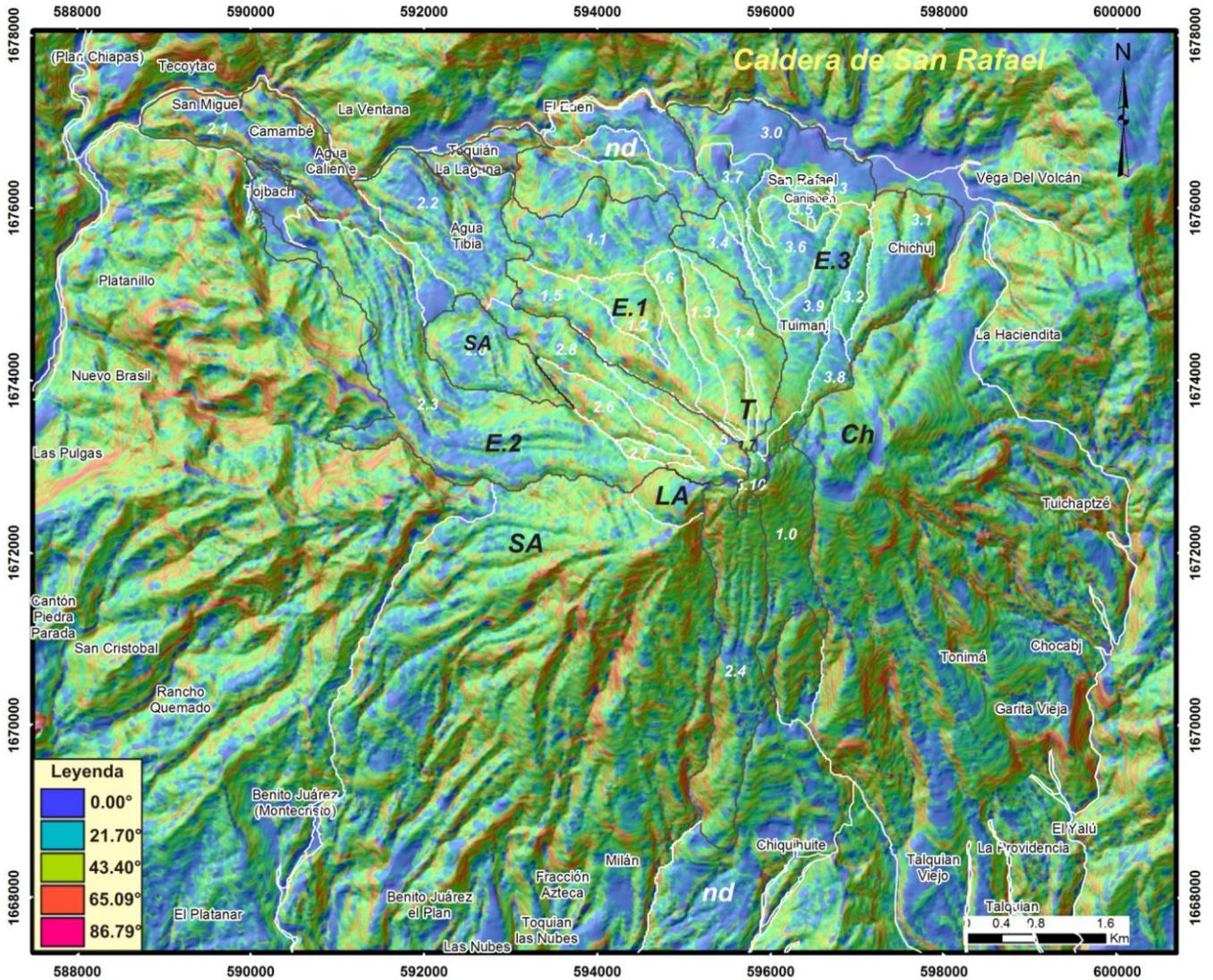


Figura 3.23. Modelo digital de relieve sombreado de pendientes, generado en ILWIS 3.3; donde se muestran las cuatro estructuras que conforman el CVT. Abreviaturas: San Antonio (SA), Domo Las Ardillas (LA), Tacaná (T), Chichuj (Ch), Etapa 1 (E.1), Etapa 2 (E.2) y Etapa 3 (E.3)

La lava de la unidad 1.1 está localizada en la parte baja del volcán, orientada hacia el NW, con superficie ondulada de poca pendiente $<40^\circ$ (Fig. 3.23) y con márgenes laterales (*levées*). El flujo de lava 1.1, se encuentra en algunas cañadas de la parte baja del Tacaná, donde se observaron estructuras bandeadas (Fig. 3.24), resalta por su gran longitud, con distancias máximas de 4 km.



Figura 3.24. Fotografía a detalle del flujo de lava 1.1, de la Etapa 1, donde se observan estructuras bandeadas. Escala: pala de 60 cm. Sección Tac0923.

La unidad 1.2 presenta una morfología de abanico con pendiente homogénea. Esta lava se observa a la elevación de 3 100 msnm para después extenderse pendiente abajo con forma de abanico y un frente poco ondulado; este flujo se encuentra rodeado por la unidad de flujo de lava 1.5, que se bifurca en la parte alta del volcán.

De manera general, las unidades de lava 1.3 y 1.4 presentan una morfología alargada, iniciando en la cima hasta 2 540 msnm, con anchuras que varían de 120 a 500 m a lo largo de los flujos. Presentan superficies irregulares que forman frentes abruptos ($>43^\circ$), ya que en la cima de éstas, se observan bloques de distintos tamaños (centímetros hasta metros), apilados con espesores de ~52 m formando cañadas profundas. En ambos casos, se observan los frentes de las unidades en forma de punta, en la parte final de los flujos (Fig. 3.21); esto se debe a que se encuentran cubiertos por otras unidades más recientes.

Las unidades 1.5 y 1.6, son de las unidades de flujo más recientes de esta etapa y se ubican desde la cima hasta la parte baja del volcán (2 040 msnm), alcanzando distancias de ~2.8 a 3.8 km. Presentan morfología alargada y controlada por la topografía pre-

existente. La unidad 1.5 se ve afectada al oeste, por el cráter de colapso, con pendiente mayor a los 86° (Fig. 3.23) y en la parte alta se encuentra bifurcado, rodeando a la unidad 1.2. La unidad 1.6, se encuentra cubriendo a la mayoría de las unidades anteriores teniendo una amplia distribución y longitud. La morfología de ambas unidades en superficie es irregular, debido a la presencia de grandes bloques que se encuentran en contacto entre sí, originando una morfología abrupta y con lavas altamente intemperizadas por factores tanto climáticos como antropogénicos.

Finalmente, el flujo de lava 1.7 se ubica en la cima del Tacaná, siendo el flujo más corto de esta etapa, con una longitud promedio de 1.3 km a partir de la cima. Este flujo se encuentra bifurcado al norte y controlado por los flujos de lava anteriores a éste. Con una orientación de $N4^\circ E$ y $N42^\circ W$, su morfología es alargada y con una superficie rugosa.

3.4.2. Segunda Etapa Eruptiva (E2)

La Etapa 2 (E2), consiste de ocho unidades, que cubren un área de 13.64 km^2 . Seis de éstas están conformadas por flujos de lava, una por un depósito de avalancha de escombros (Agua Caliente) y otra más por un depósito de flujo de bloques y cenizas, emplazado al NW. La mayoría de estas unidades, se encuentran distribuidas principalmente en la ladera N, con una orientación $\sim N50^\circ W$ y sólo un flujo de lava fue emplazado hacia la ladera S (Fig. 3.25), a la altura del poblado de Chiquihuite (1 900 msnm). Las unidades al norte del volcán, se encuentran limitadas al E por el cráter de colapso (la cual sirvió como barrera topográfica) y al oeste por el basamento conformado de granitos, que jugaron un papel de alto topográfico y determinaron el emplazamiento de las diversas unidades de esta etapa.

Las unidades 2.1 y 2.2 se localizan en las faldas del volcán, cerca de los poblados de Agua Caliente y Agua Tibia, limitadas al norte por los remanentes de la Caldera de San Rafael y por la unión de los ríos Tochab, Coatán y San Rafael. La unidad 2.1, está formada por un depósito de avalancha de escombros con morfología irregular. La parte alta de la unidad se observa canalizada y posteriormente se expande, formando un abanico con dos lóbulos

principales. La unidad 2.2 se conforma por un flujo de bloques y cenizas, donde se observa una morfología en abanico que finaliza con un escarpe formado por un afluente del Río San Rafael. El escarpe no es recto sino más bien ondulado, controlado por la pared interna de la Caldera de San Rafael. Como se observa en el mapa (Fig. 3.23), ambas unidades mantienen una pendiente constante ($<21^\circ$) al interior del contacto, mientras que en las orillas se presentan pendientes fuertes ($\geq 65^\circ$).

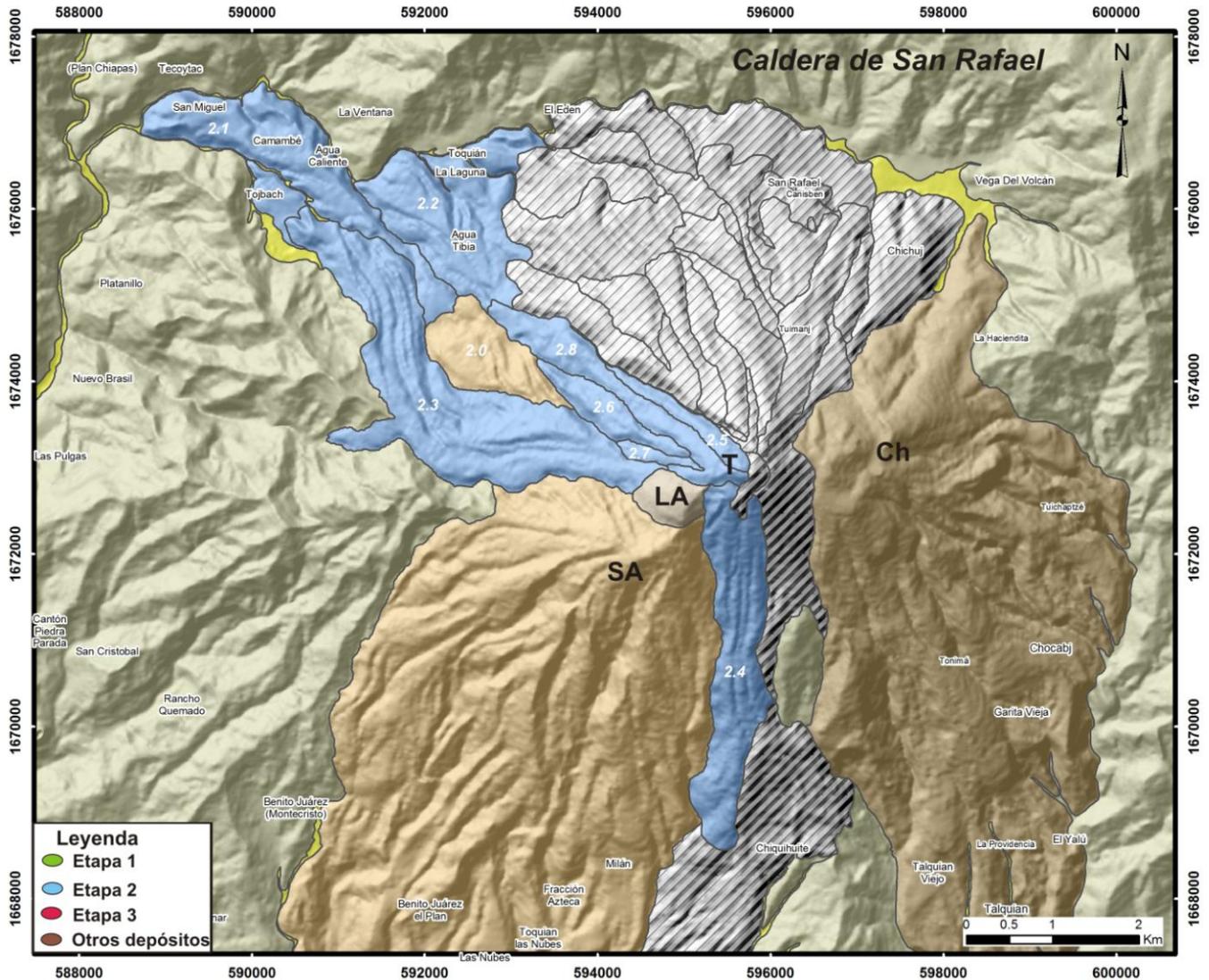


Figura 3.25. Modelo digital del terreno generado en ILWIS 3.3; donde se muestra en color azul la Etapa 2 y las 4 estructuras que conforman el Complejo Volcánico Tacaná. Abreviaturas: San Antonio (SA), Domo Las Ardillas (LA), Tacaná (T) y Chichuj (Ch).

De esta etapa resaltan varias unidades de flujos de lava, como las unidades 2.3 y 2.4 que son las de mayor longitud, con distancias máximas de entre 4 y 6 km respectivamente y representan los flujos de lava más antiguos de esta fase. Estas unidades de lava, están conformadas por bloques grandes (~3 m de diámetro) apilados, originando una superficie irregular. La forma de estas lavas es alargada, con una anchura promedio a lo largo de todo el flujo de 800 m y con presencia de *levées* laterales. El flujo de lava 2.3 fue emplazado hacia el W-NW, con una pendiente menor de ~30° en promedio, se encuentra limitada al oeste por un alto topográfico conformado por rocas graníticas del basamento, a una altitud de 2 400 msnm, la colada de lava cambia de dirección, del W al NW, provocando un derrame de lava, hacia una pequeña abertura al oeste. El flujo de lava 2.3 fue estudiado por Macías *et al.*, (2000) y lo denominaron Flujo de Lava Agua Zarca, asignándole una edad de 10 000 ±5 000 años A.P.

El flujo de lava 2.4, tiene una distribución preferencial hacia la ladera S, con pendiente promedio de 50° (Fig. 3.23), que está limitada al oeste, por el edificio del volcán San Antonio y al este por las lavas de la Etapa 1 (Fig. 3.25).

Ambos flujos de lava (2.3 y 2.4) finalizan de manera ondulada y con pendientes de entre 21° y 43° (Fig. 3.23).

La unidad 2.5, se encuentra limitada al este por el escarpe del Tacaná. Esta lava se caracteriza por una morfología alargada y canalizada en una depresión topográfica. Presenta una superficie irregular formada por diversos bloques de lava que se encuentran apilados entre sí y su frente es en forma de punta, con pendiente menor a 40° (Fig. 3.23). El flujo 2.6 tiene una longitud y ancho mayor que la unidad 2.5; dicho flujo termina en forma de pico. La unidad 2.7 es la de menor longitud de esta etapa eruptiva, presentando un frente lobular y un ancho promedio de 200 m.

Resalta la unidad 2.8 por su composición mineralógica y su distribución sobre las laderas del Tacaná. Este flujo de lava está conformado por grandes bloques de hasta 10 m de diámetro (Fig. 3.26), con longitud máxima de 3.6 km a partir de la cima. Además en la

parte inicial, el flujo (parte superior ~3 700 msnm), se encuentra bifurcado. Su distribución es irregular, ya que en la parte media se ensancha y la parte final se encuentra controlada por el escarpe, asociado a la avalancha de escombros Agua Caliente. El flujo de lava está canalizado en esta depresión, para terminar de manera abrupta y en forma de punta a los 2 100 msnm, con un espesor de ~70 m. Este flujo de lava es el más joven de la Etapa 2.



Figura 3.26. Fotografía de un afloramiento de la unidad 2.6, compuesta por flujos de lava en bloques, con fenocristales de olivino. En el círculo rojo se observa la escala. Sección Tac0826.

3.4.3. Tercera Etapa Eruptiva (E3)

Para esta etapa eruptiva (E3), se determinaron ocho flujos de lava intercalados con un depósito de avalancha de escombros y un flujo de bloques y cenizas, además de un domo que suman un total de 11 unidades que se distribuyen principalmente hacia la zona NNE del volcán. Una unidad se encuentra del lado S y otra más en la cima (Fig. 3.28). Este último conforma uno de los tres domos centrales del Tacaná. Las unidades de esta etapa, cubren un área aproximada de 6.83 km².

La unidad 3.1 está delimitada por el cráter *somma* (cráter antiguo, originado por el colapso del flanco oeste del volcán Chichuj, que dejó una estructura en forma de herradura que posteriormente fue ocupado por domos de lava), hasta el valle del Río San Rafael y al E por la estructura volcánica del Chichuj. Dicho flujo de lava tiene una dirección N34°E, con una longitud máxima de 3.8 km y de ancho variable, presentando una morfología en forma de abanico (Fig. 3.27) y representa el flujo de lava de mayor extensión de la Etapa 3.

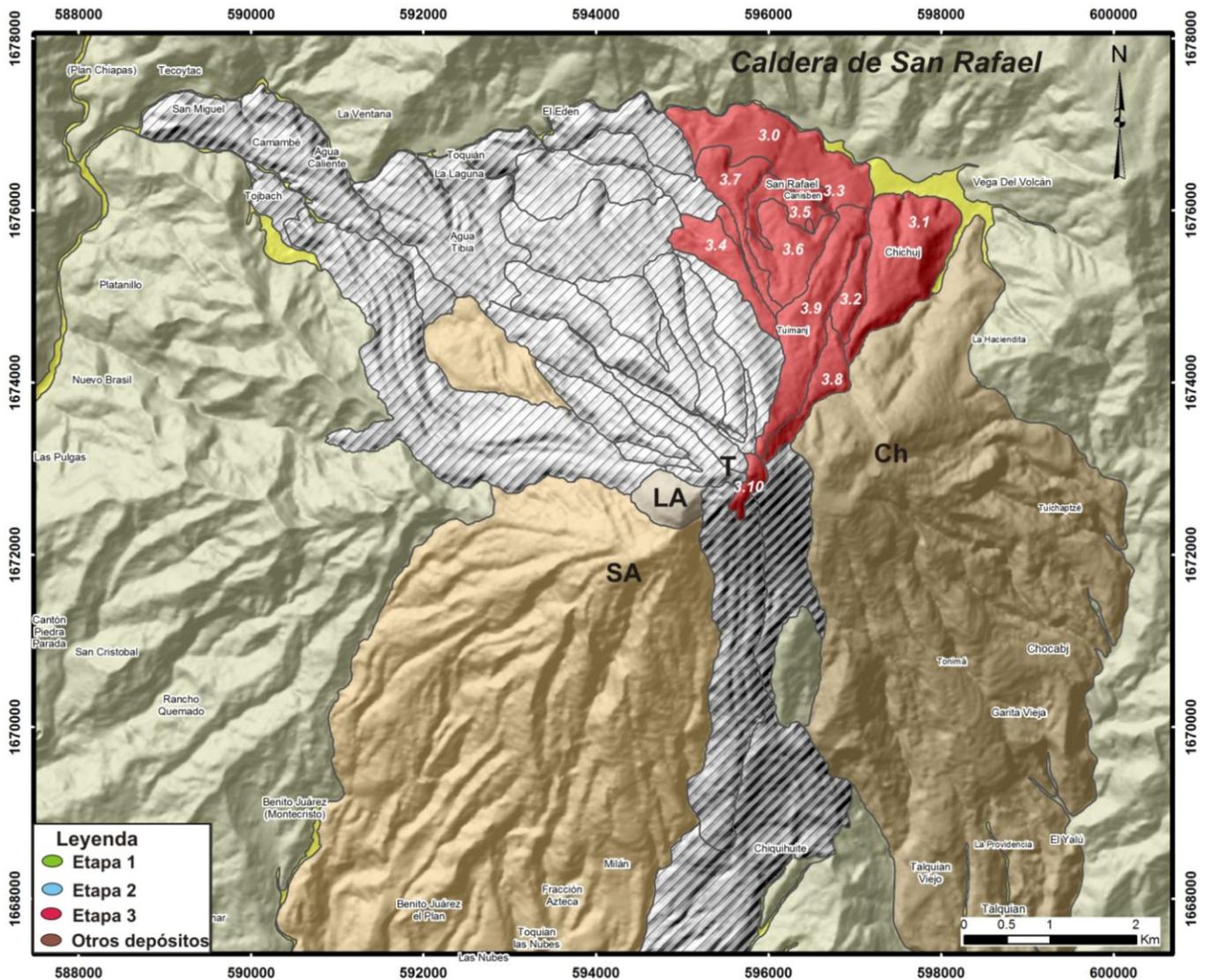


Figura 3.27. Modelo digital del terreno generado en ILWIS 3.3; donde se muestra en color rojo la Etapa 3 y las 4 estructuras que conforman el Complejo Volcánico Tacaná. Abreviaturas: San Antonio (SA), Domo Las Ardillas (LA), Tacaná (T) y Chichuj (Ch).

Las unidades 3.2, 3.3, 3.4 y 3.7 son lavas en bloques, con una longitud promedio de 3.4 km. En general, los flujos presentan una morfología alargada y son de poca anchura (250, 420, 330 y 100 metros respectivamente), con pendientes de $\sim 30^\circ$ (Fig. 3.23) y frentes abruptos (escarpes de $>50^\circ$). Los flujos de lava 3.2 y 3.7, presentan *levées* laterales de aproximadamente 7 m de alto (Fig. 3.28). El emplazamiento de los flujos de lava, estuvo influenciado por la paleotopografía ya que en las partes altas se observan pendientes muy fuertes (Fig. 3.23), mientras que en las partes bajas y suaves se expandieron en forma de abanico (unidad 3.4). También se aprecian en forma lobular (unidades 3.7 y 3.3) o de punta (unidad 3.2), como se observa en el mapa de la figura 3.27.



Figura 3.28. Fotografía de un afloramiento de la unidad 3.7, en la cual se observa un *levée* lateral del flujo de lava, con una altura aproximada de 7 m. Sección Tac0836.

En esta fase, se incluye el depósito de avalancha de escombros proveniente de la parte alta del volcán y un flujo de bloques y cenizas. Este último corresponde a la unidad 3.5 y se

puede observar en la parte baja del volcán, a 2 500 msnm con forma de abanico, con una longitud máxima de 3.47 km. Dicho flujo de bloques y cenizas, está compuesto por bloques de ~1m de diámetro, de color gris oscuro, con bordes angulosos a subredondeados, inmersos en una matriz de ceniza fina a media de color ocre, con un espesor aproximado de 5 m. El flujo de bloques y cenizas se encuentra sobreyaciendo al flujo de lava de la unidad 3.3 y subyaciendo al depósito de avalancha de escombros, denominada Avalancha Tuimanj (unidad 3.6). Esta avalancha tiene una dirección preferencial de N5°E, con longitud máxima de 3.21 km y formas de pequeños lomeríos irregulares. En la parte baja, se bifurca a 2 700 msnm y se observan pequeños bloques, separados del cuerpo principal de la avalancha, formando pequeñas islas. Estas comúnmente corresponden a montículos, estructuras típicas de este tipo de depósitos, además de estructuras en rompecabezas, con bordes muy angulares (Fig. 3.29).



Figura 3.29. Fotografía que muestra el depósito de avalancha de escombros del volcán Tacaná, denominado Avalancha Tuimanj (unidad 3.6). En esta fotografía se muestra un bloque con estructura en rompecabezas. Localidad de Tuimanj, Guatemala (Tac0903).

La unidad 3.8 pertenece a un flujo de lava, compuesto por grandes bloques que dan lugar a una topografía irregular (Fig. 3.30). Se localiza en la parte alta del volcán, es éste uno de los flujos de lava más cortos de la Etapa 3, que se emplazó desde la cima a 4 080, hasta 3 180 msnm, desplazándose una distancia de ~900 m en línea recta con una dirección N30°E, con una morfología irregular en forma de abanico. Desde la cima se observa perfectamente su forma delgada en la parte más alta, con desarrollo de un pequeño *levée* y conforme la pendiente disminuye, éste comienza a expandirse cambiando a una forma de abanico.

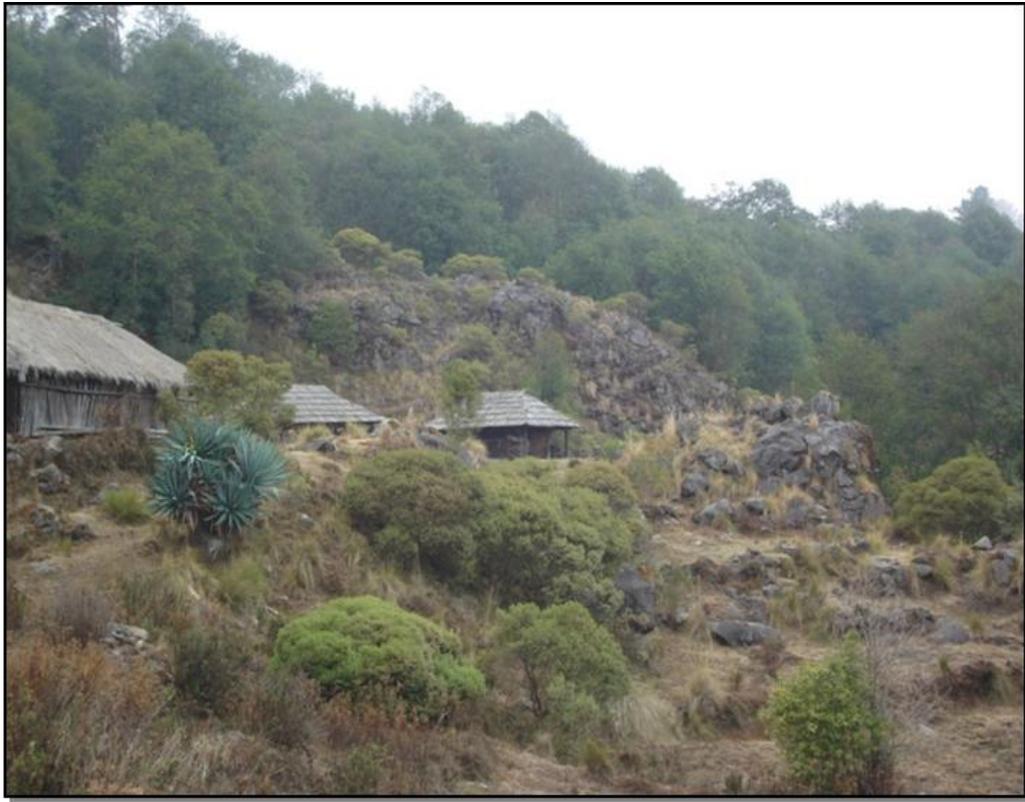


Figura 3.30. Fotografía que muestra el flujo de lava de la unidad 3.8, conformada por grandes bloques de lava, que se encuentran altamente alterados y fracturados.

La unidad 3.9 está conformada por un flujo de lava en bloques con bordes subangulares. Con base en las relaciones de campo y fotointerpretación, se determinó que esta unidad, se encuentra por encima de casi todas las unidades anteriores exceptuando a la unidad 3.10, (Fig. 3.27). La distribución de este flujo de lava es principalmente hacia el N23°E, con

una longitud máxima de 3 km, tomando como punto de origen la cima del volcán, hasta 2 600 msnm. Morfológicamente, este flujo se observa alargado y homogéneo en su amplitud (400 m), con *levées* y una morfología superficial irregular. Los bloques que la conforman, tienen diámetros de hasta 1 m, son de color gris oscuro, con escaso desarrollo de suelo, vegetación de matorral y con un espesor aproximado de 3 m (Fig. 3.31).



Figura 3.31. Fotografía de la sección Tac0838, en la cual se observa un *levée* lateral del flujo de lava de la unidad 3.9, donde se presenta una morfología de bloques subangulares con muy poca vegetación.



Figura 3.32. Fotografía donde se muestra parte de uno de los domos centrales del volcán Tacaná, ubicado a 4 070 msnm, donde se observa una estructura de grandes bloques (hasta 5 m) en el círculo rojo se encuentra una persona como escala de referencia.

La unidad 3.10 corresponde al domo central, uno de los tres domos del volcán Tacaná que se localiza en la cima del mismo. Este domo es de tipo *coulée* (forma intermedia entre domo y colada de lava, Gutiérrez, 2008), con un emplazamiento hacia el sur de la cima del Tacaná. Se llevaron a cabo dos puntos de muestreo, el Tac0809 y Tac0811, donde se observó que el domo tiene una estructura externa, conformada por grandes bloques de hasta 5 m de diámetro, de color gris (Fig. 3.32). Este domo es el más reciente de esta etapa eruptiva, ya que se observó un suelo incipiente y con escasa vegetación.

3.5. Parámetros morfométricos de los flujos de lava

Los parámetros morfométricos son de gran ayuda para conocer de manera rápida y simplificada, las características generales de las formas terrestres y en este caso de los flujos de lava, de las tres etapas eruptivas originadas por el volcán Tacaná. En la tabla 3.1 se incluyen diversos parámetros como: las distancias promedio de los flujos de lava y de las otras unidades (flujo de bloques y cenizas y avalancha de escombros), así como su orientación preferencial. También se muestra el espesor promedio de cada una de las unidades, el cual se obtuvo midiendo las curvas de nivel en los diversos perfiles trazados a lo largo de cada uno de las unidades cartografiadas con ayuda de los programas ILWIS 3.3 y Excel. Para cada flujo, se consideró la cima (como la parte más alta de la unidad) y los valles de ambos lados (como la parte más baja de cada perfil), para obtener el espesor promedio de cada uno (Fig. 3.33), con estos datos se logró estimar el espesor promedio de cada unidad, lo que sirvió para obtener el volumen de cada una de las unidades cartografiadas.

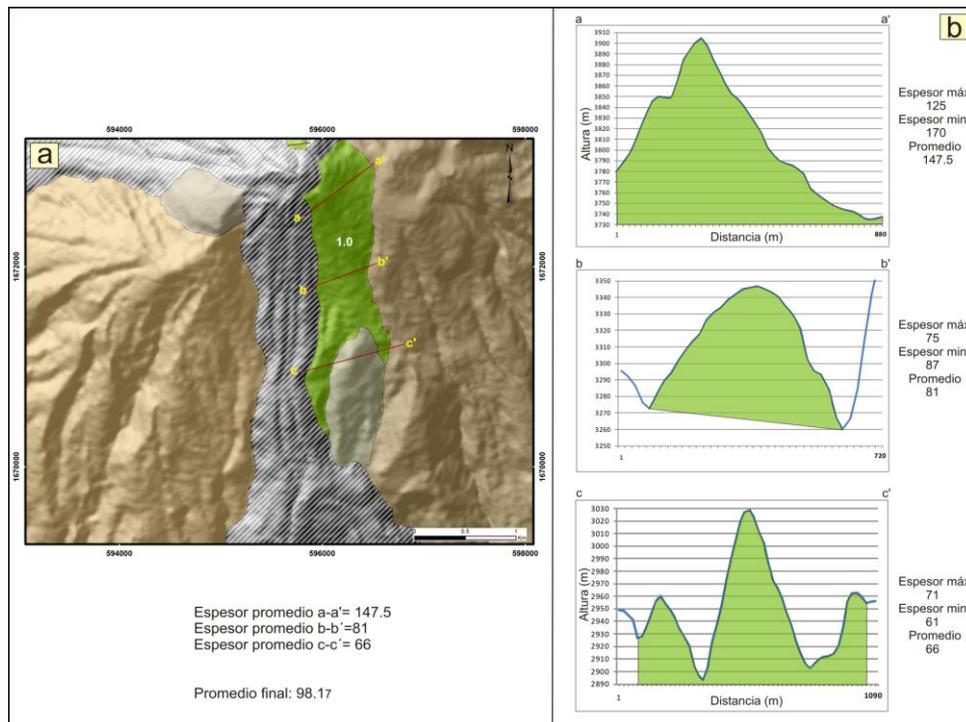


Figura 3.33. a) Mapa de distribución de algunas unidades de flujos de lava de la Etapa 1 y perfiles trazados en dirección perpendicular a la unidad 1.0. b) Perfiles a-a', b-b' y c-c' trazados en (a) que se utilizaron para obtener el espesor promedio del flujo de lava, considerando la diferencia de altura entre la cima y los valles. Escala vertical y horizontal 1:1.

Tabla 3.1.- Parámetros morfométricos de los flujos de lava y otros depósitos de las tres etapas descritas del volcán Tacaná. Los valores de sílice no están recalculados.

ETAPA	Unidad	Tipo de depósito	Dirección de emplazamiento	Longitud (km)	Área del depósito visible (km ²)	Espesor promedio (m)	Volumen (km ³)
Etapa 3	3.10	Domo de lava	N-S24°O	0.24-0.54	0.15	47.8	0.007
	3.9	Flujo de lava	N23°E	3.36	1.12	48.4	0.054
	3.8	Flujo de lava	N30°E	2.06	0.40	57.8	0.023
	3.7	Flujo de lava	N8°O	3.83	0.54	44.0	0.024
	3.6	Avalancha	N5°E	3.21	0.75	64.2	0.048
	3.5	FByC	N8°E	3.47	0.32	91.0	0.029
	3.4	Flujo de lava	N13°O	3.07	0.52	58.0	0.030
	3.3	Flujo de lava	N12°E	3.48	0.07	53.3	0.004
	3.2	Flujo de lava	N26°E	3.12	0.28	34.3	0.010
	3.1	Flujo de lava	N34°E	3.87	1.36	102.5	0.139
	3.0	Flujo de lava	N5°E	4.34	1.31	89.5	0.117
Etapa 2	2.8	Flujo de lava Ol	N58°O-N3°O	3.62-0.95	1.11	71.5	0.079
	2.7	Flujo de lava	N77°O	1.59	0.14	25.3	0.004
	2.6	Flujo de lava	N64°O	2.82	0.55	51.5	0.028
	2.5	Flujo de lava Hb	N55°O	2.03	0.35	37.8	0.013
	2.4	Flujo de lava	S10°O	4.39	2.31	100.1	0.231
	2.3	Flujo de lava	N7°O-N63°O	4.19-6.17	4.30	105.1	0.452
	2.2	FByC	N41°O	5.75	2.40	93.5	0.224
	2.1	Avalancha	N59°O	8.15	2.49	132.8	0.331
Etapa 1	1.7	Flujo de lava	N4°O-N42°O	1.92-0.66	0.11	19.8	0.002
	1.6	Flujo de lava	N26°O	2.76	0.57	84.0	0.048
	1.5	Flujo de lava	N52°O	3.68	1.16	102.0	0.118
	1.4	Flujo de lava	N18°O	3.05	0.76	45.6	0.035
	1.3	Flujo de lava	N20°O	2.72	0.58	58.4	0.034
	1.2	Material retrabajo	N36°O	3.03	0.51	67.5	0.034
	1.1	Flujo de lava	N32°O	4.24	1.53	131.5	0.201
	1.0	Flujo de lava	S19°E	2.52	1.26	98.2	0.124
Chichuj	Chichuj	Flujo de lava	S2°E	3.53	N/C	279.3	N/C

Abreviaturas: Flujo de bloques y cenizas (FBC), Hornblenda (Hb), Olivino (Ol), N/C: No calculado, N/M: No muestreado.

Como se puede observar en la tabla 3.1, de las 27 unidades cartografiadas, 21 corresponden a flujos de lava y un domo de lava tipo *coulée*. La gran mayoría de los flujos de lava tienen una dirección de emplazamiento hacia el norte para las etapas 1 y 2 exceptuando dos flujos de lava, que se emplazaron hacia la ladera S (unidades 1.0 y 2.4). Para la Etapa 3 la mayoría de los flujos fueron emplazados hacia el NE y sólo dos flujos (unidad 3.4 y 3.7) están en otra dirección y el domo de lava tipo *coulée*, está orientado hacia el sur.

La longitud de los flujos de lava es muy variable. El flujo de lava de mayor longitud es la unidad 1.1 (Etapa 1), que se desplazó 4.24 km pendiente abajo, cubriendo un área de 1.53 km², con un espesor promedio de 131 m y un volumen de 0.20 km³. Mientras que la unidad 1.7 es la de menor longitud, alcanzando ~1.3 km de distancia a partir de la cima, cubrió un área de 0.11 km², con un espesor promedio de 19.8 m y un volumen de 0.002 km³. De igual manera en la Etapa 2, la unidad 2.3, recorrió una distancia máxima de 6.17 km, cubrió un área de 4.3 km² con un espesor promedio de 105 m y con un volumen de 0.45 km³. El flujo de menor longitud de esta etapa, corresponde a la unidad 2.7, con una distancia de 1.59 km, área de 0.14 km², espesor promedio de 25 m y un volumen de 0.004 km³. Para la Etapa 3, el flujo de mayor longitud corresponde a la unidad 3.0, la cual alcanzó una distancia de 4.34 km, cubriendo un área de 1.31 km², con un espesor promedio de 89.5 m y un volumen estimado de 0.11 km³. Por último, el flujo de menor distancia corresponde a la unidad 3.8, que recorrió 2.06 km con un área de 0.40 km², un espesor promedio de 57.8 m y un volumen de 0.023 km³.

Con los datos obtenidos en la tabla 3.1, se realizaron diversas gráficas utilizando los distintos parámetros morfométricos, con el fin de establecer una posible relación entre estos, con el comportamiento físico de las lavas y comparar los resultados, con cada una de las etapas eruptivas (Fig. 3.34).

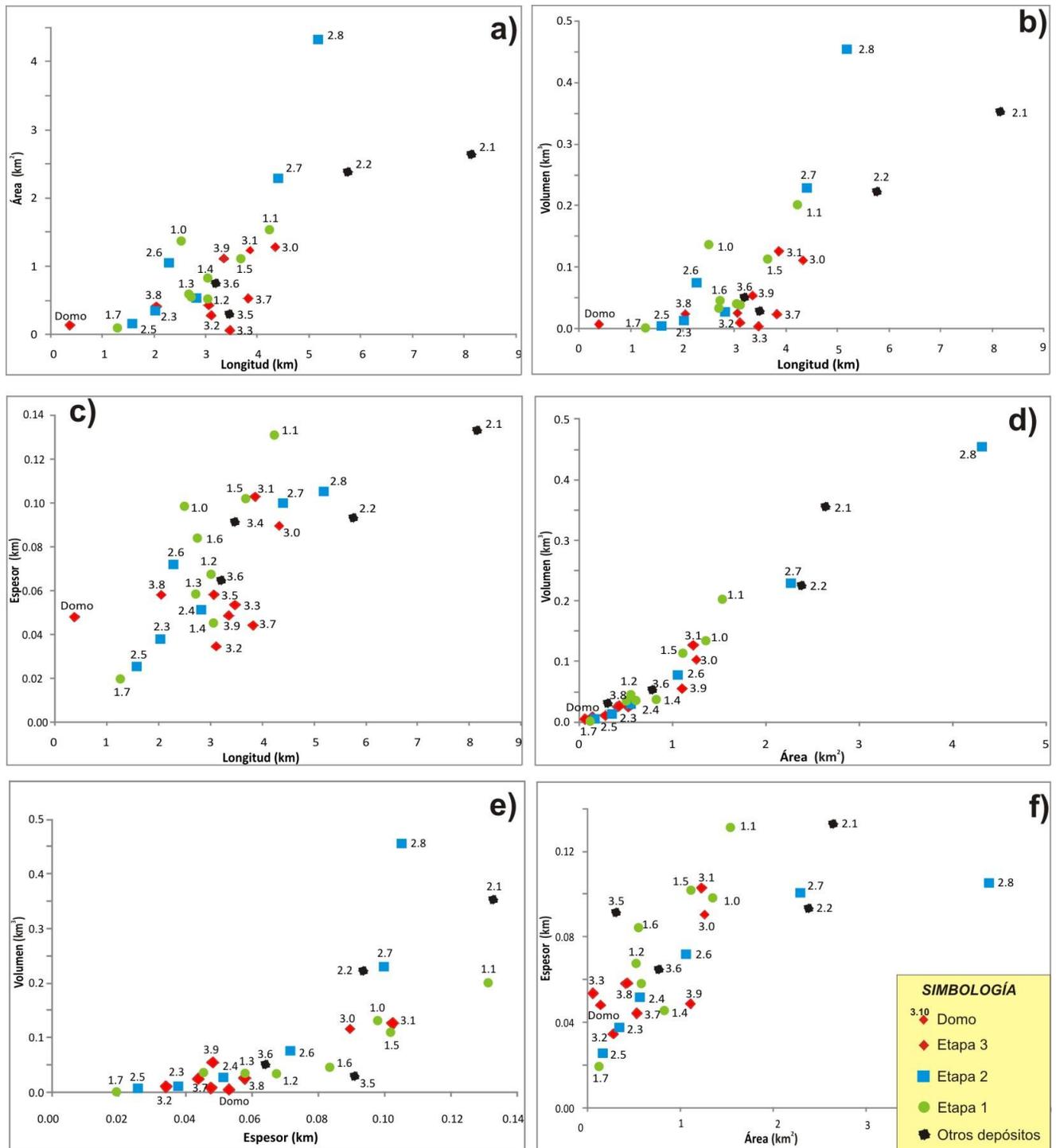


Figura 3.34. Se muestran diversos parámetros graficados, donde se observa el comportamiento de los flujos de lava de las tres etapas eruptivas del volcán Tacaná., a) área (km²) vs longitud (km), b) volumen (km³) vs longitud (km), c) espesor (km) vs longitud (km), d) volumen (km³) vs área (km²), e) volumen (km³) vs espesor (km) y f) espesor (km) vs área (km²).

En la figura 3.34 a, se puede observar una tendencia ascendente entre el área vs longitud, lo que sugiere una relación directa del área cubierta, con respecto a la longitud del flujo de lava. De igual forma, se perciben relaciones directas tal y como es esperado, se comparó el volumen contra la longitud, notándose que a mayor volumen, se obtiene mayor distancia (Fig. 3.34 b). Los resultados de espesor vs longitud, muestran que entre mayor es el espesor, mayor es la distancia recorrida del flujo (Fig. 3.34 c). Existe una relación directa entre estos dos parámetros, a excepción de la unidad 3.10, ya que corresponde al domo de lava tipo *coulée*, localizado en la cima del Tacaná, que sólo recorrió una distancia de ~300 m. Para el caso de volumen contra área, se observa que a mayor volumen, corresponde mayor área (Fig. 3.34 d) y en el volumen contra espesor, se sugiere una relación directa entre mayor es el espesor, mayor es el volumen, como se muestra en la figura 3.34 e.

En el caso de los parámetros de espesor contra área, se puede observar en las gráficas de las etapas 1 y 2 una curva ascendente, donde se muestra que los flujos de mayor espesor cubrieron áreas mayores. Si se trata de los flujos de lava de la Etapa 3, se aprecia una aglomeración de puntos, con valores bajos tanto en espesor, como en área, sólo repuntando la unidad 3.1. Esta tiene un espesor mayor, pero menor área en comparación con el resto de los flujos de lava de las otras etapas (Fig. 3.34 f).

Capítulo 4. Petrografía y Geoquímica

En el presente capítulo se describen las características petrográficas de las 28 secciones delgadas y químicas de los 31 análisis de roca total de las muestras colectadas en campo.

4.1. Petrografía

En el presente trabajo, se presenta un análisis petrográfico, sólo de la actividad efusiva de las tres etapas eruptivas identificadas en el volcán Tacaná, donde se tomó en cuenta textura, grado de cristalinidad y tipo de matriz, así como las fases mineralógicas presentes en cada una de las muestras procedentes del volcán Tacaná.

Las secciones delgadas observadas en el microscopio petrográfico, no exhiben variaciones importantes en su composición mineralógica, a excepción de las unidades de lava 2.8 y 3.10.

Las muestras de los flujos de lava del volcán Tacaná son hipocristalinas con textura porfirítica seriada, inequigranular (Fig. 4.1 a y b) y la mayoría también presenta textura glomeroporfirítica (Fig. 4.1 c y d), así como matriz con textura traquítica (Fig. 4.1 a y b). Las fases mineralógicas presentes en estas lavas son fenocristales (>0.3 mm) y microfenocristales (0.3 mm - 0.03 mm) (Wilcox, 1954), de plagioclasa (Plg) > anfíbol (Anf) > piroxenos (Pxn) > óxidos de Fe-Ti (Ox) y sólo en pocas muestras se encuentra presente el olivino (Ol). Las mismas fases se observan en la mayoría de las láminas también como microlitos (< 0.03mm), que junto con el vidrio conforman la matriz de las muestras.

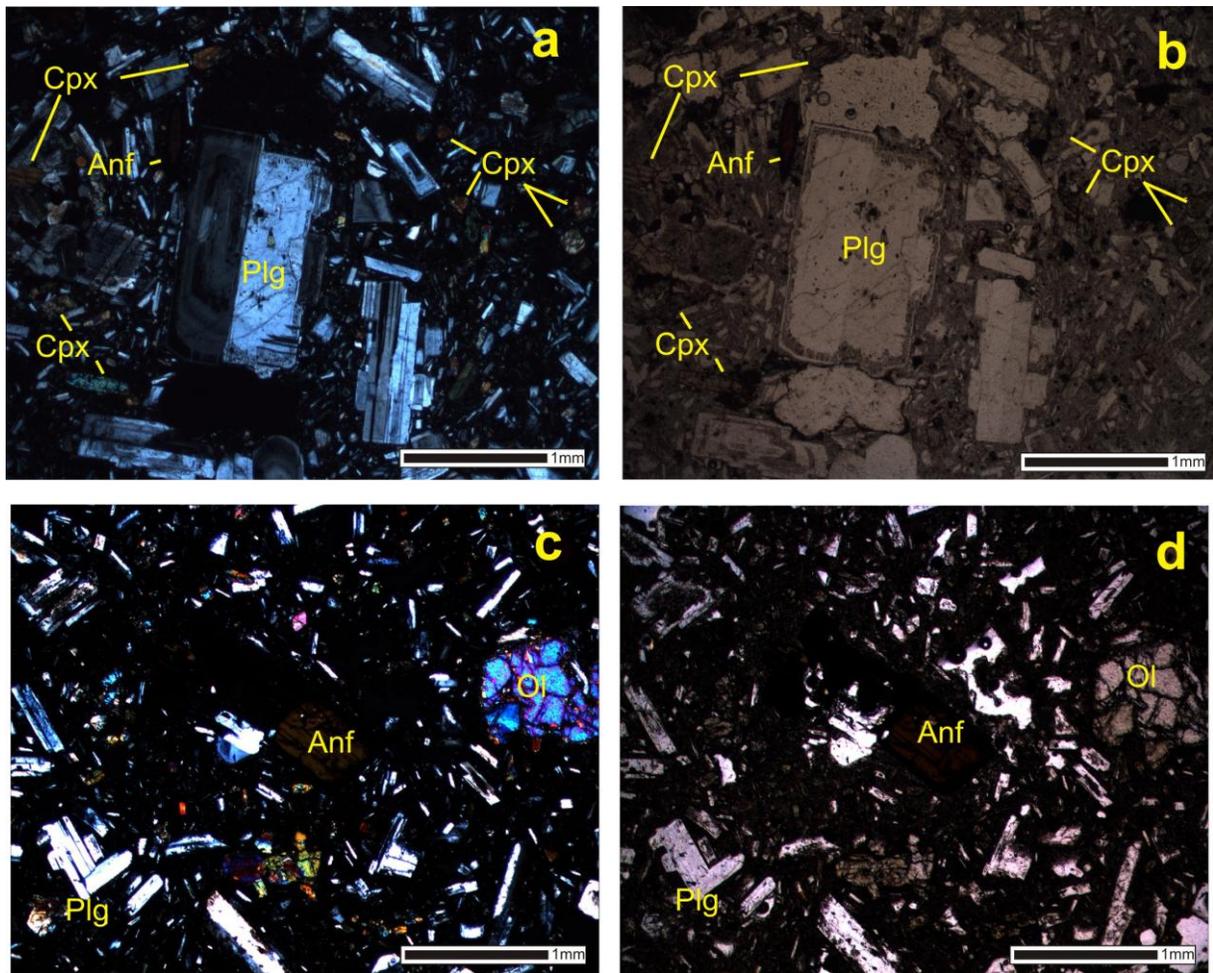


Figura 4.1. Microfotografías de los flujos de lava del volcán Tacaná, tomadas con el objetivo 2.5X, a y b) Muestra Tac0915b unidad 1.4, andesita hipocristalina con textura porfírica seriada y matriz traquítica conformada principalmente por microlitos de plagioclasa (Plg) y anfíbol (Anf) y fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno (Cpx) y anfíbol. c y d) Muestra Tac0809, unidad 3.10, andesita con textura glomeroporfírica, compuesta por fenocristales de plagioclasa, anfíbol y ortopiroxeno (Opx). (a y c) nícoles cruzados y (b y d) nícoles paralelos

La textura vesicular se encuentra en algunas muestras de las etapas 1 y 3 (Fig. 4.2 a y b). Los fenocristales aparecen fracturados y con rasgos de inestabilidad (Fig. 4.2 c y d), ya que se observan texturas de tamiz (bordes e interiores) golfos y coronas de reacción. Es común observar aglomeraciones de algunos microfenocristales con otros, como: plagioclasa-clinopiroxeno, plagioclasa-anfíbol, plagioclasa-óxido, anfíbol-olivino. A continuación se presenta la descripción de cada una de las fases.

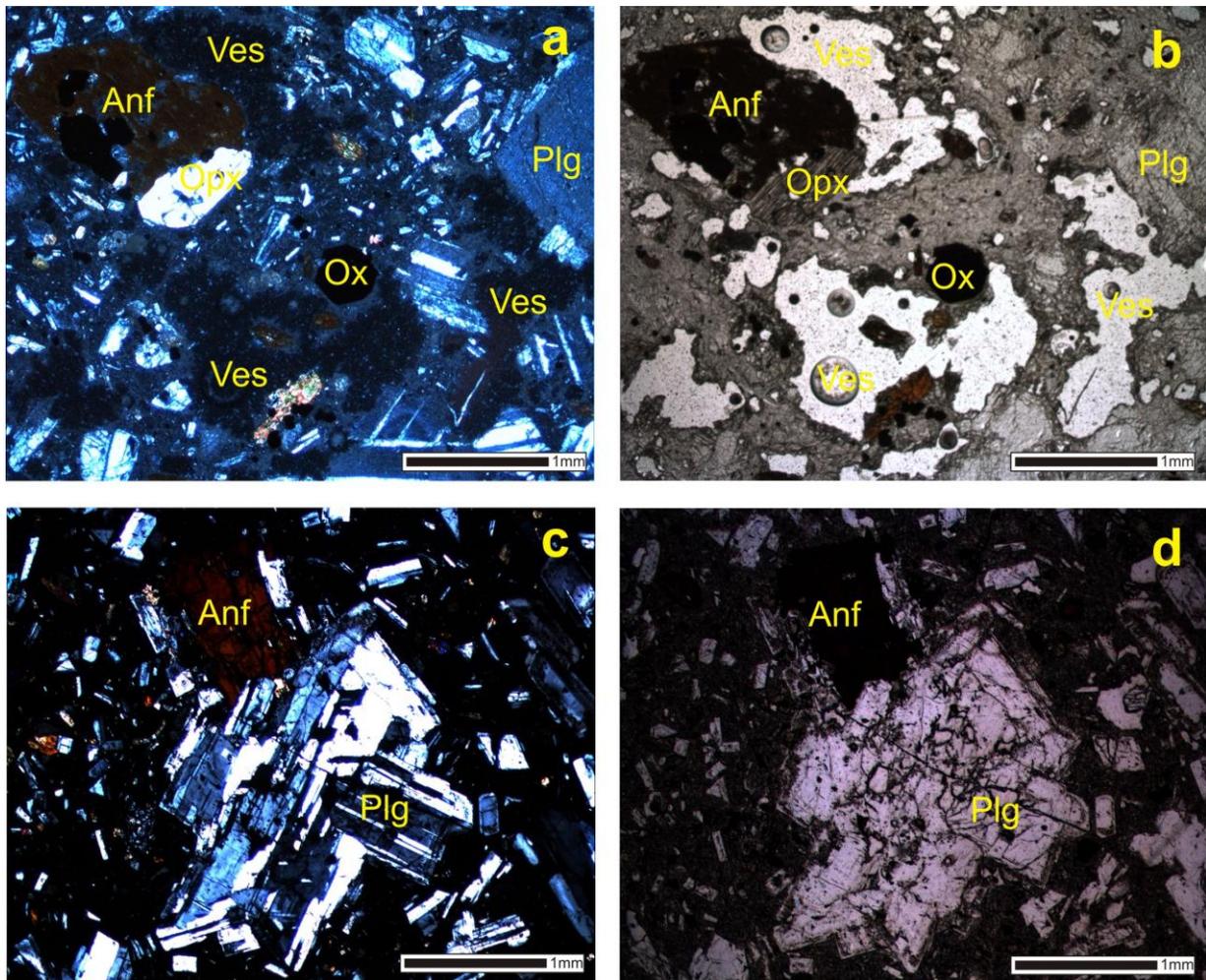


Figura 4.2. Microfotografía de muestras de flujos de lava del Tacaná, a y b) Muestra Tac0911 de la unidad 1.5, donde se observan vesículas de forma irregular; c y d) Muestra Taco827 (unidad 2.5) presenta rasgos de inestabilidad de los fenocristales que se encuentran con golfos. (a y c) nicoles cruzados y (b y d) nicoles paralelos. Abreviaturas: Plagioclasa (Plg), anfíbol (Anf), óxido de Fe-Ti (Ox), vesículas (ves).

Plagioclasa

La plagioclasa es el mineral más abundante presente en las rocas del Tacaná. En un porcentaje de 60 a 80%, se presentan desde fenocristales hasta microlitos con hábito subhedral a euhedral, con maclado polisintético, carlsbad y zoneamiento (Fig. 4.3). Algunas plagioclasas presentan un maclado complejo (4.3 b y e); en un mismo mineral se observan maclado polisintético y zoneamiento. También se advierten glomero-cristales de plagioclasa.

Determinados cristales presentan texturas de inestabilidad (4.3 d-e), como textura de tamiz, textura esquelética y bordes de reacción (reabsorbidos). La matriz está conformada en gran parte por microlitos de este mineral (Fig. 4.3 b y c).

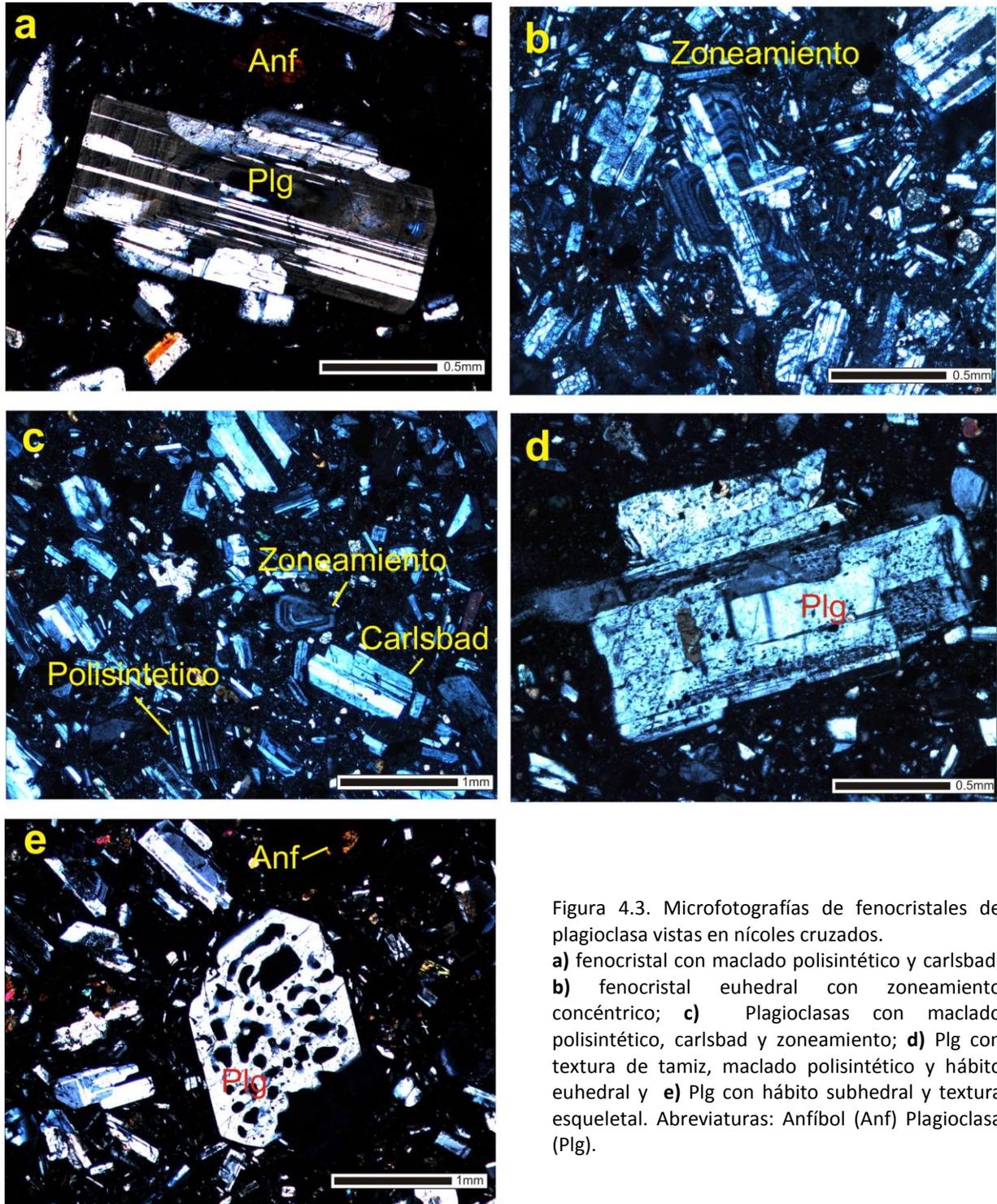


Figura 4.3. Microfotografías de fenocristales de plagioclasa vistas en nicoles cruzados. **a)** fenocristal con maclado polisintético y carlsbad; **b)** fenocristal euhedral con zoneamiento concéntrico; **c)** Plagioclasas con maclado polisintético, carlsbad y zoneamiento; **d)** Plg con textura de tamiz, maclado polisintético y hábito euhedral y **e)** Plg con hábito subhedral y textura esquelética. Abreviaturas: Anfíbol (Anf) Plagioclasa (Plg).

Anfíbol

El anfíbol es el segundo mineral en abundancia en las lavas del Tacaná (5-30%). Se encuentra tanto como fenocristal, como microlito. Los fenocristales presentan hábito subhedral a anhedral (Fig. 4.4), algunos con coronas de reacción (Fig. 4.4 a), compuestos de minerales neoformados o de óxidos (opacita) (Fig. 4.4 b). También se observaron fenocristales de anfíbol fibrosos con hábito euhedral a subhedral (Fig. 4.4 c).

En el caso de la muestra Tac0809 de la unidad 3.10 que corresponde al domo de composición andesítica del Tacaná, se encontraron aglomeraciones de anfíboles con olivino y conglomerados de anfíbol con ortopiroxeno y óxidos de Fe-Ti, con textura equigranular, que posiblemente corresponden a un xenolito.

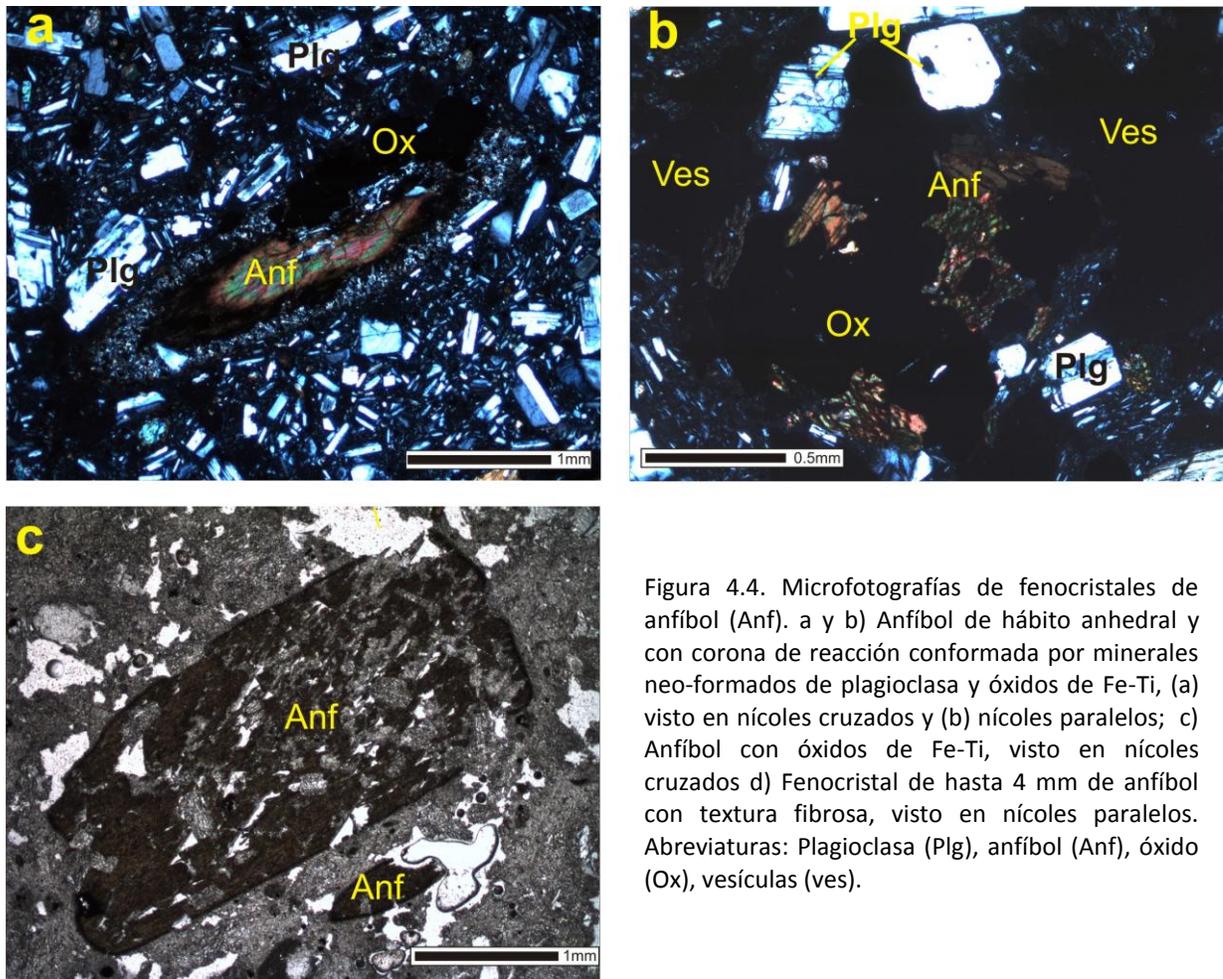


Figura 4.4. Microfotografías de fenocristales de anfíbol (Anf). a y b) Anfíbol de hábito anhedral y con corona de reacción conformada por minerales neo-formados de plagioclasa y óxidos de Fe-Ti, (a) visto en nícoles cruzados y (b) nícoles paralelos; c) Anfíbol con óxidos de Fe-Ti, visto en nícoles cruzados d) Fenocristal de hasta 4 mm de anfíbol con textura fibrosa, visto en nícoles paralelos. Abreviaturas: Plagioclasa (Plg), anfíbol (Anf), óxido (Ox), vesículas (ves).

Piroxenos

La tercera fase mineralógica de mayor abundancia (10-22%) es la de los piroxenos, que a su vez se dividen en ortopiroxenos y clinopiroxenos. Se encuentran en las muestras como fenocristales y en menor cantidad como microlitos (Fig. 4.5).

Los ortopiroxenos presentan hábito subhedral a euhedral, sólo en algunos se observan anhedrales (Tac0844a), algunos otros muestran coronas de reacción y los microlitos forman parte de la matriz (Fig. 4.5).

El clinopiroxeno se encuentra en menor proporción que el ortopiroxeno, aunque en ocasiones los cristales son de mayor tamaño que este último, presentando un hábito subhedral a euhedral. Se observan tanto fenocristales como microlitos. Algunos clinopiroxenos muestran rasgos de fracturamiento, bordes de reabsorción e inclusiones de óxidos de Fe-Ti (Fig. 4.5).

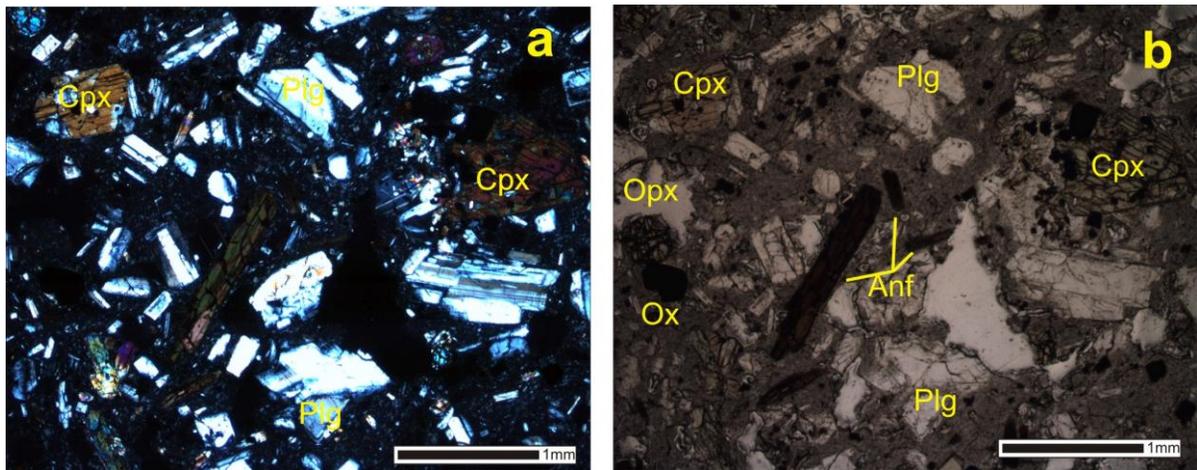


Figura 4.5 Microfotografías que muestran las características de los piroxenos presentes en las muestras del volcán Tacaná. a y b) Se observa un anfíbol en el centro y minerales de clinopiroxeno en las orillas; (a) nícoles cruzados y (b) nícoles paralelos. Abreviaturas: Plagioclasa (Plg), anfíbol (Anf), Ortopiroxenos (Opx), clinopiroxeno (cpx) óxidos de Fe-Ti (Ox).

Continuación.....

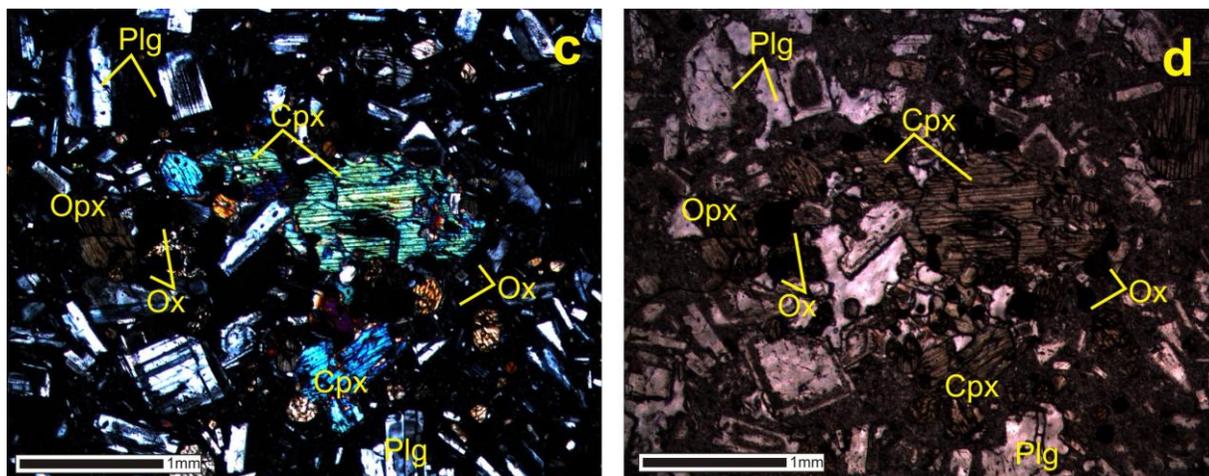


Figura 4.5 Piroxenos presentes en las muestras del volcán Tacaná. c y d) Se observa un glomeropórfido compuesto por clinopiroxeno, plagioclasas y óxidos; (c) nicoles cruzados y (d) nicoles paralelos. Abreviaturas: Plagioclasa (Plg), anfíbol (Anf), Ortopiroxenos (Opx), clinopiroxeno (cpx) óxidos de Fe-Ti (Ox).

Olivino

El olivino se encuentra sólo en algunas de las muestras (Tac0826 y Tac0829E); la última corresponde a un enclave máfico. Los fenocristales individuales de olivino, se observan con hábito subhedral a euhedral, comúnmente con rasgos de desequilibrio, como bordes de corrosión y coronas de reacción rodeadas de clinopiroxeno. En algunas muestras (Tac0849, Tac0809, Tac0811) se encontraron aglomerados con otros minerales (anfíbol, plagioclasa y óxido) (Fig. 4.6).

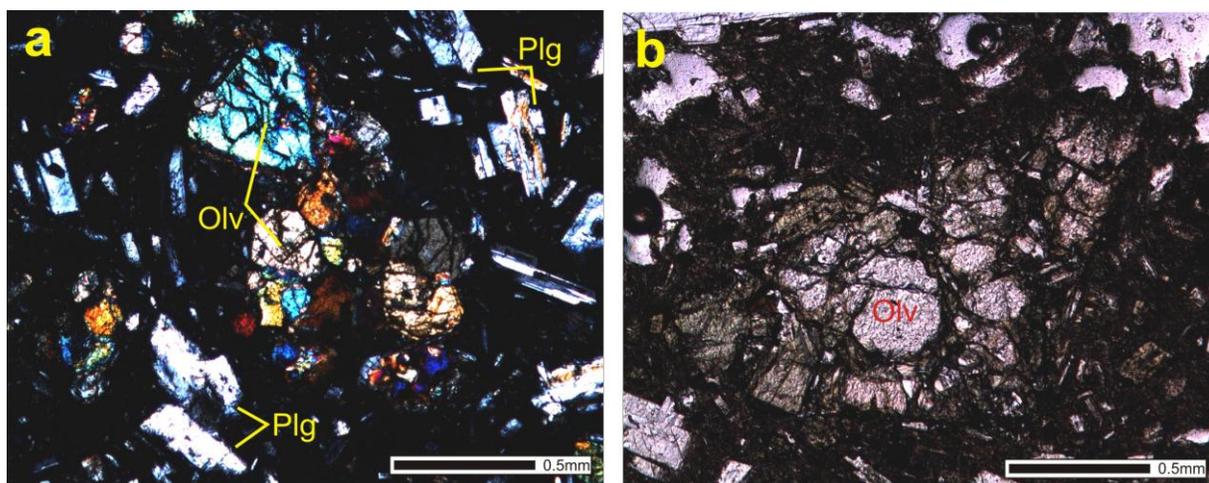


Fig. 4.6. Microfotografía de glomerocristales de olivino. a) Se observa una aglomeración de olivino; (a) nicoles cruzados y (b) fenocristal de olivino visto con nicoles paralelos. Abreviaturas: Plagioclasa (Plg), olivino (Ol).

Óxidos de Fe-Ti

Los óxidos de Fe-Ti representan la fase mineral menos abundante de las muestras, fluctuando de 4 a 8%. El hábito de los óxidos varía de euhedral a anhedral; se presentan generalmente en forma individual y dispersos en la matriz (Fig. 4.7 c y d) o en ocasiones como aglomeraciones (Fig. 4.7 a y b). Se observan también inclusiones de óxidos en los diversos cristales de anfíbol, clinopiroxeno y ortopiroxeno. En ocasiones alguno de los minerales ha desaparecido y sólo se mantiene presente la corona de óxidos de Fe-Ti. La mayoría de los óxidos presentan rasgos de disolución.

Vidrio

El vidrio es de color café pardo y forma la pasta que junto con los microlitos de plagioclasa conforman la matriz.

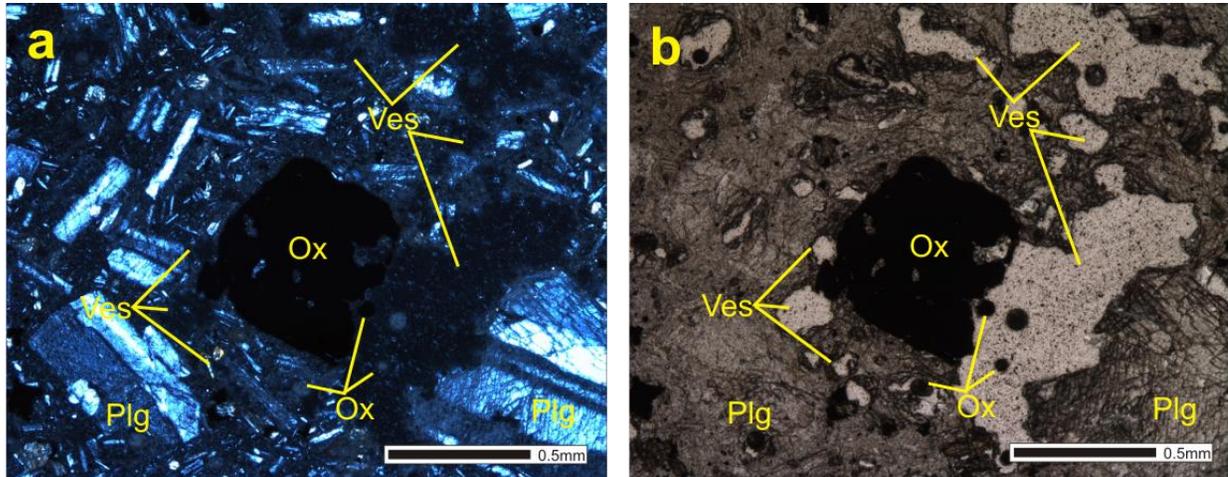


Fig. 4.7. Microfotografías de la muestra Tac0910b (unidad 1.6) donde se observan cristales de óxidos de Fe y Ti. con habito euhedral y algunos óxidos anhedrales; (a) nícoles cruzados y (b) nícoles paralelos. Abreviaturas: Plagioclasa (Plg), óxido de Fe-Ti (Ox), vesículas (ves).

4.2. Geoquímica

Para caracterizar químicamente a las lavas del volcán Tacaná, se realizaron análisis químicos de elementos mayores y algunos elementos traza en roca total, mediante el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX) (Wilson, 1989, Lozano *et al.*, 1995). En total se analizaron 31 muestras (Tabla 4.1), nueve de éstas corresponden a flujos de lava de la Etapa 1, seis muestras de la Etapa 2 y 15 de la Etapa 3. En la Etapa 3, una de las muestras analizadas corresponde a un flujo de bloques y cenizas; otra a una avalancha de escombros y dos más al domo central del volcán Tacaná (Fig. 3.3). Para efectuar estos análisis se tomaron muestras frescas, representativas de las tres etapas eruptivas.

Para la clasificación química de las muestras, se utilizó la gráfica de álcalis totales versus sílice (TAS) de Le Bas *et al.* (1989), utilizando los datos recalculados al 100% en base anhidra (Fig. 4.8).

En general, la mayoría de las muestras se encuentran en el campo de la andesita (57.87 a 62.43% de sílice en peso), algunas otras en el campo de la dacita poco evolucionada (63.3% en peso de SiO₂), muy cerca del límite andesítico y solamente una aparece en el área de andesitas basálticas (54.55% en peso de SiO₂), que corresponde al enclave máfico, encontrado dentro de la lava 2.4 de la Etapa 2. Considerando todas las muestras se observa una gran variación química; por ejemplo el contenido en SiO₂ varía de 57 a 62% en peso (Fig. 4.8), sin embargo, no se aprecia una diferencia química entre las distintas etapas.

Tabla 4.1 . Resultados de los análisis químicos de roca total, de las lavas del volcán Tacaná. Los elementos mayores están en % en peso y los traza en partes por millón (ppm). Los análisis fueron realizados en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica de la UNAM, por medio del método de Fluorescencia de Rayos X.

Unidad	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava (enclave)	Lava	Lava	Lava	Lava
Etapa	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.8
Muestra	Tac0805	Tac0922	Tac0909	Tac0915b	Tac0911	Tac0913	Tac0910b	Tac0808	Tac0829E	Tac0829L	Tac0829a	Tac0827	Tac0823
Latitud	596646	594709	595362	595443	594727	594802	595191	595448	595476	595476	595476	595490	595089
Longitud	1671333	1676110	1674398	1674704	1674077	1674525	1674282	1672617	1672615	1672615	1672615	1673198	1672938
Altitud	3008	2365	3193	2998	3238	3100	3261	3847	3856	3856	3856	3906	3738
Mayores													
SiO ₂	59.43	59.18	59.69	59.09	60.27	60.07	59.96	59.51	53.69	61.13	62.27	58.70	57.28
TiO ₂	0.68	0.71	0.68	0.70	0.64	0.65	0.67	0.66	0.95	0.57	0.59	0.61	0.80
Al ₂ O ₃	17.72	17.35	17.47	17.18	17.11	17.20	17.31	18.03	18.56	16.83	16.83	16.67	17.74
FeO	6.77	6.65	6.68	6.90	6.48	6.40	6.54	6.54	8.53	5.73	5.60	6.15	7.25
MnO	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.10	0.10	0.11	0.11
MgO	2.96	3.09	2.68	2.99	2.36	2.47	2.37	2.67	4.06	2.42	2.21	2.52	3.88
CaO	6.36	6.14	6.25	6.45	5.98	6.07	6.19	6.23	8.36	5.62	5.40	5.70	7.21
Na ₂ O	3.51	3.67	3.71	3.68	3.78	3.61	3.76	3.64	3.58	3.71	3.80	3.62	3.59
K ₂ O	1.99	2.07	2.07	1.98	2.23	2.22	2.08	2.08	1.23	2.23	2.32	2.13	1.68
P ₂ O ₅	0.15	0.16	0.16	0.18	0.17	0.19	0.17	0.19	0.20	0.15	0.16	0.16	0.17
PXC	0.29	0.20	0.22	0.23	0.27	0.42	0.15	0.23	0.21	1.38	0.35	3.23	0.08
Suma	99.97	99.32	99.72	99.51	99.39	99.41	99.30	99.90	99.49	99.87	99.63	99.60	99.78
trazas													
Rb	51	61	70	61	81	66	83	54	27	61	64	60	41
Sr	524	563	574	565	524	593	606	579	616	502	510	515	523
Ba	689	752	770	735	724	715	722	681	506	738	756	700	577
Y	17	26	30	25	32	28	38	18	15	16	17	17	16
Zr	157	152	158	153	159	153	160	163	122	162	163	163	140
Nb	4	9	15	10	14	11	22	5	3	5	5	4	4
V	127	140	111	137	97	106	93	93	191	102	83	105	141
Cr	113	54	5	16	5	14	5	116	116	141	111	113	183
Co	12	46	52	47	52	49	75	13	21	12	11	13	17
Ni	7	16	11	14	11	13	12	8	11	9	6	8	16
Cu	9	25	17	23	23	25	28	11	13	11	13	11	31
Zn	68	91	89	90	95	98	113	67	73	67	62	65	73
Th	2	<3	4	<3	<3	<3	<3	4	3	4	4	4	3
Pb	11	11	13	11	10	12	12	12	7	13	13	15	10

Continuación....

Unidad	Lava	Lava	Lava	Lava	FByC	Avalancha	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Domo	Domo
Etapa	3.0	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.8	3.9	3.10	3.10
Muestra	Tac0927	Tac0839	Tac0849	Tac0917	Tac0846	Tac0903	Tac0836	Tac0844a	Tac0844b	Tac0920	Tac0906	Tac0838	Tac0809	Tac0811
Latitud	595590	596923	596531	595949	595487	596369	595824	595751	595751	595220	596595	596882	595740	595775
Longitud	1676953	1675207	1676128	1675612	1675385	1675222	1675186	1675737	1675737	1676708	1674704	1675214	1672748	1672904
Altitud mayores	2459	2974	2642	2786	2811	2983	2929	2785	2785	2433	3153	2970	3989	4071
SiO ₂	58.65	60.56	59.17	59.04	58.89	59.99	60.15	58.92	59.05	59.44	59.75	59.77	60.77	62.61
TiO ₂	0.75	0.64	0.75	0.75	0.75	0.68	0.65	0.71	0.74	0.73	0.67	0.66	0.64	0.56
Al ₂ O ₃	17.25	17.47	18.04	17.39	17.93	17.31	17.62	17.83	17.87	17.28	17.18	17.44	17.38	16.69
Fe ₂ O _{3t}	6.88	6.10	6.76	6.93	6.74	6.46	6.54	6.81	6.84	6.69	6.63	6.78	6.23	5.57
MnO	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10
MgO	3.19	2.64	3.15	3.23	3.14	2.78	2.54	3.23	3.28	3.10	2.58	2.64	2.63	2.30
CaO	6.24	5.63	6.56	6.29	6.38	5.96	5.90	6.47	6.46	6.30	6.27	6.27	5.96	5.41
Na ₂ O	3.52	3.60	3.41	3.65	3.38	3.58	3.57	3.65	3.61	3.64	3.59	3.62	3.69	3.69
K ₂ O	2.03	2.11	1.98	1.99	1.90	2.14	2.07	1.91	1.93	2.07	2.15	2.04	2.15	2.38
P ₂ O ₅	0.11	0.15	0.17	0.08	0.16	0.14	0.10	0.18	0.17	0.16	0.19	0.20	0.17	0.16
PXC	0.54	0.81	0.11	0.44	0.54	0.25	0.52	0.11	0.14	0.26	0.21	0.10	0.23	0.24
Suma	99.28	99.81	100.21	99.90	99.92	99.39	99.77	99.91	100.21	99.75	99.33	99.62	99.96	99.71
trazas														
Rb	61	51	48	63	47	61	54	47	48	60	69	52	60	67
Sr	563	521	534	547	545	518	521	540	546	558	630	575	511	498
Ba	752	774	703	726	665	773	717	694	695	745	722	678	712	755
Y	26	17	16	26	16	23	18	13	17	24	27	16	18	18
Zr	152	168	152	157	152	152	166	152	152	152	162	163	159	162
Nb	9	5	4	10	4	48	5	4	4	8	27	5	4	5
V	140	89	122	117	122	115	105	128	126	117	98	94	109	78
Cr	54	113	84	12	103	9	111	135	137	22	21	116	114	125
Co	46	13	15	43	15	34	14	16	20	36	42	11	15	14
Ni	16	8	8	12	10	10	7	11	11	13	10	6	8	9
Cu	25	13	16	20	15	11	9	12	14	34	21	10	14	13
Zn	91	67	66	87	68	71	70	68	70	78	86	65	65	69
Th	<3	3	3	4	3	4	3	3	3	<3	4	3	3	3
Pb	11	11	11	12	13	14	13	12	9	10	14	11	9	13

Abreviaturas: Flujo de bloques y cenizas (FByC), PCX = Pérdida por calcinación. El hierro total está representado como Fe₂O₃. Elementos mayores están en % y los elementos traza en partes por millón (ppm).

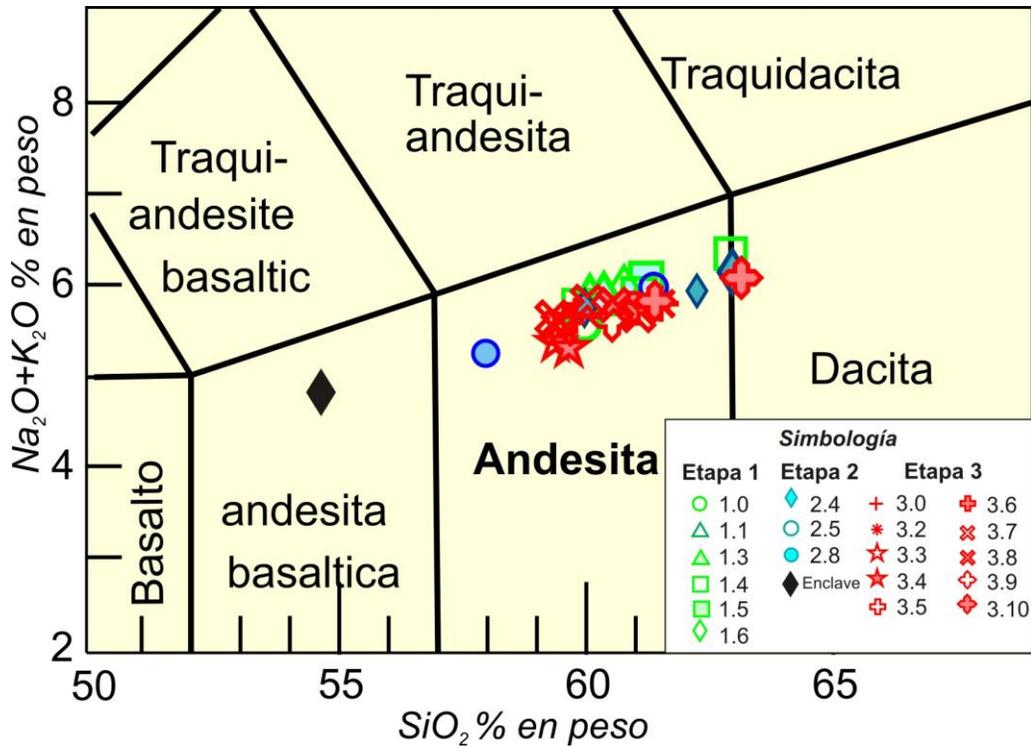


Figura 4.8. Diagrama de clasificación química para rocas volcánicas TAS, álcalis total (K_2O+Na_2O) vs sílice (Le Bas *et al.*, 1989). Se utilizaron los datos normalizados en base anhidra. Se muestran los datos graficados de las tres etapas eruptivas del volcán Tacaná.

Debido a la poca variación química de las muestras, se elaboraron diagramas de clasificación para cada una de las etapas eruptivas descritas anteriormente. En la figura 4.9 (a, b, c) se aprecia de manera particular que las muestras de flujos de lava pertenecientes a la Etapa 1, están en el área de las andesitas, con una variación de sílice del 1.27% en peso (59.94-61.21% en peso), a excepción de la lava 1.4, que tiene 63% en peso de SiO_2 . Las muestras de la Etapa 2, que corresponden a 3 unidades de flujo de lava, muestran una mayor variación, de 57.87 a 63.08% en peso en sílice, andesitas basálticas (enclave Tac0829), hasta dacitas poco evolucionadas. Finalmente, las rocas de la Etapa 3 se ubican en el campo de las andesitas con concentraciones de sílice entre 59.42 y 61.56% en peso. Solamente una muestra se encuentra entre las dacitas (Tac0811; 63.3% en peso de SiO_2), siendo muy similar a las muestras de la Etapa 1.

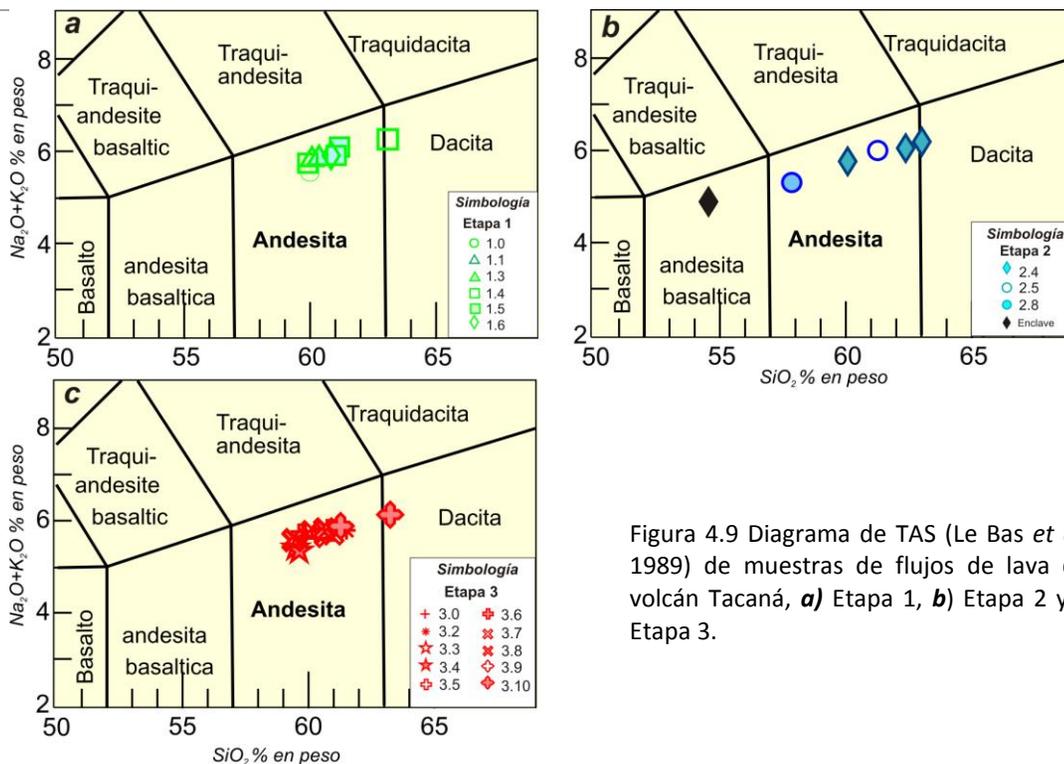


Figura 4.9 Diagrama de TAS (Le Bas *et al.*, 1989) de muestras de flujos de lava del volcán Tacaná, *a)* Etapa 1, *b)* Etapa 2 y *c)* Etapa 3.

Sin ninguna excepción, todos los datos caen en el campo sub-alkalino de acuerdo a Irvine y Baragar (1971) (Fig. 4.10a) y específicamente, con una afinidad calcialcalina (Fig. 4.10b) de acuerdo a la gráfica triangular AFM de Irvine y Baragar (1971) (Fig. 4.10). En general los álcalis ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) varían de 4.7 a 6.4% en peso para todas las muestras (Fig. 4.8).

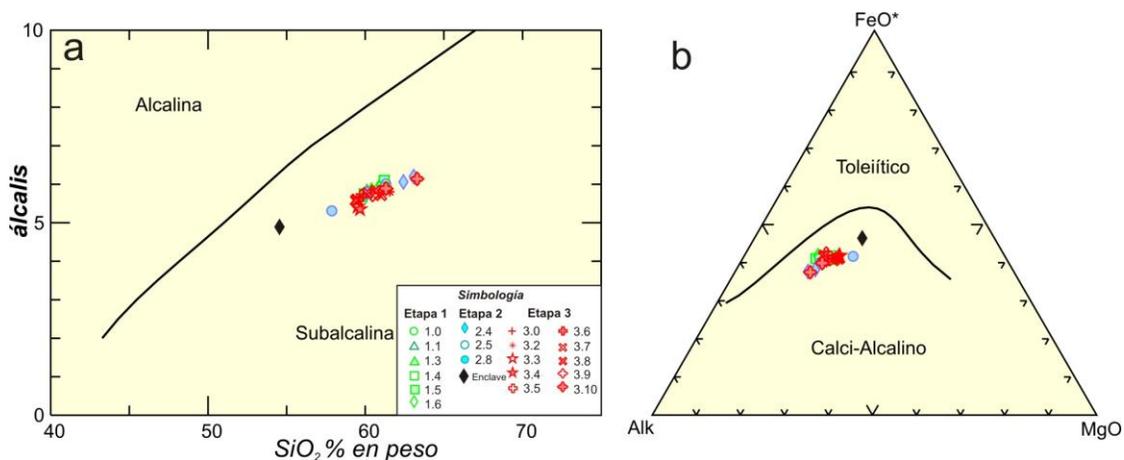
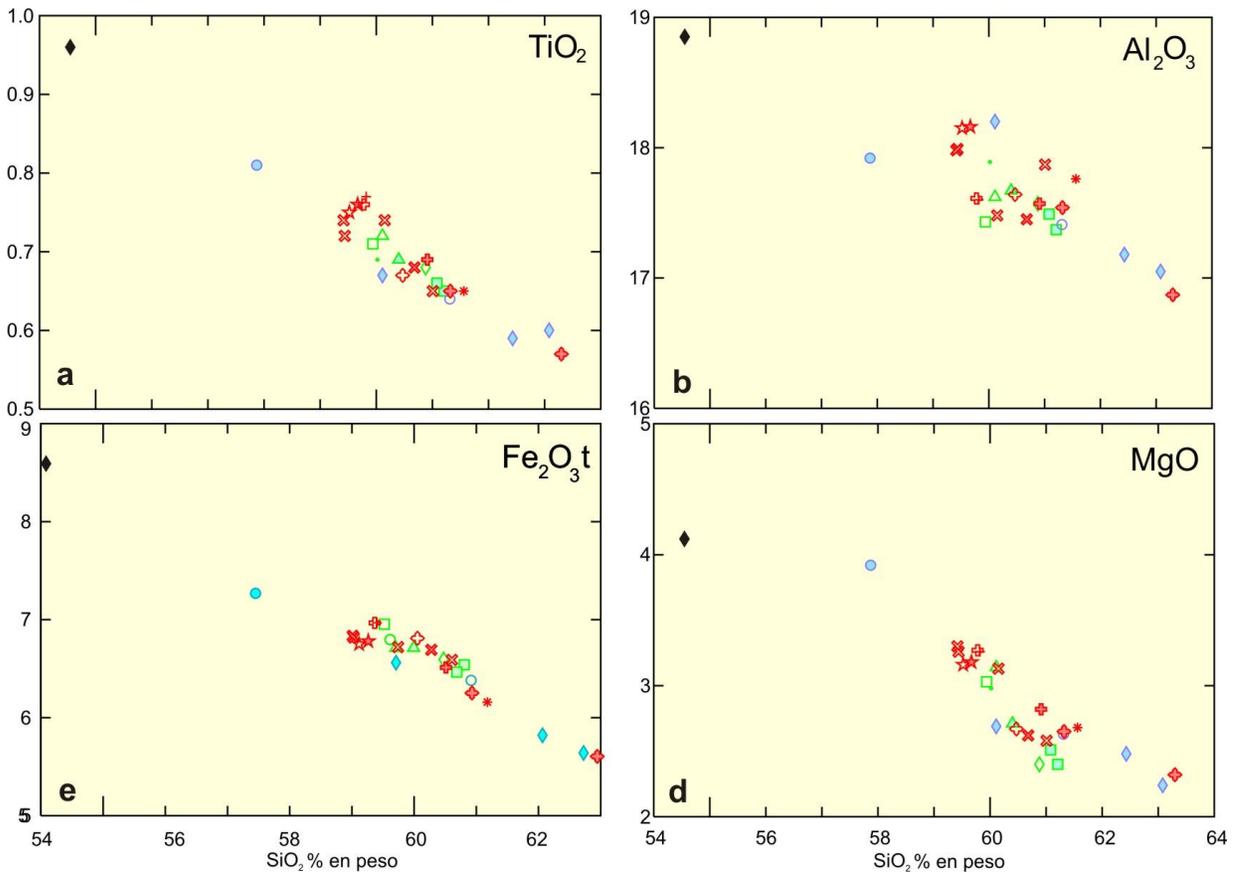


Figura 4.10a). Diagrama de álcalis ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)-sílice (Irvine y Baragar, 1971) de las rocas del volcán Tacaná. Los datos fueron normalizados en base anhidra. Se observa que las rocas de las tres etapas eruptivas aparecen en el campo de las rocas subalcalinas. b) Diagrama de álcalis, hierro y magnesio (AFM) (Irvine y Baragar, 1971), de las rocas del volcán Tacaná normalizados en base anhidra. Se aprecia que las muestras de las tres etapas tienen afinidad calcialcalina. Abreviaturas: Alk: Álcalis ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$), MgO: óxido de magnesio y FeO: óxido ferroso

4.2.1. Elementos mayores (diagramas de variación)

Para establecer la variación química de las muestras de lava entre las distintas etapas eruptivas del Tacaná, se construyeron diagramas de tipo Harker o binarios, que permiten mostrar las variaciones composicionales de las muestras, utilizando el contenido de SiO_2 como parámetro evolutivo, contra los demás elementos analizados (Fig. 4.11).

En los diagramas de elementos mayores de las tres etapas eruptivas, se puede apreciar de manera general que con el aumento de sílice, ocurre un empobrecimiento de las concentraciones de TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO y CaO (Fig. 4.11 a-e), es decir, se observa una correlación negativa; mientras que el K_2O y Na_2O despliegan una correlación positiva (Fig. 4.11 f y h). Por otro lado, para el P_2O_5 más bien se observa una tendencia horizontal es decir, no existen variaciones de este elemento entre las muestras relativamente básicas (enclave) y aquellas ácidas (dacitas) (Fig. 4.11 g).



Continuación...

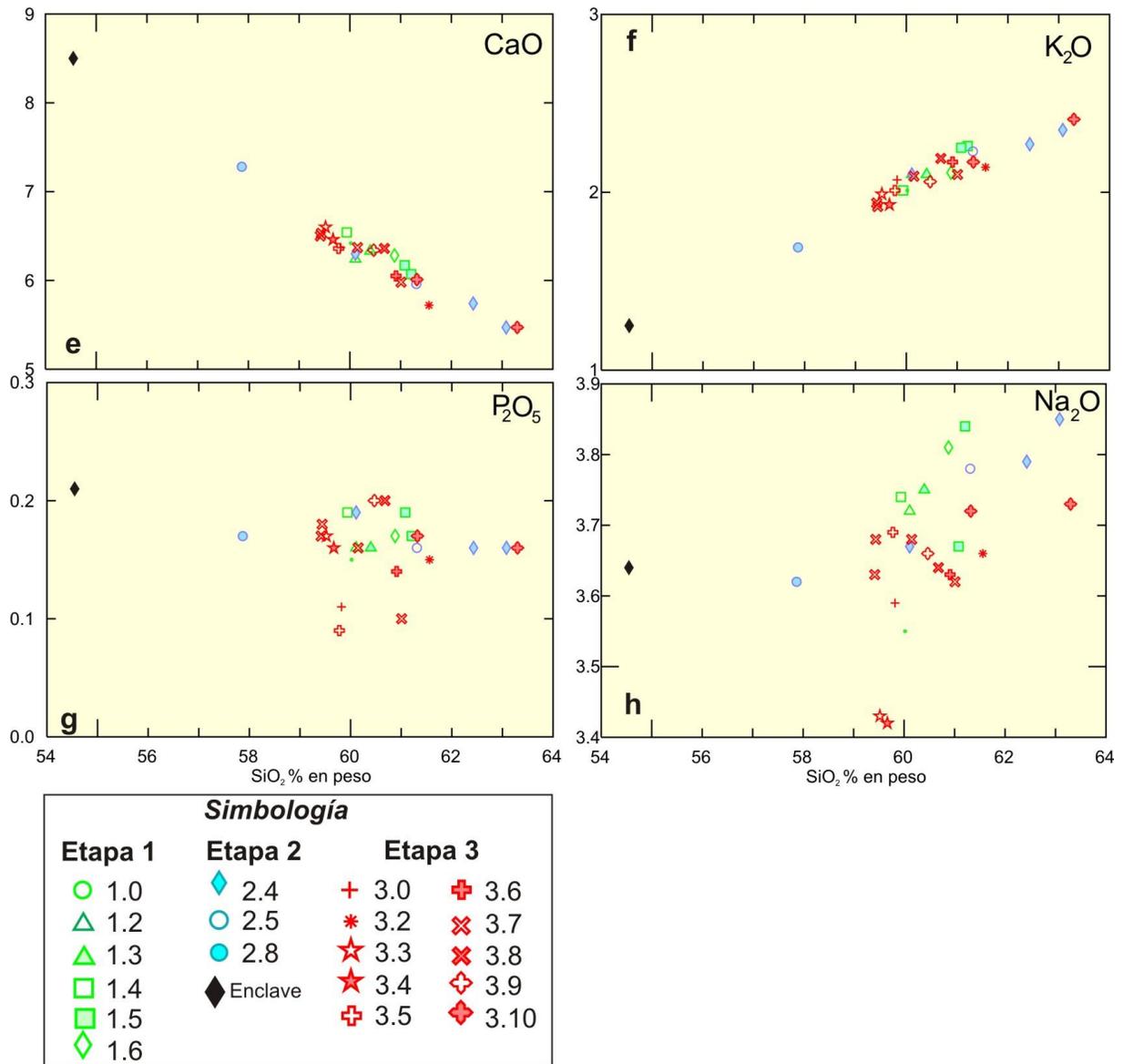


Figura 4.11. Diagramas de tipo Harker (SiO_2 versus otros elementos), que muestran las variaciones de los elementos mayores de las rocas, de las tres etapas eruptivas del volcán Tacaná.

4.2.2. Elementos Traza

Como en el caso de los elementos mayores, también se elaboraron diagramas de variación con respecto al contenido de SiO_2 , de los elementos traza en las tres etapas eruptivas del Tacaná.

En general, en los diagramas se aprecia que para las tres etapas eruptivas del Tacaná, las muestras presentan un aumento de elementos altamente incompatibles como Ba, Rb, Zr y, en menor medida, Nb con el aumento de sílice (Fig. 4.12 a, b, c y g). Sin embargo con lo observado anteriormente, los patrones presentados para estos elementos traza son algo complejos, debido a que se pueden observar dos diferentes pendientes positivas. La mayoría de las muestras de la Etapa 1 tienen un enriquecimiento mucho más evidente, con concentraciones de Rb que varían entre 51 y 83 ppm y describiendo una pendiente más inclinada con respecto a las muestras de la Etapa 2. En la Etapa 2 se observan concentraciones de 27 a 64 ppm de Rb, mostrando menor variación conforme a la evolución magmática y agrupándose en una pendiente menor. Por otro lado, el comportamiento de los productos más recientes (Etapa 3) es menos claro, ya que se distribuyen en los dos grupos anteriores, con una variación de Rb que fluctúa entre 47 y 69 ppm. (Fig. 4.12 b).

Por su parte el V, muestra una disminución con el aumento del SiO_2 (Fig. 4.12 d). Los elementos Y, Zn y Co (Fig. 4.12 e-h) se comportan de manera parecida a los elementos incompatibles, ya que despliegan dos tendencias distintas: con concentraciones menores presentan una pendiente casi plana (Etapa 2) y con concentraciones mayores describen una pendiente muy pronunciada (Etapa 1). En este caso, las rocas de la Etapa 3 se distribuyen nuevamente en los dos grupos anteriores. La distribución de Sr es muy característica, ya que presenta dos lineamientos con pendientes opuestas (Fig. 4.12 i). En la pendiente positiva se agrupan las rocas de la Etapa 1 y Etapa 3, mientras que en la negativa, se encuentran las rocas de las etapas 2 y 3.

Finalmente, la distribución de los elementos Cr y Ni no presentan distribuciones claras con la evolución magmática. En el caso del Ni, varía 10 unidades (6-16 ppm) (Tabla 4.1).

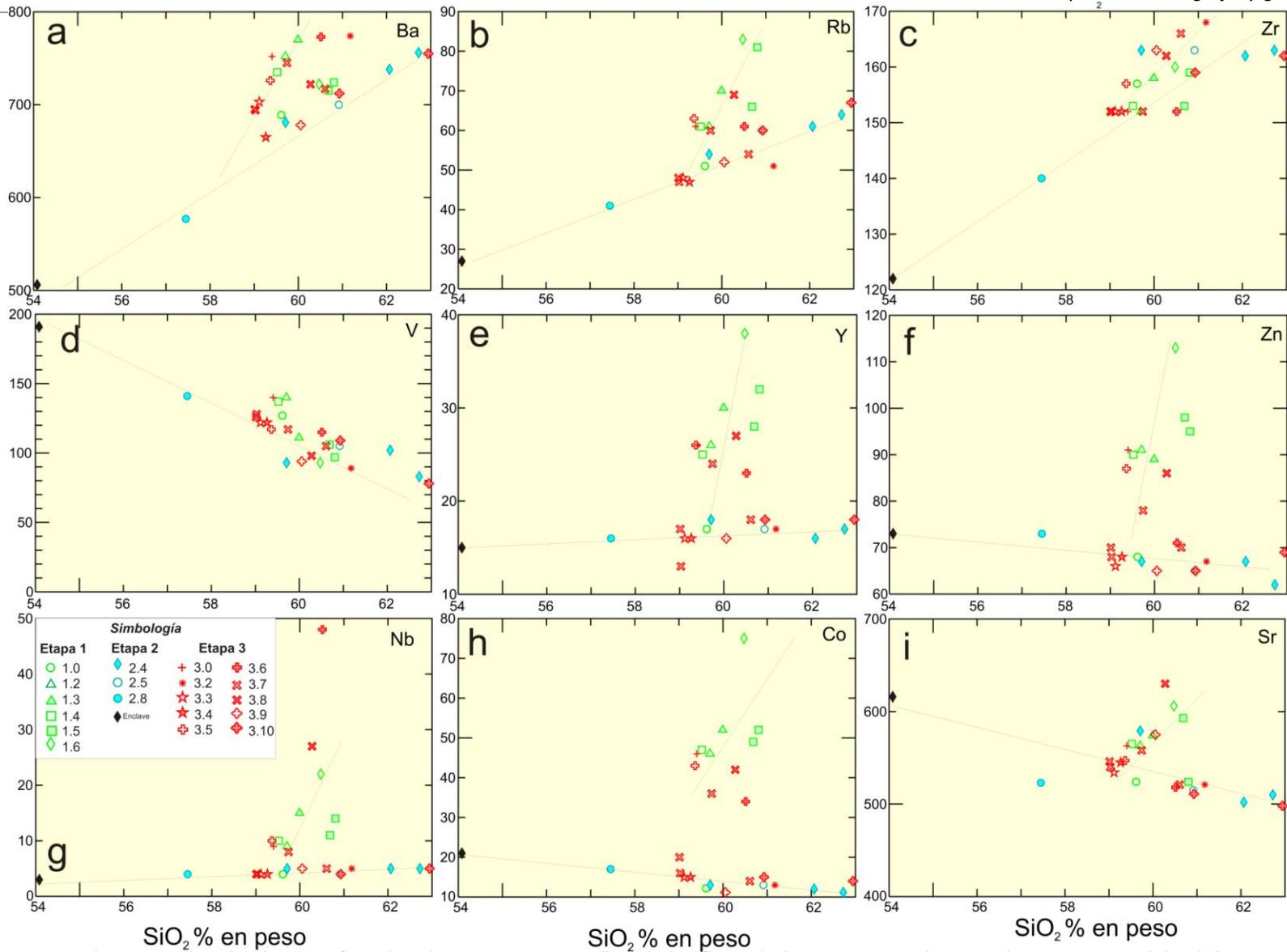


Figura 4.12. Diagramas de tipo Harker donde se grafican los elementos traza vs sílice de los flujos de lava, correspondientes a las tres etapas del volcán Tacaná. En los diagramas se observan dos tendencias.

Capítulo 5. Discusión.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el volcán Tacaná forma parte del CVT, el cual fue emplazado dentro de los remanentes de la Caldera San Rafael (2 Ma), durante el Plioceno y Pleistoceno, junto con otras dos estructuras caldéricas, Chanjalé (1 Ma) y Sibinal (edad desconocida). Estas fueron edificadas de manera discordante sobre un basamento basculado, conformado por rocas granodioríticas de 12.2 a 20 Ma de edad (García-Palomo *et al.*, 2006). Las tres calderas fueron afectadas por fallamiento normal durante el Plioceno y Pleistoceno temprano, formando el graben Tacaná con tendencia NE-SW, dentro del cual fue emplazado el Complejo Volcánico Tacaná (García-Palomo *et al.*, 2006).

5.1. Evolución del CVT

La actividad volcánica del CVT, inició después de la actividad de las calderas (posterior a 0.81 ± 0.16 Ma), en el Pleistoceno tardío (García-Palomo *et al.*, 2006) con el emplazamiento del volcán Chichuj, mediante la emisión de flujos de lava, de composición andesítica, que construyeron el edificio volcánico. Una alteración hidrotermal importante ocasionó el colapso parcial de la parte SE del edificio, produciendo la avalancha de escombros Muxbal (Espíndola, *et al.*, 1993). La actividad del volcán continuó con emisiones de flujos de lava y en menor proporción por actividad piroclástica, que en la actualidad se observan como pequeños abanicos, constituidos por depósitos de flujo de escorias, flujos de bloques y cenizas (Mora *et al.*, 2004). Hoy en día se observa un cráter en forma de herradura, lo que sugiere que ocurrió un evento de colapso parcial del edificio Chichuj (García-Palomo *et al.*, 2006).

El volcán Tacaná, fue construido al este de los remanentes del volcán Chichuj, inicialmente por emisiones de flujos de lava de composición andesítica, seguido por erupciones de tipo Peleano, Pliniano, intercaladas con actividad efusiva (Espíndola *et al.*, 1989).

Posteriormente el edificio original del Tacaná, fue destruido de manera parcial, por un colapso de la porción NW del cráter, perpendicular a las fallas normales NNE-SSW. Dicho colapso, originó una avalancha de escombros y prosiguió con una serie de flujos de bloques y cenizas (Macías *et al.*, 2010). Estos hechos sugieren que el evento del colapso del edificio, se debió a la intrusión de un domo central que generó sobrepresión en el edificio volcánico produciendo el colapso, perpendicular a las fallas normales NNE-SSW (García-Palomo *et al.*, 2006).

La actividad del CVT, se propagó siguiendo un alineamiento NW-SE, que se correlaciona con el fallamiento normal (García-Palomo *et al.*, 2006) y con el emplazamiento del domo Plan de las Ardillas hace aproximadamente 30 000 años y probablemente es contemporáneo al colapso NW del edificio del Tacaná (García-Palomo *et al.*, 2006). Finalmente, la actividad siguió propagándose hacia el SW para dar origen al volcán San Antonio, edificado por flujos de lava andesíticos y domos de lava de la misma composición, intercalados con depósitos piroclásticos de caída y de oleada, cuya última erupción fue de tipo peleano y ocurrió hace 1950 años, dando origen al depósito de flujo piroclástico Mixcun (Macías *et al.*, 2000).

5.2. Evolución del volcán Tacaná

De las cuatro estructuras que conforman el CVT, sin duda alguna el Tacaná es el de mayor complejidad, debido a la gran cantidad de depósitos que ha producido y además porque su actividad más reciente se ha centrado en las faldas de su estructura (Macías *et al.*, 2010). Con base en los datos de campo y de trabajos previos, se sabe que tanto la actividad efusiva como la explosiva, jugaron un papel importante en la edificación del volcán Tacaná, ya que se han identificado depósitos piroclásticos intercalados con flujos de lava (Fig. 5.1).

Las rocas más antiguas relacionadas al volcán Tacaná han sido consideradas del Pleistoceno tardío (García-Palomo *et al.*, 2006), sin embargo en trabajos previos no se

reportan fechamientos radiométricos de los flujos de lava. Con base en la información de campo, edades de C-14 y ^{40}Ar - ^{39}Ar y fechamientos reportados en trabajos previos, se concluye que el vulcanismo en el Tacaná inició hace más de 42 000 años (Espíndola et al., 1989) con la formación de un domo de composición andesítica, el cual fue destruido por una explosión generando flujos de bloques y cenizas emplazados hacia el flanco suoreste del edificio. Aproximadamente hace $30\,900 \pm 3\,700$ años, ocurrió el emplazamiento de los siete flujos de lava (Fig. 3.5) de composición andesítica (59.09 a 60.17% en peso de sílice) de la Etapa 1, emplazados hacia el sector norte y sur, sin embargo es probable que estas lavas antiguas hayan sido emplazadas alrededor del cono principal, pero que actualmente se encuentran cubiertas por depósitos más recientes. Además, ocurrió la formación de otro domo de composición andesítica, en la cima del volcán, que fue destruido generando flujos de bloques y cenizas emplazados hacia el S-SE fechado en $\sim 28\,540 \pm 260$ años A.P. (Mora et al., 2004). Debido a que no se conoce la edad de cada una de las lavas de la Etapa 1, es difícil determinar la posición exacta del flujo de bloques y cenizas de $\sim 28\,540$ años A.P., pero debido a que la lava más antigua de esta etapa es de $\sim 30\,900$ años A.P., se considera que dicho flujo forma parte de la misma etapa, la cual fue responsable de la formación del cono de más de 4 000 msnm. Los flujos de lava de la Etapa 1 muestran buen desarrollo de suelo en superficie, con alto contenido de materia orgánica y vegetación bien desarrollada y la morfología se encuentra suavizada, lo que sugiere un tiempo largo de intemperismo y erosión.

Durante la Etapa 2, el edificio volcánico fue intrusionado por un criptodomo hace más de 10 000 años, provocando inestabilidad y su inminente colapso, generando una avalancha de escombros denominada Avalancha Agua Caliente (Macías et al., 2010) seguida por una erupción explosiva que generó un depósito de flujos de bloques y cenizas, emplazado directamente sobre la Avalancha Agua Caliente y culminó con una intensa erosión que generó flujos de escombros que rellenaron las depresiones topográficas (Macías et al., 2010). Tiempo después se emplazó un domo de composición andesítica (Macías et al., 2010), en la cima del volcán, que se destruyó dando como resultado un depósito de flujo de bloques y cenizas emplazado hacia NW. La Avalancha Agua Caliente dejó un cráter de

colapso en forma de herradura, abierto hacia el NW (Fig. 5.2), afectando las lavas de la Etapa 1 y precisamente en la base del escarpe oriental de dicho cráter, se encuentra el cráter de la explosión freática ocurrida en 1986, en donde aún se aprecian fumarolas. Inmediatamente después se emplazó un flujo de lava denominado Agua Zarca, hace $10\,000 \pm 5000$ años, a esto le siguió un período de quietud, evidenciado por la presencia de paleosuelos encima de este flujo de lava, intercalados con oleadas piroclásticas, la más antigua fechada en $10\,610 \pm 330 / -315$ años A.P., (Macías *et al.*, 2010). Después de este evento, se emplazaron 5 flujos de lava de composición andesítica (57.28 a 60.97% en peso de SiO_2), hacia el norte y noroeste del volcán, en un tiempo relativamente corto sin interrupciones de actividad explosiva. La mayoría de las lavas se emplazaron hacia el NW, aprovechando la depresión del cráter de colapso (Fig. 5.2). Considerando el error de ambos fechamientos, aparentemente es más antiguo el depósito de oleadas piroclásticas, sin embargo las relaciones de campo sugieren que la lava Agua Zarca, está por debajo de dichas oleadas (Macías *et al.*, 2010). Sería muy recomendable llevar a cabo nuevos fechamientos a fin de precisar las edades de estos eventos. Desafortunadamente se desconoce la edad absoluta de muchas de estas lavas, por lo que es difícil establecer la fecha en la que culminó dicha etapa.

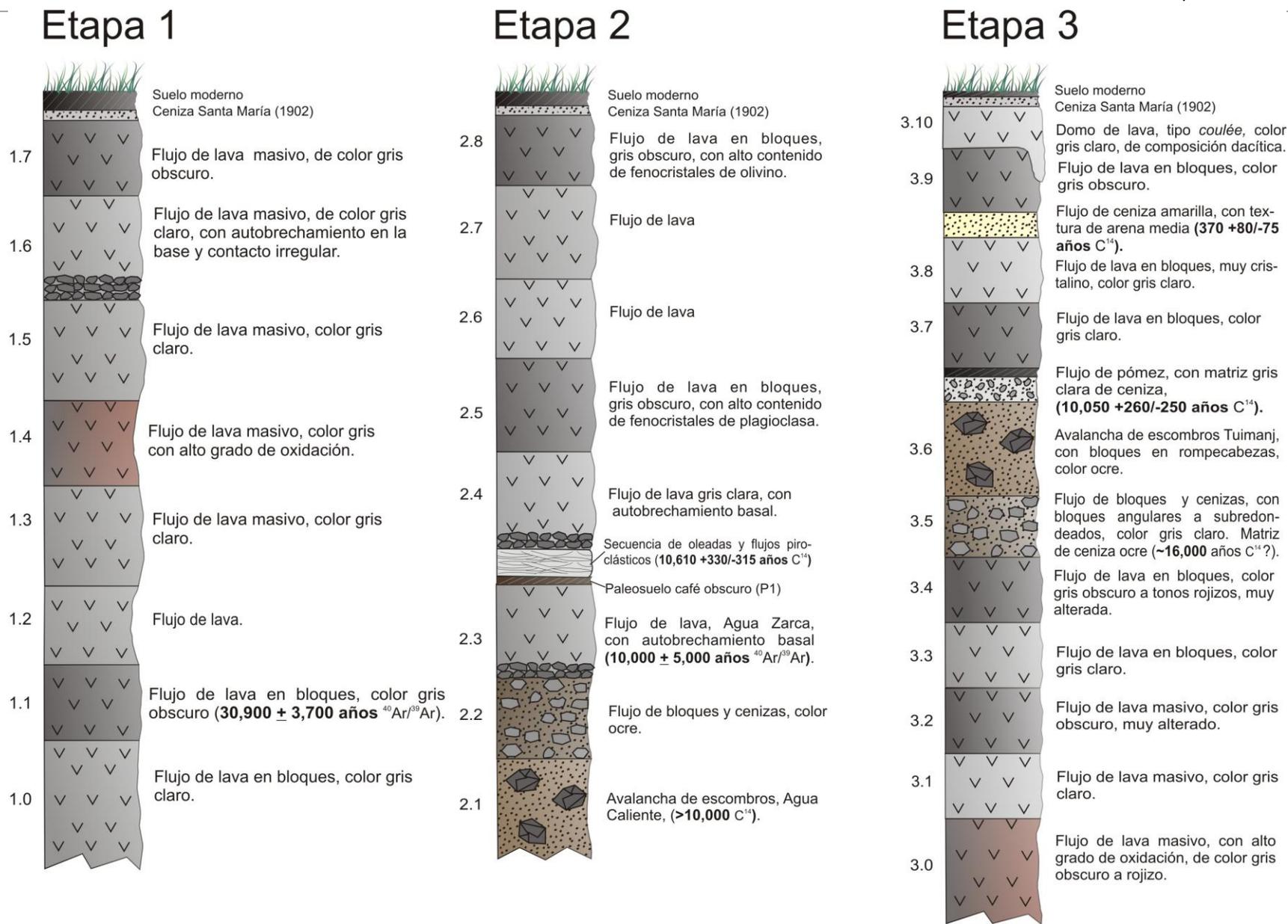


Figura 5.1. Columnas compuestas de cada una de las tres etapas eruptivas del volcán Tacaná. Fechamientos obtenidos mediante ⁴⁰Ar/³⁹Ar y ¹⁴C.

Después del emplazamiento de las lavas de la Etapa 2 (>10 000 años A.P.), inició la actividad efusiva más reciente del volcán Tacaná (Etapa 3), con la emisión de un flujo de lava de composición andesítica con 58.65% en peso de sílice (unidad 3.0) (Fig. 5.1, Etapa 3). La actividad continuó con la emisión de cuatro flujos de lava de composición andesítica hacia el norte, con una variación de sílice de 59.04 a 60.56% en peso, seguido de un periodo de actividad explosiva, relacionada a la destrucción de un domo de composición andesítica (58.89% en peso de SiO_2), hace $16\,350 \pm 50$ años (Mora et al., 2004), el cual generó flujos piroclásticos de bloques y cenizas que se emplazaron principalmente en la ladera norte del volcán. Posteriormente una parte del flanco norte del volcán colapsó y generó una avalancha de escombros denominada Avalancha Tuimanj, de composición andesítica (59.99% en peso de sílice) que dejó una morfología de montículos (Fig. 3.16). Hace aproximadamente $10\,050 +260/-250$ años ocurrió otra erupción explosiva que generó un flujo piroclástico rico en pómez, que carbonizó la vegetación existente y se depositó encima de la avalancha de escombros (Fig. 5.1, Etapa 3). Prosiguió un periodo de quietud durante el cual se desarrolló un suelo, que fue seguido de nuevo por actividad efusiva originando dos coladas de lava de composición andesítica (58.92 a 60.15% en peso de sílice) emplazados hacia el norte del volcán. Cronológicamente cercano a estas dos lavas, tuvo lugar una erupción explosiva que generó flujos piroclásticos de pómez emplazados hacia los flancos este y sureste del volcán carbonizando materia orgánica misma que fue fechada en 6910 ± 95 años A.P., (Mora et al., 2004). Posteriormente ocurrió otra erupción explosiva, que dio lugar a un flujo de cenizas de color amarillo el cual también carbonizó materia orgánica, la cual fue fechada en $370 +80/-75$ años A.P. La actividad volcánica de esta etapa, continuó con el emplazamiento de una colada de lava de composición andesítica (59.77% en peso de SiO_2) de grandes dimensiones (3.36 km de longitud) y culminó con el desarrollo de un domo tipo *coulée*, de composición dacítica (62.61% en peso de sílice), que se ubica en la cima del volcán Tacaná (Fig. 5.1, Etapa 3). Cabe destacar, que las unidades conformadas por flujos de lava, tienen poco desarrollo de suelo y por consiguiente presentan escasa vegetación.

En resumen, se puede observar que a lo largo de la historia eruptiva del Tacaná han ocurrido distintos tipos de erupciones, tanto efusivas como explosivas, ya que se observan depósitos piroclásticos y avalanchas de escombros intercalados con los derrames de lava (Fig. 5.1). Además, es muy difícil correlacionar flujos de lava entre las tres etapas eruptivas, ya que se cuenta con pocos fechamientos radiométricos y no existen relaciones estratigráficas directas en campo para cada uno de los flujos de lava, pero es claro que entre las tres etapas existe un traslape temporal (Fig. 5.1).

5.3. Tasa de efusión de lavas

La tasa de efusión es la velocidad con que un volumen de lava es emitido (Harris *et al.*, 2007). Un flujo de lava puede no fluir a través de la superficie, pero estar contenido en un tubo o ser inyectado desde su interior (de un flujo o domo) ocasionando un crecimiento endógeno (Calvari y Pinkerton, 1998, 1999; Guest *et al.*, 1984; Walker, 1991, Harris *et al.*, 2007), si el emplazamiento es endógeno o exógeno, la tasa de efusión controla el crecimiento de un cuerpo de lava, su expansión y extensión, influenciando sus propiedades dimensionales (longitud, anchura, espesor, volumen y área) (Blake 1990; Blake y Bruno, 2000; Kilburn, 2000, Kilburn y Lopes, 1988; Kilburn *et al.*, 1995 y Harris *et al.*, 2007).

La tasa de efusión y la velocidad de un flujo de lava, tienen efectos en la pérdida de calor y enfriamiento del flujo y por lo tanto, en la tasa de cristalización (Crisp y Baloga, 1994; Dragoni, 1989, Harris *et al.*, 1998 y 2007). Generalmente, hay una relación directa entre la longitud del flujo y la tasa de efusión (Walker, 1973; Wadge, 1978, Lopes y Guest, 1982, Kilburn y Lopes, 1991) y también en la longitud con el volumen (Malin, 1980; Lopes y Guest, 1982, Kilburn y Lopes, 1991). La tasa de efusión puede ser usada para determinar, si la actividad volcánica está incrementando o disminuyendo (Harris *et al.*, 2000; Wadge, 1981) o para evaluar el comportamiento a largo plazo de las erupciones potencialmente peligrosas (Branca y Del Carlo, 2005; Wadge, 1977; 1981, 1983 y Wadge *et al.*, 1975).

5.4. Cálculo de la tasa de efusión

Los contrastes morfológicos observados en los 21 flujos de lava del Tacaná, pueden reflejar los diferentes regímenes en los que se formaron. Las relaciones entre los distintos parámetros morfométricos describen los patrones básicos de crecimiento, considerando que el comportamiento del flujo de lava es persistente (Carrasco-Núñez, 1997).

Para evaluar la tasa de efusión, es necesario contar con el volumen de lava emitida (m^3) por unidad de tiempo (s), de la actividad efusiva del volcán (Walker, 1973, Carrasco-Núñez, 1997).

En este estudio, se utilizaron dos métodos para calcular la tasa de efusión de los flujos de lava del volcán Tacaná. El primer método, estima la duración de la erupción mediante la aplicación del modelo propuesto por Kilburn y Lopes (1991). En dicho modelo, se consideran las relaciones de algunos parámetros morfométricos como: dimensión de los flujos, pendiente de la capa subyacente y duración de la erupción para lavas aa y en bloques. La siguiente ecuación muestra la relación de estos parámetros.

$$(W_m/L_m) H^2 \sin \alpha = b k T$$

Donde:

W_m : ancho máximo del flujo de lava

L_m : longitud máxima del flujo de lava

H : espesor promedio del flujo de lava

α : ángulo de la capa subyacente del flujo de lava

b : constante adimensional

k : difusividad termal de la lava

T : duración de la erupción

Para obtener el ángulo de la capa subyacente de los flujos de lava, se calculó la pendiente, aplicando la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Tan \alpha = h/d}$$

Donde:

h: altura

d: distancia.

Para aplicar dicha fórmula, fue necesario definir dos puntos en el mapa (formato vectorial), determinando la distancia entre ellos. Posteriormente, con ayuda de las curvas de nivel se determinó la altitud de cada punto; la altura es el resultado de la diferencia de altitudes. Para calcular la pendiente se dividió la altura (h) entre la distancia (d) vertical obteniendo la pendiente en porcentaje, a este resultado se le calcula el inverso de la tangente para obtener su valor en grados.

El segundo método utilizado para obtener la tasa de efusión, consiste en la aplicación del modelo de Graetz propuesto por Hulme y Fielder, (1977). Este es un método empírico, basado en el modelo de enfriamiento de conducción limitada (Pinkerton y Sparks, 1976; Guest *et al.*, 1987, Carrasco-Núñez, 1997; Hulme y Fielder, 1977) donde el enfriamiento del flujo de lava se compara con un fluido caliente en movimiento a través de una pipa de enfriamiento. La distribución de la temperatura a lo largo del flujo, es descrita por una cantidad adimensional conocida como el número de Graetz (Gz), expresada como:

$$\mathbf{Gz = ud^2/ kx}$$

Donde:

u: velocidad promedio del flujo de lava

d: espesor promedio del flujo de lava

k: difusividad termal

x: longitud del flujo de lava

Walker (1973), determinó que los flujos de lava se detienen antes de que el valor de Gz llegue alrededor de 300. La tasa de efusión está dada por:

$$F = wdu$$

Donde:

w: ancho del flujo de lava

Esta ecuación puede ser reescrita como:

$$Gz = (F/kx) (d/w)$$

Donde, el cálculo de la tasa de efusión toma en consideración las características geomorfológicas de los flujos de lava, como el espesor y longitud de cada uno de los flujos.

Aplicando los métodos de Kilburn y Lopes (1991) y el número de Graetz (Hulme y Fielder, 1977) fue posible obtener la tasa de efusión de los flujos de lava del Tacaná. Los datos obtenidos de dichos cálculos se presentan en la tabla 5.1, así como algunos parámetros morfométricos.

Tabla 5.1. Parámetros calculados de las lavas del Tacaná, como: contenido de sílice, fenocristales, ángulo de la capa subyacente, volumen y tasa de efusión. Este último parámetro fue calculado mediante dos métodos.

Unidad	SiO ₂ (%)	Fenocristales Vol (%)	α (°)	Volumen (km ³)	Tasa de efusión m ³ /s	
					K&L	H&F
1.0	59.42	75	28	0.124	0.13	2.20
1.1	59.18	65	18	0.201	0.36	2.23
1.2	N/M	N/M	28	0.034	0.08	4.58
1.3	59.69	70	18	0.034	0.32	2.05
1.4	59.09	60	18	0.035	0.36	4.91
1.5	60.17	68	25	0.118	0.24	2.32
1.6	59.96	60	21	0.048	0.15	1.78
1.7	N/M	N/M	26	0.002	0.17	0.99
2.3	N/M	N/M	13	0.452	1.04	6.89
2.4	60.97	82	13	0.231	0.79	4.09
2.5	58.70	75	24	0.013	0.22	1.76
2.6	N/M	N/M	15	0.028	0.33	2.97
2.7	N/M	N/M	22	0.004	0.15	1.50
2.8	57.28	75	21	0.079	0.34	1.36
3.0	58.65	85	30	0.117	0.29	3.42
3.1	N/M	N/M	8	0.139	0.46	4.76
3.2	60.56	65	19	0.010	0.33	3.50
3.3	59.17	65	31	0.004	0.03	3.29
3.4	58.89	75	19	0.030	0.24	2.87
3.7	59.39	65	8	0.024	0.60	7.68
3.8	59.74	80	27	0.023	0.17	1.03
3.9	59.77	80	14	0.054	0.97	3.67
3.10	61.69	60	37	0.007	0.01	0.25

Abreviaturas: **SiO₂** sílice; **(N/M)** no muestreado; **α**, ángulo en grados de la pendiente de la capa subyacente; **K&L**. Método de Kilburn y Lopes (1991); **H&F**. Método usando el número Graetz (Hulme y Fielder, 1977).

Comparando los resultados de los dos métodos utilizados en este estudio, se considera que el método del número de Graetz, es el más acertado, ya que los resultados obtenidos son equivalentes a las tasas de efusión calculados en otros volcanes, como en el volcán Etna (Calvari *et al.*, 2002), el Citlaltépetl (Carrasco-Núñez, 1997) y Hualalai (Guest *et al.*, 1995), sólo por mencionar algunos de los volcanes en los que se han realizado dichos cálculos.

5.5. Parámetros físicos de las lavas del Tacaná

Con los resultados obtenidos por el método de Graetz (Hulme y Fielder, 1977), la tasa de efusión de las lavas del Tacaná (Tabla 5.1), se observa que en la Etapa 1, la mínima es de

0.99 m³/s (unidad 1.7) y la máxima es de 4.91 m³/s (unidad 1.4). La Etapa 2 oscila entre 1.36 y 6.89 m³/s, correspondiendo a la unidad 2.8 y 1.3 respectivamente. Finalmente, la Etapa 3 tiene una tasa de efusión que fluctúa entre 0.25 m³/s que corresponde al domo del volcán y 7.68 m³/s, perteneciente a la unidad 3.7. Se debe considerar que el avance de los flujos de lava presenta una velocidad diferente, debido a que la tasa de efusión varía durante su emplazamiento.

En la gráfica de la figura 5.3 a, se observan dos tendencias, una con relación directa entre la tasa de efusión y el volumen; entre mayor es la tasa de efusión mayor es el volumen total emitido; la otra, muestra cambios en la tasa de efusión con un volumen constante, lo que sugiere que el volumen no siempre determina la tasa de efusión. Sin embargo, la tasa de efusión determina la longitud del flujo (Fig. 5.3b), lo cual fue demostrado por primera vez en el trabajo de Walker (1973), quien propuso que a una tasa de efusión alta, un flujo de lava tiende a fluir rápidamente y formar un flujo de gran longitud; por el contrario, a una tasa de efusión relativamente baja, se forman flujos compuestos de corta longitud.

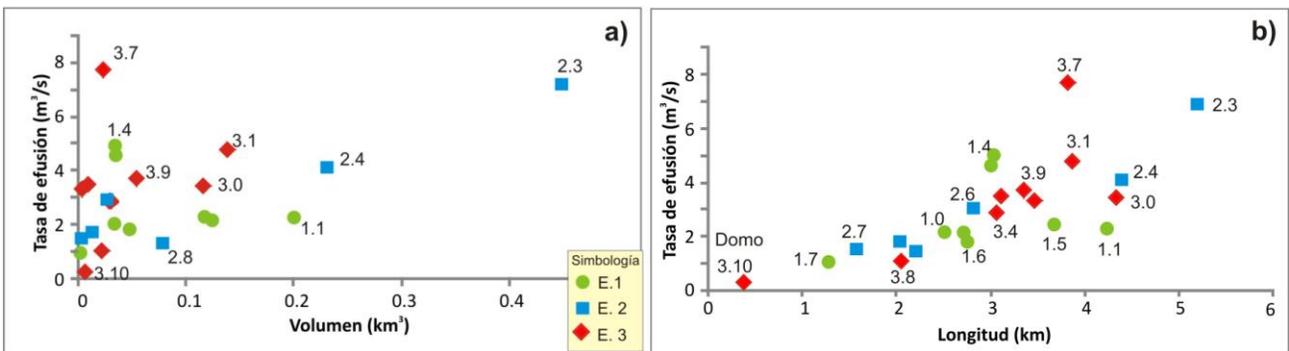


Figura 5.3. Gráficas de a) tasa de efusión vs volumen; b) tasa de efusión vs longitud

Por otro lado, los resultados de este trabajo indican que la longitud de los flujos de lava tienen una relación inversa con el contenido de sílice (Fig. 5.4a), situación lógica ya que el contenido de sílice determina la viscosidad de la lava, por lo tanto una lava con alto contenido de sílice no será capaz de recorrer grandes distancias. A lo largo de la actividad efusiva del Tacaná, el contenido de sílice ha fluctuado de manera desordenada en cada una de las etapas eruptivas (Fig. 5.4b), lo que se traduce en una evolución compleja en la

cámara magmática, por lo tanto en las tres etapas se tendrán variaciones en la longitud de los flujos de lava, como se demuestra en la gráfica de longitud vs secuencia estratigráfica (Fig.5.4c). Otro factor que influye en la viscosidad es el contenido de cristales, en los resultados de la gráfica (Fig. 5.4d) no se aprecia una relación clara entre fenocristales vs espesor, lo cual puede deberse a que el espesor estimado de cada unidad podría mas bien tratarse de unidades de flujos sobrepuestos, aunque algunos datos indican una ligera tendencia positiva.

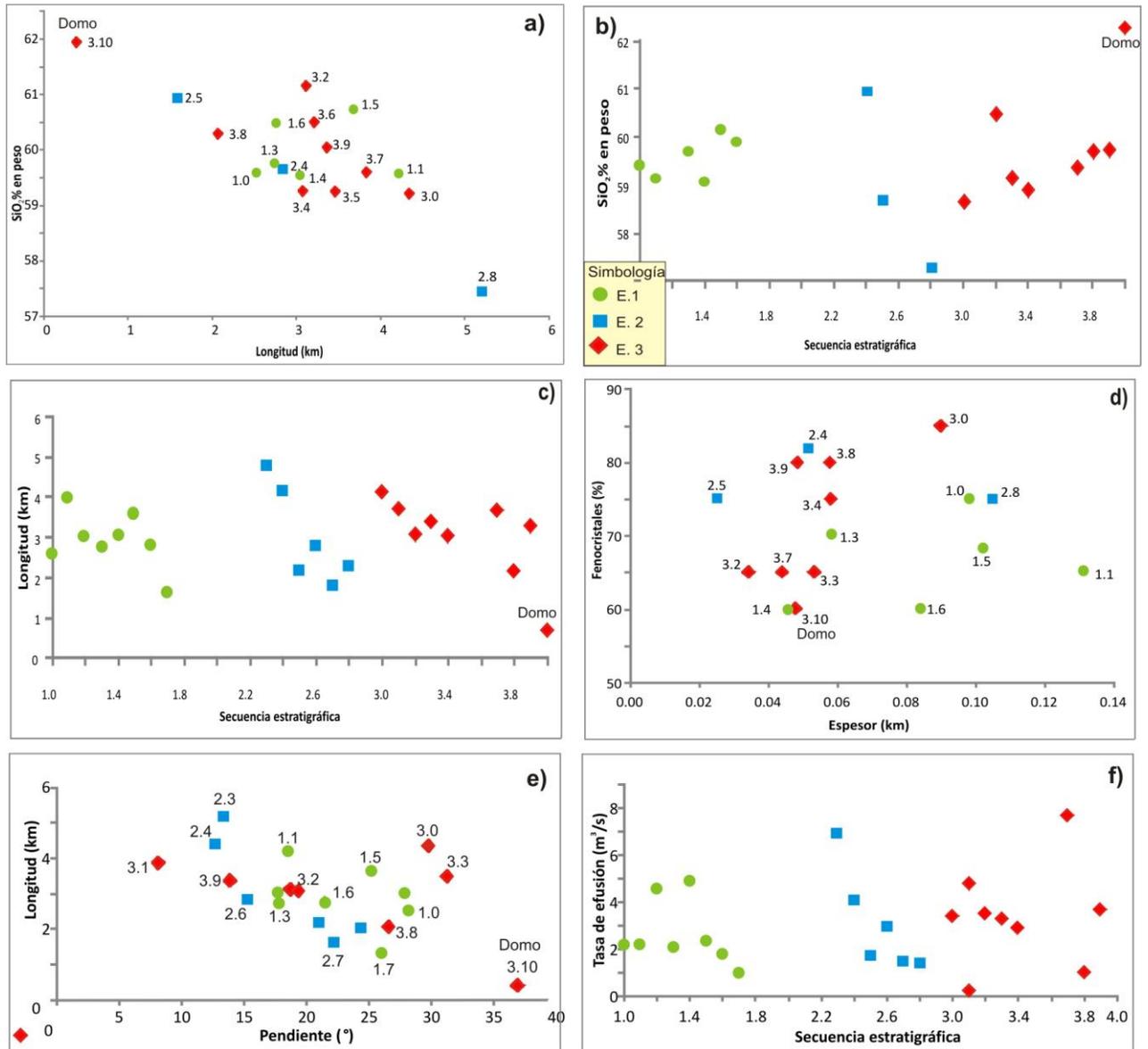


Figura 5.4. Gráficas de a) longitud contra sílice; b) secuencia estratigráfica contra sílice total; c) secuencia estratigráfica vs longitud; d) espesor vs fenocristales; e) pendiente vs longitud y f) secuencia estratigráfica contra tasa de efusión.

En el caso de la longitud vs pendiente, se observa que la pendiente no tiene relación directa con la longitud (Fig. 5.4e), además de que durante el emplazamiento de un flujo de lava éste puede atravesar una topografía muy variada. Finalmente, tampoco se advierte una relación entre la posición estratigráfica y la tasa de efusión, lo cual sugiere que el comportamiento eruptivo del volcán, es complejo e impredecible (Fig. 5.4f).

El trabajo pionero de Walker (1973) propuso una relación directa entre la longitud de flujos de lava vs tasa de efusión (Fig. 5.5a) y a su vez la composición química de cada flujo, siendo los basálticos los de mayor longitud y tasa de efusión. Los datos de las lavas del Tacaná, caen dentro del campo de las andesitas-dacitas, en los valores más bajos de longitud y tasa de efusión. A manera de comparación, se muestran datos del Volcán de Colima (Navarro et al., 2002), los cuales en su mayoría caen muy cerca de los datos del Tacaná, a excepción de las lavas de 1975-1976 y 1998-1999, que presentan valores más altos, mismo que puede deberse al mayor volumen registrado por estas lavas.

Considerando longitud vs volumen de cada una de las lavas (Fig. 5.5b), en la que están trazados dos tendencias, una asociada a erupciones paroxísmicas y otra a erupciones tranquilas (Romano y Sturiale, 1982), se observa que los datos del Tacaná caen cerca de la tendencia de las erupciones tranquilas, al igual que los datos del Volcán de Colima. Sin embargo, algunos datos del Tacaná muestran una tendencia horizontal (misma longitud con volúmenes variables de más de $200 \times 10^6 \text{ m}^3$), que podría deberse a la sobreposición de varias unidades de flujo, ya que es complicado identificar flujos localizados debajo de las unidades superficiales en el Tacaná.

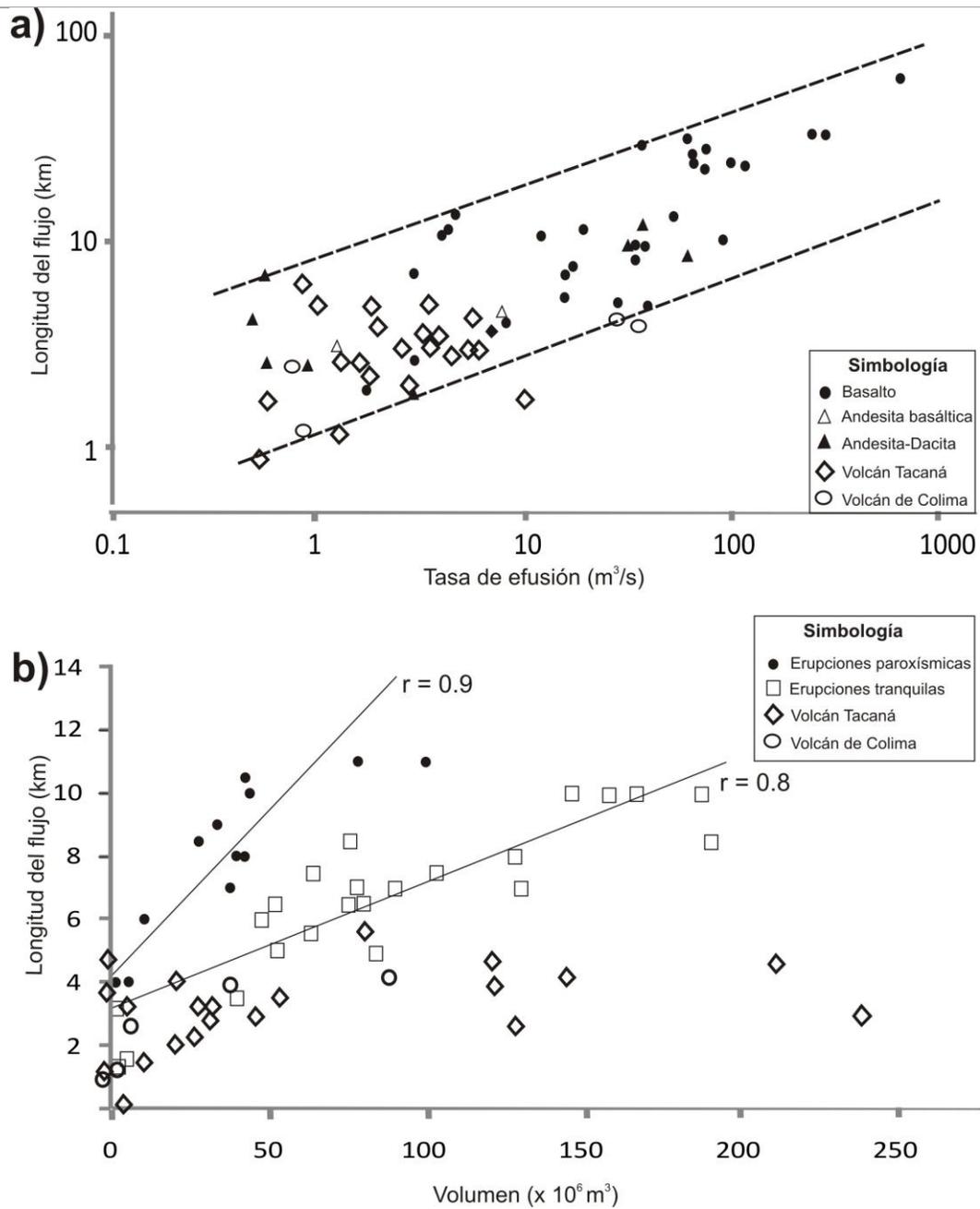


Figura 5.5 a) Gráfica de longitud del flujo vs tasa de efusión, en donde se incluyen datos del volcán Tacaná, Volcán de Colima y ejemplos de otras partes del mundo (Modificada de Walker, 1973). b) Gráfica de longitud del flujo contra el volumen, donde se muestran las erupciones paroxísmicas y tranquilas (Modificada de Romano y Sturiale, 1982).

En las gráficas presentadas en esta sección, sugieren que el parámetro de la viscosidad (Figs. 5.4a y d) no es determinante, o el único factor que regula la longitud de los flujos de lava, mismo que fue observado por (Malin, 1980), siendo la tasa de efusión el principal factor que determina la longitud de dichos flujos.

5.6. Implicaciones del peligro

A lo largo de la historia eruptiva del volcán Tacaná, se ha registrado actividad tanto efusiva como explosiva muy intensa (Mercado y Rose, 1992; Espíndola *et al.*, 1993; Macías *et al.*, 2000, 2010; Mora *et al.*, 2004), lo que hace a este volcán uno de los más activos y peligrosos de México, aunado al gran número de poblaciones asentadas en los alrededores del edificio volcánico y la importancia comercial que representa la ciudad de Tapachula, Chiapas con la parte guatemalteca.

Existen algunos estudios relacionados al peligro volcánico para todo el Complejo Volcánico Tacaná, en los cuales se consideran flujos piroclásticos y avalanchas de escombros (Mercado y Rose, 1992 y Macías *et al.*, 2000), así como lluvia de pómez y cenizas (Borjas, 2006). Sin embargo, para flujos de lava y en especial para los provenientes del volcán Tacaná, no se ha hecho ninguna evaluación detallada, principalmente por que no se había realizado un estudio particular de los flujos de lava, por lo que el presente trabajo representa un importante complemento en el conocimiento de la historia eruptiva del volcán Tacana y en el futuro ayudará para construir un mapa de peligros volcánicos de manera integral.

Los fechamientos reportados hasta ahora por varios autores (Espíndola *et al.*, 1993; Macías *et al.*, 2000, 2010; Mora *et al.*, 2004; Borjas, 2006), indican que el Tacaná, así como todo el CVT, es un complejo volcánico activo, con actividad intermitente efusiva y explosiva, cuyos productos están distribuidos en los alrededores del complejo. Obviamente los productos de la actividad explosiva han tenido una distribución más amplia, sin embargo en este estudio solo se consideran a los flujos de lava.

De acuerdo con el presente estudio, al menos se han generado 22 flujos de lava, que se ubican desde la cima del volcán Tacaná hasta las faldas del mismo, desde hace 30 900 años hasta >370 años A.P., lo cual daría como resultado una recurrencia de un flujo de lava cada 1388 años o $0.006 \text{ km}^3/\text{mil años}$. Considerando la forma cónica actual del Tacaná, es muy probable que cualquier flujo de lava sea emplazado en las vertientes norte y sur (Fig. 3.23), ya que las estructuras Chichuj y domo Plan de las Ardillas representan

barreras naturales, que impedirían el paso de los flujos de lava. De acuerdo con el registro estratigráfico de las lavas, el alcance máximo al norte sería de 4.34 km (unidad 3.0), para una lava de 0.117 km^3 , emplazado a una tasa de $3.42 \text{ m}^3/\text{s}$. Además, en algún caso extraordinario, si se tratara de un flujo de lava de mayor magnitud (>volumen, > tasa efusión), el peligro sería el mismo, debido a que los remanentes de la Caldera San Rafael (Fig. 5.2) forman una barrera natural $\sim 1000 \text{ m}$, por lo que sería difícil que cualquier flujo de lava sea capaz de rebasar dicha pared, incluso se ha documentado que tampoco los flujos piroclásticos de bloques y cenizas han logrado superar esta barrera (Borjas, 2006).

En caso de una futura erupción de tipo efusiva del volcán Tacaná, las poblaciones más afectadas serían las que se encuentran ubicadas en la porción norte y noreste del volcán (Tuimanj, Canisben, San Rafael y Chichuj, del lado guatemalteco) y noroeste (Agua Tibia, del lado mexicano), como se observa en el mapa de la figura 5.2, ya que históricamente las lavas emitidas por el Tacana han sido emplazadas hacia la ladera norte, debido a la depresión topográfica del cráter de colapso, que ocasionó la avalancha de Agua Caliente. Mientras que la ladera sur, presenta una mayor pendiente ($>45^\circ$), pero cuenta con una barrera topográfica (cráter somma) que evita el emplazamiento de los flujos de lava de poco volumen hacia a esta ladera. Históricamente sólo se han registrado dos flujos de lava de gran longitud ($> 4 \text{ km}$), previos al cráter de colapso.

Por la historia eruptiva que ha presentado el volcán Tacaná, es necesario llevar a cabo más estudios estratigráficos y tratar de fechar los derrames de lava relativamente más recientes y enfocarse en las erupciones históricas, de las cuales se desconoce bastante, con el fin de establecer sus alcances, efectos y recurrencia, logrando así un mejor conocimiento de los peligros volcánicos que presenta el Tacaná y con esto tratar de mitigar los desastres, tanto económicos como humanos, en caso de una futura erupción.

Conclusiones.

El volcán activo Tacaná, ubicado en el Cinturón Volcánico de Centroamérica ha registrado varios eventos de erupciones efusivas alternadas con erupciones explosivas, tal y como lo atestiguan los depósitos en sus alrededores. La fase efusiva, ha sido importante en prácticamente toda la historia eruptiva, al menos desde hace $30\,900 \pm 3\,700$ años (lava fechada por método de $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$), así mismo, se han identificado colapsos del edificio volcánico (Avalancha Agua Caliente ocurrida hace $21\,305 \pm 335/-325$ años; Macías *et al.*, 2010) y erupciones explosivas tan jóvenes como $370 \pm 80/-75$ años de edad (depósito de flujo de cenizas, color amarillo).

De manera general, para la actividad efusiva se identificaron tres etapas eruptivas: Etapa 1 con 8 unidades de flujos de lava cubriendo un área de 6.6 km^2 y un volumen de 0.60 km^3 . Etapa 2 también conformada por 8 unidades: seis flujos de lava, un flujo de bloques y cenizas y una avalancha de escombros, ocupando una superficie de 13.8 km^2 y arroja un volumen de 1.38 km^3 . Finalmente, la Etapa 3 conformada por siete flujos de lava, un domo de lava, una avalancha de escombros y dos flujos de bloques y cenizas dentro de un área de 6.53 km^2 que da un volumen de 0.46 km^3 .

El mapa de distribución de los flujos de lava, indica que éstos se emplazaron principalmente en la ladera norte del volcán, en donde se registra una menor pendiente ($<40^\circ$) con distancias máximas de más de 4 km (unidades 1.1, 2.8 y 3.0,), mientras que en la ladera sur, la pendiente es de $>40^\circ$ con longitudes máximas de los flujos de ~ 2 y 4 km (unidades 1.0 y 2.4 respectivamente).

La mayoría de las muestras de lava son de composición andesítica oscilando entre 57.28 y 62.27% en peso de SiO_2 , con una asociación mineralógica de: $>\text{Plg} >\text{Anf} >\text{Pxn} >\text{óxidos de Fe-Ti (Ox)}$ y sólo en pocas muestras se encuentra presente el olivino (Ol), también el depósito de flujo de bloques y cenizas (unidad 3.5) y la avalancha de escombros (unidad 3.6), son de composición andesítica (58.89 y 59.99% en peso de SiO_2 respectivamente) y misma asociación mineralógica. Finalmente, sólo un domo (unidad 3.10), corresponde a una dacita poco evolucionada, con 62.61% en peso de SiO_2 .

La tasa de efusión de las lavas del Tacaná (calculada mediante el número de Graetz) muestra una disminución considerable, pasando de 4.91 a 0.99 m³/s en la Etapa 1, mientras que en la Etapa 2 varía de 6.89 a 1.36 m³/s y la Etapa 3 de 7.68 m³/s, indicando con esto una actividad variable en cuanto al aporte de magma hacia el reservorio del volcán.

El presente estudio, representa un avance importante en el conocimiento del volcán Tacaná, específicamente la actividad efusiva, misma que será de gran utilidad para estudios futuros sobre peligros volcánicos y elaboración de mapas de riesgo, que a su vez servirán a las autoridades responsables de proteger a la población asentada en los alrededores del volcán.

Bibliografía.

1. Arce, J.L., Macías, J.L., Hughes, S., Saucedo, R., Escobar, R., García-Palomo, A., Mora, J.C. (2004). *Late Pleistocene Plinian activity at the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala*. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI). General Assembly 2004. Pucón, Chile, November 14-19. Symposium 03a-07.
2. Báez-Jorge, F., Rivera Balderas, A., Arrieta Fernández, P. (1985). *Cuando el cielo ardió y se quemó la tierra*. Instituto Nacional Indigenista. México.
3. Bergeat, A. (1894). *Zur Kenntnis der jungen Eruptivgesteine der Republik Guatemala*. Zeitschr. Geol. Ges.: 131-157.
4. Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B. (1994). *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Edi. Routledge. London.
5. Blake, S. (1990). *Viscoplastic models of lava domes*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 88-126.
6. Blake, S., Bruno, B.C. (2000). *Modeling the emplacement of compound lava flows*. Earth Planet Sci Lett. 184:1 181-197.
7. Borjas, L. (2006). *Estratigrafía del sector NE del Complejo Volcánico Tacaná, Chiapas, México-Guatemala*. México, D.F., Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Tesis de Licenciatura: 117 p.
8. Böse, E. (1902). *Breve noticia sobre el estado actual del volcán Tacaná, Chiapas*. Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate. 18: 266-270.
9. Böse, E., (1903). *Los temblores en Zanatepec, Oaxaca a fines de septiembre de 1902 y el estado actual del Volcán de Tacaná*. Parérgones del Instituto Geológico de México. Tomo 1, 25p.
10. Bourseiller, P. Durieux, J. (2001). *Des volcans et des hommes*. Ed. Martinière. 415p.
11. Branca, S., Del Carlo, P. (2005). *Types of eruptions of Etna volcano AD 1670-2003: implications for short-term eruptive behaviour*. Bulletin of Volcanology. 4: 125-133.
12. Bullard, F.M. (1976). *Volcanoes of the Earth*. University of Texas, Austin, 579 p.

13. Calvari, S., Neri, M., Pinkerton, H. (2002). *Effusion rate estimations during the 1999 summit eruption on Mount Etna, and growth of two distinct lava flow fields*. Journal Volcanology and Geothermal Research. 119: 107-123.
14. Calvari, S., Pinkerton, H. (1998). *Formation of lava tubes and extensive flow field during the 1991-93 eruption of Mount Etna*. Journal Geophysical Research. 103: 27291-27302.
15. Calvari, S., Pinkerton, H. (1999). *Lava tube morphology on Etna and evidence for lava flow emplacement mechanisms*. Journal Geophysical Research. 90: 263-280.
16. Carr, M.J., Rose, W.I., Stoiber, R.E. (1982). *Central America. Andesite: Orogenic andesites and related rocks*. R. S. Thorpe. New York, John Wiley & Sons: 149-166.
17. Carrasco-Núñez, G. (1997). *Lava flow growth inferred from morphometric parameters: a case study of Citlaltépetl volcano, Mexico*. Geol. Mag. 134 (2) 151-162.
18. Crisp, J., Baloga, S. (1994). *Influence of crystallization and entrainment of cooler material on the emplacement of basaltic aa lava flows*. Journal Geophysical Research. 99: 11819-11831.
19. Deaton, B.C., Burkart, B. (1984). *Time of sinistral slip along the Polochic fault of Guatemala*. Tectonophysics. 102: 297-313.
20. De Cserna, Z., Aranda-Gómez, J.J., Mitre-Salazar, L.M. (1988). *Mapa fotogeológico preliminar y secciones estructurales del volcán Tacaná con Resumen de la historia eruptiva del volcán Tacaná, México y Guatemala*. Instituto de Geología, UNAM. Cartas geológicas y mineras. no.7.
21. De la Cruz, M.V., Hernández, Z.R. (1985). *Estudio geológico a semidetalle de la zona geotérmica del volcán Tacaná, Chiapas*. Comisión Federal de Electricidad. Reporte interno. 41/85; 28p.
22. De la Cruz Reyna, S. (1986a). *Tacaná (México/Guatemala): Local seismicity continues*. SEAN Bull., 11, 2: 4-5
23. De la Cruz Reyna, S. (1986b). *Tacaná (México): Earthquake swarm then small phreatic eruption*. SEAN Bull., 11: 4-14.
24. De la Cruz-Reyna, S., Armienta, M.A., Zamora, V., Juárez, F. (1989). *Chemical changes in spring waters at Tacaná volcano, Chiapas, México: A possible precursor of the May 1986 seismic crisis and phreatic explosion*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 38: 345-353.

25. Dollfus, A., Monserrat, E. (1867). *Archives de la Comission Scientifique du Mexique, Ministère de L'Instruction Publique*. El Renacimiento. 1: 451-457.
26. Donnelly, T.W., Horne, G.S., Finch, R.C., López-Ramos, E. (1990). *Northern Central America: The Maya and Chortís blocks, The Caribbean region: Boulder, Colorado*. G. Dengo and J.E. Case. Geological Society of America. H: 37-76.
27. Dragoni, M. (1989). *A dynamical model of lava flows cooling by radiation*. Bulletin of volcanology. 51: 88-95.
28. Duffield, W.A., Bacon, C.R., Rocquemore, G.R. (1982), *Huge landslide blocks in the growth of Piton de la Fournaise, La Reunion, and Kilauea volcano, Hawaii*, Journal of Volcanology and Geothermal Research. 12: 147-160.
29. Espíndola, J.M., Medina, F.M., De Los Ríos, M. (1989). *A C-14 age determination in the Tacaná volcano (Chiapas, México)*. Geofísica Internacional. 28: 121-128.
30. Espíndola, J.M., Macías, J.L., Sheridan, M.F. (1993). *El volcán Tacaná: Un ejemplo de los problemas de evaluación del riesgo volcánico*. En: Actas del Simposio Internacional sobre Riesgos Naturales e Inducidos en los Grandes Centros Urbanos de América Latina: Serie Scienza, 5: 62-71.
31. Espíndola, J.M., Macías, J.L., Tilling, R.I., Sheridan, M.F. (2000), *Volcanic history of El Chichón Volcano (Chiapas, Mexico) during the Holocene, and its impact on human activity*. Bull Volcanol. 62: 90-104.
32. Fink, J.H., Anderson, S.W. (2000). *Lava domes and coulees*. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., Stix, J. (eds) Encyclopedia of volcanoes. Academic Prees, San Diego, 291-305.
33. García-Palomo, A., Macías, J.L., Espíndola, J.M. (2004), *Strike-slip faults and Kalkaline volcanism at El Chichón volcano, southeastern Mexico*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 136: 247-268.
34. García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Mora, J.C., Hughes, S., Saucedo, R., Espíndola, J.M., Escobar, R., Layer, P. (2006). *Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala*. Volcanic Hazards in Central America. W. I. Rose, GSA Special Paper. 412: 39-58.
35. Gregg C.E., Houghton B.F., Johnston D.M, Paton D., Swanson D.A. (2003). *The perception of volcanic risk in Kona communities from Mauna Loa and Hualalai volcanoes, Hawaii*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1-18.

36. Guest, J.E., Wood, C., Greeley, R. (1984). *Lava tubes, terraces and megatumuli on the 1614-24 Pahoehoe lava flow field, Mount Etna, Sicily*. Bulletin of Volcanology. 47: 635-648.
37. Guest, J.E., Kilburn, C.R.J., Pinkerton, H., Duncan, A.M. (1987). *The evolution of lava flow fields: observations of the 1981 and 1983 eruptions of Mount Etna, Sicily*. Bulletin Volcanologique. 49: 527-540.
38. Guest, J.E., Spudis, P.D., Greeley, R., Taylor, G.J., Baloga, S.M. (1995). *Emplacement of xenoliths nodules in the Kaupulehu lava flow, Hualalai Volcano, Hawaii*. Bulletin of Volcanology. 57:179-184.
39. Gutiérrez, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson, Prentice Hall. 898p
40. Guzmán-Speziale, M., Pennington, W.D., Matumoto, T. (1989). *The triple junction of the North America, Cocos, and Caribbean Plates: Seismicity and tectonics*. Tectonics. 8: 981-997.
41. Harlow, G.E., Hemming, S.R., Avé Lallemand, H.G., Sisson, V.B., Sorensen, S.S. (2004). *Two high-pressure-low-temperature serpentinite-matrix mélange belts, Motagua fault zone, Guatemala; A record of Aptian and Maestrichtian collisions*. Geology. 32: 17-20.
42. Harris, A.J.L., Flynn, L.P. Keszthelyi, I., Mougini-Mark, P.J., Rowland, S.K., Resing, J.A. (1998). *Calculation of lava effusion rates from Landsat TM data*. Bulletin of Volcanology. 60: 52-71.
43. Harris, A.J.L., Murray, J.B., Aries, S.E, Davies, M.A, Flynn, L.P. Wooster, M.J., Wrigth, R., Rothery, D.A. (2000). *Effusion rate trends at Etna and Krafla and their implacations for eruptive mechanisms*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 102: 237-270.
44. Harris J.L., Dehn, J., Calvari, S. (2007). *Lava effusion rate and measurement: a review*. Bulletin of Volcanology. 70: 1-22.
45. Hulme, G., Fielder, G. (1977). *Effusion rates and rheology of lunar lavas*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A285, 227-234.
46. Humboldt, A. (1862). *Cosmos; a sketch of the physical description of the universe*. London, H. G. Bohn. 4, 575p
47. Irvine, T.N., Baragar, W.R.A. (1971). *A guide to the chemical classification of the common rocks*. Canadian Journal of Earth Sciences. 8: 523-548.

48. Kilburn, C.R.J. (2000). *Lava flows and flow fields*. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., Stix, J. (eds) *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego, 291-305.
49. Kilburn, C.R.J., Lopes, R.M.C. (1988). *The growth of aa lava flow fields on Mount Etna, Sicily*. *Journal Geophysical Research*. 93: 14759-14772.
50. Kilburn, C.R.J., Lopes, R. (1991). *General patterns of flow field growth: Aa and blocky lavas*. *Journal of Geophysical Research*. 96: 19721-19732.
51. Kilburn C.R.J., Pinkerton, H., Wilson, L. (1995). *Forecasting the behavior of lava flows*. In McGuire, B., Kilburn, C.R.J., Murray, J. (eds) *Monitoring active volcanoes*. UCL. London, 346-368.
52. Limón, C., Macías J.L. (2008). *Volcanic hazards and risk perception at the "Zoque" community of Chapultenango: El Chichón volcano, Chiapas, Mexico*. *Geofísica Internacional, UNAM*, 48 (1) 2009.
53. Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, R. (1986). *A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram*. *Journal of Petrology* 27: 745-750.
54. Lopes, R.M.C., Guest, J.E. (1982). *Lava flows on Etna, a morphometric study*. In *The comparative study of the planets*. (eds A. Coradini and M. Fulchignoni), 441-458. Hingham, Mass.: Reidel.
55. Lozano, R., Surendra, P., Verma, P., Girón, P., Velasco, F., Morán, D., Viera, F., Chávez, G. (1995). *Calibración preliminar de fluorescencia de rayos-X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas*. *Actas INAGEQ*. 1: 1-6.
56. Lugo, J. (1991). *Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos)*. Instituto de Geografía. UNAM.
57. Lugo, J., Inbar, M. (2002). *Desastres Naturales en América Latina*. Edi. Fondo de Cultura Económica, México. pp 9-33.
58. Malin, M.C. (1980). *Lengths of Hawaiian lava flows*. *Geology*. 8: 306-308.
59. Macías, J.L., Espíndola, J.M., García-Palomo, A., Scott, K.M., Hughes, S., Mora, J. C. (2000). *Late Holocene Peléan-style eruption at Tacaná volcano, Mexico and Guatemala: Past, present, and future hazards*. *Bulletin of the Geological Society of America*. 112 (8), 1234-1249.

60. Macías, J.L., Arce, J.L., Mora, J.C., García-Palomo, A. (2004). *The Agua Caliente Debris Avalanche deposit: A NW sector collapse of Tacaná volcano, México-Guatemala*. IAVCEI General Assembly. Pucón, Chile. S11a-0-03.
61. Macías, J.L. (2005). *Geología e historia de algunos de los grandes volcanes activos de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII. 3: 379-424.
62. Macías, J.L., Capra, L. (2005). *Los volcanes y sus amenazas. La ciencia para todos*. No.210; Fondo de Cultura Económica, México, D.F.: 159 p.
63. Macías, J.L., Arce, J.L., García-Palomo, A., Mora, J.C., Layer, P.W, Espíndola, J.M. (2010). Late-Pleistocene flank collapse triggered by dome growth at Tacaná volcano, México-Guatemala, and relationship to the regional stress regime. *Bulletin of Volcanology*. 72: 33-53.
64. Mattox. T.N., Heliker, C., Kauahikaua, J., Hon, K. (1993). *Development of the 1990 Kalapana flow field, Kilauea Volcano, Hawaii*. *Bulletin of volcanology*. 55, 407-413.
65. Medina-Martínez, F. (1986). *Análisis de las columnas eruptivas del volcán Chichón, marzo-abril, 1982, Velocidad de salida, presión de la cámara magmática y energía cinética asociada*. *Geofísica Internacional*. 25: 233-249.
66. Mercado, R., Rose, W. (1992). *Reconocimiento geológico y evaluación preliminar de peligrosidad del volcán Tacaná, Guatemala-México*. *Geofísica Internacional*. 31: 205-237.
67. Meschede, M., Frisch, W. (1998). *A plate-tectonic model for the Mesozoic and early Cenozoic history of the Caribbean plate*. *Tectonophysics*. 296: 269-291.
68. Mora, J.C., Macías, J.L., García-Palomo, A., Arce, J.L., Espíndola, J.M., Manetti, P., Vaselli, O., Sánchez, J.M. (2004). *Petrology and geochemistry of the Tacaná Volcanic Complex, Mexico-Guatemala: Evidence for the last 40 000 yr of activity*. *Geofísica Internacional* 43 (3): 331-35.
69. Mugica, R. (1987). *Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Chiapas*. Instituto Mexicano del Petróleo. México, C-2009: 47.
70. Müllerried, F.K.G. (1951). *La reciente actividad del volcán de Tacaná, Estado de Chiapas, a fines de 1949 y principios de 1950*. Informe del Instituto de Geología, UNAM. 28p.

71. Murcia-Agudelo, H. (2008). *Depósitos de lahar del Complejo Volcánico Tacaná y depósitos fluviales en el Abanico de Tapachula, Chiapas-México*. México, D.F., UNAM. Tesis de Maestría. 152p.
72. Murcia, H., Macías, J.L. (2009). *Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México*. Revista de Ciencias Geológicas. 26: 1-17.
73. Navarro, C., Gavilanes, J.C., Cortés, A. (2002). Movement and emplacement of lava flows at Volcán Colima, México: November 1998-February 1999. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117, 155-167.
74. Nichols, R.L. (1936). *Flow-units in basalt*. *Journal of geology*.44, 617-630.
75. Ordaz, C.A. (2006). *Reconstrucción de la historia eruptiva del volcán Tacaná; Chiapas, Méx., Durante el Holoceno*. México, D.F., Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Tesis de Licenciatura. 109p.
76. Ortega-Gutiérrez, F., Solari, L.A., Solé, J., Martens, U., Gómez-Tuena, A., Morán-Ical, S., Reyes-Salas, M., Ortega-Obregón, C. (2004). *Polyphase, high-temperature eclogite-facies metamorphism in the Chuacús Complex, central Guatemala: petrology, geochronology, and tectonic implications*. *International Geology Review*. 46: 445-470.
77. Pinkerton, H., Sparks, R.S.J. (1976). *The 1974 sub-terminal lavas, Mount Etna: A case history of the formation of a compound flow field*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1: 167-182.
78. Romano, R., Sturiale, C. (1982). *The historical eruptions of Mt. Etna*. *Memorie della Societa Geologica Italiana*. 23, 75-97.
79. Rouwet, D., Taran, Y., Inguaggiato, S., Varley, N. (2004). *Hidrotermal activity at Tacaná volcano, Mexico-Guatemala*. WRI-11, Wanty, Seal II (Eds). Taylor & Francis Group, London, 173-176.
80. Rowland, S.K., Walker, G.P.L. (1990). *Pahoehoe and aa in Hawaii. Volumetric flow rate controls the lava structure*. *Bulletin Volcanologie*. 52, 615-628.
81. Schminke, H.W. (2004). *Volcanism*. Springer, Berlín, 324 p.
82. Sapper, K. (1896). *La geografía física y la geografía de la Península de Yucatán*. Instituto Geológico de México. no.3, 58p.

83. Sapper, K. (1899). *Ueper Gebirgsbau und Boden des noerdlichen Mittelamerika*. Petermanns Geographische Mitteilungen 127, 119p.
84. Sapper, K. (1927). *Vulkankunde*. J. Engelhorn's Nachf. Stuttgart.
85. Saucedo, R., Esquivias, H. (1988). *Evaluación del riesgo volcánico en el área del Volcán Tacaná*. México, Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Tesis de Licenciatura. 142p.
86. Stoiber, R.E., Carr, M.J. (1973). *Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America*. Bulletin of Volcanologie. 37: 304-325.
87. Tilling, R. I. (1993). *Los peligros volcánicos*. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, California, EE.UU.
88. Verma P.S., Lozano-Santa Cruz, R., Girón-García, P., Velasco, F. (1996). *Calibración preliminar de fluorescencia de rayos-X para análisis cuantitativo de elementos traza en rocas ígneas*. Actas INAGEQ, 2: 237-242p.
89. Wadge, G., Walker, G.P.L., Guest, J.E. (1975). *The output of the Etna volcano*. Nature. 255: 385-387.
90. Wadge, G. (1977). *The storage and realase of magma on Mount Etna*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2: 361-384.
91. Wadge, G. (1978). *Effusion rate and the shape of aa lava flow fields on Mount Etna*. Geology 6: 503-506.
92. Wadge, G. (1981). *The variation of magma discharge during basaltic eruptions*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 11: 139-168.
93. Wadge, G. (1983). *The magma budget of Volcan Arenal, Costa Rica from 1968 to 1980*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 19: 281-302.
94. Walker, G.L.P. (1973). *Lengths of lava flows*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A274: 107-118.
95. Walker, G.P.L. (1991). *Structure and origin by injection of lava under surface crust, of tumuli, "lava rises", "lava-rise pits" and "lava inflation clefts" in Hawaii*. Bulletin of Volcanology. 53: 546-558.
96. Weber, B., Gruner B., Hecht L. (2002). *EL descubrimiento de basamento metasedimentario en el macizo de Chiapas: la "Unidad La Sepultura"*. GEOS. 22: 1 p. (PA: 3392).

97. Wilcox, R. (1954). *Petrology of Paricutin Volcano*, México. U.S. Geological Survey Bulletin. 65-C: 281-354.
98. Wilson, M. (1989). *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, London. 466.