



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

LA IGNIMBRITA SAN MIGUEL CAÑADAS,
TEPOTZOTLAN, ESTADO DE MEXICO, Y SU
RELACION CON LA CALDERA LA MUERTA.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

PRESENTA:

ISAAC GUTIERREZ PALOMARES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GERARDO DE JESUS AGUIRRE DIAZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D.F., 2005

m. 344015



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-307

SR. ISAAC GUTIÉRREZ PALOMARES
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Gerardo de Jesús Aguirre Díaz y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**LA IGNIMBRITA SAN MIGUEL CAÑADAS, TEPOTZOTLÁN, ESTADO DE MÉXICO, Y
SU RELACIÓN CON LA CALDERA LA MUERTA**

- RESUMEN
- I INTRODUCCIÓN
- II ESTRATIGRAFÍA DE LA PARTE NORTE DE LA SIERRA DE LAS CRUCES
- III EMPLAZAMIENTO DE IGNIMBRITAS
- IV EVOLUCIÓN GEOLÓGICA
- V CONCLUSIONES
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
- ANEXOS

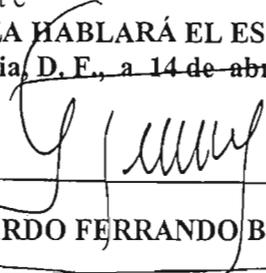
Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 14 de abril de 2005
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*JAGC*gtg

A mis Padres.

*Jorge Gutiérrez Escudero
Ma. de la Paz Palomares Calderón*

y hermanos

*Jorge Gutiérrez Palomares
Jessica Gutiérrez Palomares*

AGRADECIMIENTOS

Manifiesto mi agradecimiento a CONACYT por el apoyo económico otorgado mediante el proyecto CONACYT 33084 T. Así como al Centro de Geociencias, UNAM, campus Juriquilla por el complemento de beca asignado durante la elaboración de este trabajo de tesis.

Asimismo agradezco a mi asesor el Dr. Gerardo de Jesús Aguirre Díaz por haber dirigido este trabajo de tesis y también por todo el apoyo académico y moral que me brindó durante mi estancia en la Ciudad de Querétaro.

Igualmente agradezco la colaboración del Ing. Jorge Nieto Obregón por la ayuda incondicional que me brindó para la culminación de este trabajo, así como por sus observaciones y sugerencias para el mejoramiento de este documento.

También reitero mi gratitud a los Ingenieros Gilberto Silva Romo y Alfredo Victoria Morales, así como al Dr. Jorge Aranda Gómez por sus valiosos comentarios y revisiones hechas para el mejoramiento de esta tesis.

De igual manera agradezco al Centro de Geociencias, UNAM, campus Juriquilla, por las facilidades brindadas con respecto al uso de instalaciones y apoyo del personal técnico, académico y administrativo, en especial, al personal del laboratorio de laminación el Sr. Juan Tomás Vázquez Ramírez (Juanito) y Sr. Crescencio Garduño. También a Moises (el Moi) por su ayuda en el laboratorio de trituración y pulverizado.

Quiero extender mi agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la UNAM ("la dificultad"), así como a todos los profesores que contribuyeron en mi formación académica.

Agradezco de manera especial a mi hermano Jorge por su invaluable ayuda y compañía durante las campañas de campo.

De igual forma, quiero agradecer el apoyo moral de familiares (Papás, hermanos, primos, tíos, etc.) y amigos (tanto de la Fac. como del Centro de Geociencias) que de alguna forma, directa o indirectamente contribuyeron al desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

Finalmente (pero no menos importante) agradezco de manera muy especial, a mi novia Laura Mori por todo el amor, cariño, comprensión y apoyo que me ha brindado desde que estamos juntos, *grazie amore!*

ÍNDICE

Lista de figuras	i
Lista de tablas	iii
Resumen	iv

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	1
I.1 Localización y vías de acceso	1
I.2 Objetivos	3
I.3 Metodología de la investigación	3
I.3.1 Etapa pre-exploratoria	3
I.3.2 Etapa exploratoria	4
I.3.3 Etapa post-exploratoria	4
I.4 Características generales de la FVTM	6
I.5 Estudios previos en el área de estudio	9

CAPÍTULO II

ESTRATIGRAFÍA DE LA PARTE NORTE DE LA SIERRA DE LAS CRUCES	12
II.1 Descripción general del área de estudio	12
II.2 Descripción de unidades litoestratigráficas y estructuras volcánicas principales	18
II.2.1 Domos dacíticos-andesíticos del Plioceno temprano	18
II.2.2 Volcán La Muerta	18
II.2.3 Toba La Rosa	19
II.2.4 Toba San Martín	21
II.2.5 Toba Buenaventura	21
II.2.6 Toba La Loma	23
II.2.7 Ignimbrita San Miguel Cañadas	23
II.2.8 Depósitos de flujos de lodo	33
II.2.9 Depósitos de caída Las Moras	34
II.2.10 Toba Cisneros	34
II.2.11 Domos dacíticos post-colapso	37
II.2.12 Toba La Capilla	37
II.2.13 Toba Villa del Carbón	37

CAPÍTULO III

EMPLAZAMIENTO DE IGNIMBRITAS	43
III.1 Modelos de emplazamiento de ignimbritas	43
III.1.1 Modelo de emplazamiento de ignimbritas de R. S. J. Sparks et al. (1973)	46
III.1.2 Modelo de emplazamiento de ignimbritas de Michael J. Branney y Peter Kokelaar (1992)	51
III.2 Comparación entre los modelos de emplazamiento de ignimbritas con la ignimbrita San Miguel Cañadas	55

CAPÍTULO IV

EVOLUCIÓN GEOLÓGICA	58
IV.1 Formación de la caldera La Muerta	58
IV.2 Emplazamiento de la ignimbrita San Miguel Cañadas	60
IV.3 Correlación estratigráfica de la ignimbrita SMC y su posición con respecto a depósitos de la misma fuente, y de otras fuentes cercanas	61

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO 1 Ubicación geográfica de las muestras de roca recolectadas en campo	71
ANEXO 2 Localización geográfica de las secciones estratigráficas levantadas en campo	77
ANEXO 3 Mapa geológico	79

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
Fig 1.- Mapa de localización regional del área de estudio (modificado de Aguirre-Díaz,1996).	1
Fig. 2.- Localización del área de estudio en la parte Norte de la Sierra de las Cruces.	2
Fig. 3.- Mapa índice de la zona norte de la Sierra de Las Cruces que muestra la topografía de la zona e indica la localización de las muestras colectadas y de las secciones estratigráficas. También se muestra parte del margen topográfico de la caldera La Muerta.	11
Fig. 4.- Vista hacia el Este de la caldera La Muerta desde las facies proximales de la ignimbrita San Miguel Cañadas.	13
Fig. 5.- Mapa preliminar donde se muestran las unidades geológicas, así como la ubicación de las secciones estratigráficas.	14
Fig. 6.- Leyenda del mapa preliminar donde se presenta la edad relativa de las unidades cartografiadas.	15
Fig. 7.- Columna estratigráfica compuesta para el área de estudio. Se muestra la posición estratigráfica de la ignimbrita San Miguel Cañadas respecto a otros depósitos piroclásticos de la misma fuente y de otras fuentes cercanas.....	16
Fig. 8.- Sección Estratigráfica La Rosa (S28) con espesor total de 55.3 m. Coordenadas UTM: 454731, 2179844.	20
Fig. 9.- Sección estratigráfica Buenaventura (S10) con espesor total de 66.8 m. Coordenadas UTM: 464702, 2191872.	22
Fig. 10.- Sección estratigráfica La Loma 1 (S7) con espesor total de 86.9 m. Coordenadas UTM: 462802, 2190871.	24
Fig. 11.- Frente del depósito de la ignimbrita San Miguel Cañadas a 9 km al NW de la fuente. Coordenadas UTM: 14Q 0462358, 2189806.	27
Fig. 12.- Sección Estratigráfica San Miguel Cañadas (S4) con espesor total de 54.2 m. Coordenadas UTM: 463144, 2181150.	28
Fig. 13.- Gráfica que muestra el porcentaje de líticos respecto a la altura medida desde la base de dos secciones estratigráficas de la ignimbrita SMC.	29

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
Fig. 14.- Fragmentos de lavas dacíticas rojas y grises en la ignimbrita San Miguel Cañadas, sección El Gavillero (S3)	30
Fig. 15.- Fragmento de lava porfídica dacítica de 1.5 m de diámetro en la ignimbrita San Miguel Cañadas, sección El Gavillero (S3).	30
Fig. 16.- Fragmento de pómez de 35 cm de diámetro en la ignimbrita San Miguel Cañadas, sección Los Dolores (S2).	31
Fig. 17.- Sección estratigráfica La Loma 2 (S8) con espesor total de 91.9 m. Coordenadas UTM: 463067, 2187738.	32
Fig. 18.- Depósito de avalancha de bloques de lava dacítica gris, con estructura de rompecabezas, que forma parte de la ignimbrita San Miguel Cañadas	33
Fig. 19.- .- Sección estratigráfica Cisneros (S26) con espesor total de 15.2 m. Coordenadas UTM: 462719, 2178773.	35
Fig. 20.- Sección estratigráfica El Gavillero (S3) con espesor total de 31.4 m. Coordenadas UTM: 460543, 2178045.	36
Fig. 21.- Sección estratigráfica La Capilla (S19) con espesor total de 43.9 m. Coordenadas UTM: 445552, 2181452.	38
Fig. 22.- Sección estratigráfica Los Domínguez (S27) con espesor total de 45 m. Coordenadas UTM: 448916, 2181986.	40
Fig. 23.- Depósito de flujo de bloques y cenizas, el cual pertenece a la toba Villa del carbón, sección El Plan (S17) coordenadas UTM: 14Q 451198, 2179911	41
Fig. 24.- Sección Estratigráfica Loma Mondo (S21) con espesor total de 14.5 m. Coordenadas UTM: 447134, 2177323.	42
Fig.25.- Diagrama esquemático de una erupción Pliniana de un volcán compuesto, mostrando la zona de empuje de gas y convectiva de la columna eruptiva. La línea de energía (A-A') traza el potencial frente del flujo desde la cima de la zona de empuje de gas a la parte más distal del flujo. El colapso dentro de la zona de empuje de gas podría producir un flujo piroclástico compuesto de una avalancha densa y una nube cabalgante más diluida. El flujo piroclástico puede sobrepasar barreras topográficas que no se encuentren más allá de la línea de energía. (Sheridan, 1979).	45

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
Fig. 26.- Sección esquemática que muestra los productos de una fase Peleana, donde se muestra la unidad de flujo de la ignimbrita con las capas 2a y 2b, subyaciendo se encuentra el depósito de surge basal (capa 1), y el depósito de ceniza fina sobreyacente (capa 3); P= clastos de pómez, L= clastos líticos. (Sparks et al, 1973).	47
Fig. 27.- Dos tipos de agradación en un flujo. (Branney et al., 1992).	54
Fig. 28.- Depósito de surge; este se presenta en la base de la ignimbrita San Miguel Cañadas, a 4 km al W de la fuente.	56
Fig. 29.- Croquis que muestra la evolución volcánica de la caldera La Muerta.	59
Fig. 30.-Correlación estratigráfica de la Ignimbrita San Miguel Cañadas.	62

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
Tabla 1.- Espesor del <i>surge</i> basal relacionado a la ignimbrita San Miguel Cañadas.	55

RESUMEN

La ignimbrita San Miguel Cañadas (SMC) está asociada a la formación de la caldera La Muerta, la cual se localiza junto a Tepozotlán, Edo. de México, a 40 km del centro de la Cd. de México. La caldera es una de varias estructuras volcánicas con evidencia de colapso lateral que se encuentran en la parte norte de la Sierra de las Cruces. La ignimbrita SMC se encuentra principalmente al WNW de la caldera La Muerta, cubre un área aproximada de 264 km² y tiene un volumen físico estimado en 6.3 km³. Catorce secciones estratigráficas medidas indican un espesor máximo de 61 m en las facies proximales y de 25 m en las partes más distales, a 17 km al W de la fuente, donde la unidad está desplazada por una falla normal orientada al NE que la pone en contacto tectónico con depósitos piroclásticos más recientes provenientes de otras fuentes. En las facies distales al NNW, a 9 km de la fuente, presenta espesores de 20 m, el cual parece ser el espesor del frente del depósito. La ignimbrita SMC es probablemente del Plioceno tardío (fechamiento en proceso).

La ignimbrita SMC se caracteriza por un abundante contenido de líticos, con los siguientes valores: 13-37 vol.% de líticos de lavas, 2-3 vol.% de clastos de pómez, y 62-84 vol. % de matriz pumítica. Los líticos son predominantemente de lavas de composición intermedia, con textura porfirítica rica en fenocristales de plagioclasa, gris oscuro a gris claro, o rojizos, con bandeamiento de flujo, y tamaños desde 2 mm hasta bloques de 1.5 m. Los fragmentos de pómez son subangulosos, blancos, con tamaños de 1 a 30 cm, y con fenocristales de sanidino y hornblenda euhedral. En algunos sitios se observa que los clastos de pómez aumentan en proporción hacia la cima en relación con los líticos, los cuales son más abundantes hacia la base. La matriz es poco cohesiva y esta compuesta principalmente por ceniza de vidrio, y fragmentos de cristales de cuarzo, sanidino y hornblenda. En general, la ignimbrita es café claro a amarilla a la intemperie y gris claro al fresco.

Por su distribución y características físicas, la ignimbrita SMC aparentemente se formó durante el colapso hacia el oeste del volcán La Muerta, dejando en éste una amplia cicatriz con forma de herradura abierta hacia el W, que marca la traza de la caldera La Muerta. Posterior al colapso, se emplazaron algunos domos de composición intermedia en el anillo y dentro de la caldera.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Localización y vías de acceso

El área de estudio se sitúa en el sector central de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), entre las coordenadas 19° 35' y 19° 55' latitud Norte, 99° 10' y 99° 35' longitud Oeste (Fig. 1); en la parte norte de la Sierra de las Cruces (SC) (Fig.2), la cual es una cadena volcánica con orientación NNW que constituye el límite orográfico entre la cuenca de México y el valle de Toluca. El área de estudio se ubica entre los límites estatales de Hidalgo y Estado de México. Existen dos vías de acceso principales a la zona, una desde la ciudad de México, por la carretera federal rumbo a Villa del Carbón, y la segunda por la autopista México-Querétaro, hasta Tepeji del Río.

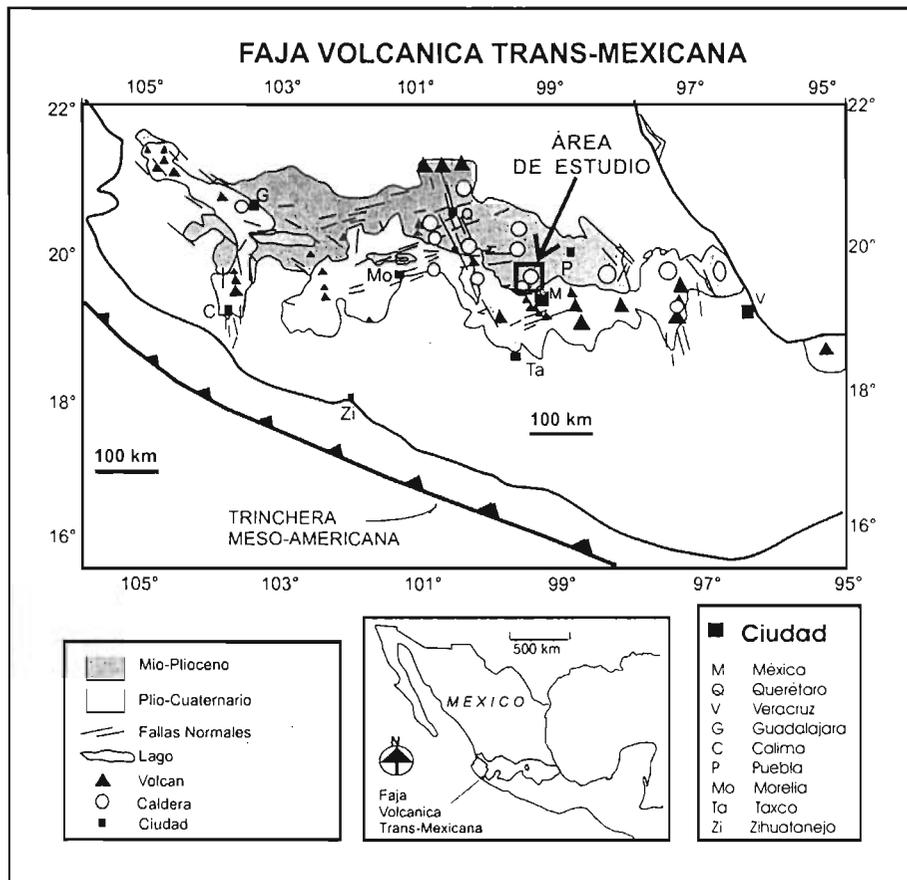


Fig. 1.- Mapa de localización regional del área de estudio (modificado de Aguirre-Díaz, 1996).

Una de las principales estructuras en este estudio es la caldera La Muerta, la cual es una de varias estructuras volcánicas con evidencia de colapso lateral que se encuentran en la parte norte de la Sierra de las Cruces (Carrasco-Hernández, 1999). La caldera La Muerta se ubica justo al norte de Tepetzotlán, Edo. de México, aproximadamente a 40 km del centro del Distrito Federal, y sólo a unos 5 km del límite de la zona urbana de la ciudad de México (Cuautitlán) (Fig. 3).

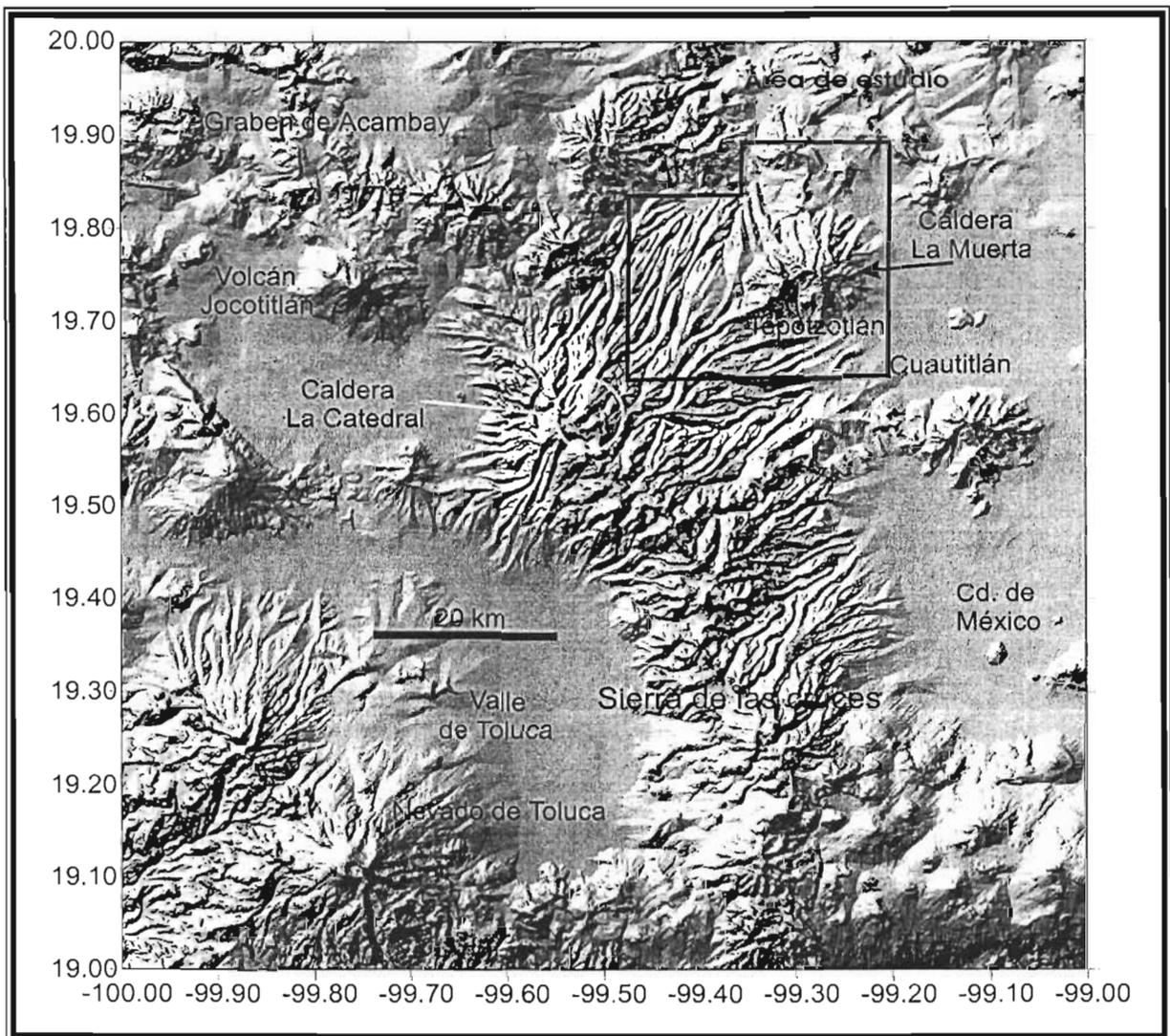


Fig. 2.- Localización del área de estudio en la parte Norte de la Sierra de las Cruces.

I.2 Objetivos

- a) Cartografía geológica en la parte norte de la Sierra de las Cruces con base en la interpretación de fotografías aéreas y verificación directa de campo.
- b) Descripción y clasificación de unidades litológicas con base a la descripción de campo y petrografía.
- c) Determinar la distribución de las unidades estratigráficas mediante columnas estratigráficas y correlacionando unidades índice.
- d) Inferir la fuente que dio origen a las unidades cartografiadas.

I.3 Metodología de la investigación

El desarrollo del trabajo se dividió en tres etapas:

- Etapa pre-exploratoria
- Etapa exploratoria
- Etapa post-exploratoria

a continuación se describen cada una de éstas.

I.3.1 Etapa pre-exploratoria.

Esta etapa consistió en la recopilación de antecedentes bibliográficos, así como información que aporte datos geológicos de interés para el área de estudio y las áreas adyacentes. Esta recopilación es importante ya que de esta forma se evita repetir informes ya elaborados y se enfoca la investigación hacia aspectos mas detallados.

Se realizó la interpretación de fotografías aéreas a escala 1:75,000 identificándose contactos geológicos y estructuras geológicas mayores, tales como volcanes, domos y fallas. Esto permitió una mejor planeación de las campañas de campo, así como la

elaboración de rutas a seguir para la verificación o rectificación de los contactos antes marcados.

Realización de un mapa fotogeológico preliminar, el cual se elaboró sobre parte de las cartas topográficas de INEGI escala 1:50,000 de Tepeji del Río de Ocampo (E14A18), Villa del Carbón (E14A28), Zumpango de Ocampo (E14A19) y Cuautitlán (E14A29).

I.3.2 Etapa exploratoria.

Se realizaron varias campañas de campo durante las cuales se realizó levantamiento geológico. La exploración de campo se basó en la elaboración de un mapa geológico tomando en cuenta los siguientes puntos:

- Identificación y descripción de unidades litoestratigráficas.
- Muestreo sistemático de cada unidad litoestratigráfica para los diversos análisis planeados.
- Verificación y definición de la extensión de las unidades y estructuras geológicas propuestas.
- Reconocimiento de cuerpos rocosos singulares para una posterior correlación de unidades a escala regional.
- Medición de columnas estratigráficas con cinta métrica así como la descripción de cada una de las unidades propuestas.

I.3.3 Etapa post-exploratoria.

En esta etapa se integró toda la información recolectada en las etapas pre-exploratoria y de campo para realizar la interpretación geológica de la zona de estudio. Se realizó una selección de muestras de roca recolectadas para estudios petrográficos, así como para análisis químicos de elementos mayores y fechamientos que se realizarán en un futuro. Debido a que el tiempo de los análisis para fechamientos son muy tardados y van mas allá del tiempo de elaboración de esta tesis, no se incluirán en las conclusiones.

Esta etapa se puede dividir en dos grupos: trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete.

Trabajo de laboratorio.

Los trabajos de laboratorio consistieron en la elaboración de láminas delgadas y estudios petrográficos en lámina delgada. Para la elaboración de las láminas delgadas se seleccionaron las muestras y se hicieron almohadillas de muestras de roca, posteriormente se llevaron al laboratorio de laminación para este proceso, la realización de las láminas delgadas estuvo a cargo del personal del laboratorio de laminación del Centro de Geociencias, UNAM, campus Juriquilla, el Sr. Juan Tomás Vázquez Ramírez y Sr. Crescencio Garduño Paz. El análisis petrográfico consistió en la descripción macroscópica de las muestras, así como de su descripción microscópica con ayuda de un microscopio petrográfico, clasificando a las rocas de acuerdo a sus características físicas y contenido mineral.

Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete consistió en el procesamiento de los datos geológicos dando énfasis a los siguientes puntos:

- Descripción petrográfica de cada unidad litoestratigráfica. Se observaron las diferentes muestras tomadas en campo y se estudiaron en el microscopio petrográfico sus características físicas, tales como textura, fábrica, mineralogía y estimación visual de componentes.

- Se elaboraron columnas estratigráficas y se correlacionaron las unidades índice a nivel regional; esto permitió establecer la extensión de las unidades y en algunos casos, calcular el área que cubren y con la ayuda de los mapas topográficos hacer una estimación de su volumen.

- Elaboración del mapa geológico. El mapa geológico se hizo sobre parte de las cartas topográficas publicadas por INEGI escala 1:50,000 de Tepeji del Río de Ocampo (E14A18), Villa del Carbón (E14A28), Zumpango de Ocampo (E14A19) y Cuautitlán (E14A29). Posteriormente se digitalizó el mapa con ayuda del programa Arc View GIS y una tableta digitizadora. El mapa geológico se encuentra georeferenciado al elipsoide de Clarke 1866, en proyección UTM (Universal Transversa de Mercator), Datum horizontal NAD 27, referencia de cotas al nivel del mar, con una declinación magnética de 7° 30'.
- Por último se procedió a la redacción del reporte de tesis conjuntando todos los datos obtenidos en campo así como los datos de laboratorio y gabinete.

I.4 Características generales de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM).

La Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM; Fig. 1) es una cadena montañosa compuesta por acumulaciones de lavas y materiales piroclásticos, así como de rocas de origen lacustre del Mioceno al Cuaternario (Demant, 1978; Aguirre et al., 1998; Ferrari et al., 1999). La FVTM presenta una longitud cercana a 1000 km y una anchura entre 50 y 300 km (Nixon et al., 1987; Carrasco y Gómez, 1997). Está conformada por más de 8000 estructuras volcánicas individuales (Robin, 1982), incluyendo grandes estratovolcanes, calderas, domos, y campos volcánicos monogenéticos. Varios de los grandes estratovolcanes (e.g., Ceboruco, Colima, Popocatepetl, y Citlaltépetl) han sido históricamente activos.

La FVTM se interpreta como un arco magmático continental activo relacionado a la subducción de la placa de Cocos y la placa de Rivera bajo la placa Norteamericana a lo largo de la trinchera mesoamericana, que se extiende desde la costa del Pacífico (San Blas-Nayarit, Bahía de Banderas-Jalisco) hasta la costa del Atlántico (Palma Sola-Veracruz) (Nixon et al., 1987; Aguirre et al., 1998). Se desarrolla según una dirección preferencial W-E formando un ángulo cercano a los 16° con la Trinchera Mesoamericana (Urrutia y Del Castillo, 1977; Pardo y Suárez, 1995). La ausencia de paralelismo entre el arco y la

trinchera, así como la configuración general de la FVTM, están probablemente relacionados con la geometría del sistema en subducción, en particular con la variación del ángulo de subducción de las placas oceánicas Cocos y Rivera bajo de la placa de América del Norte (Demant, 1978; Johnson y Harrison, 1990; Siebe et al., 1995; Suter et al., 1995; Aguirre et al., 1998).

El espectro petrológico de la FVTM está dominado por productos calcialcalinos de arco volcánico con composición variable desde basalto hasta riolita, siendo la mayoría de las rocas de composición andesítica y dacítica (Aguilar-Vargas y Verma, 1987 ; Moore et al., 1994).

El intervalo de tiempo en el que se formó la FVTM comienza desde el Mioceno medio y la mayor parte de las erupciones sucedieron durante el Plioceno hasta el Cuaternario (Nixon et al., 1987, Ferrari et al., 1999).

De acuerdo con Aguirre et al. (1998), la FVTM está dividida en tres zonas con diferentes rasgos tectónicos, vulcanológicos y petrológicos.

El sector Oeste está caracterizado por la unión triple Colima-Chapala-Zacoalco, donde el vulcanismo del tipo alcalino es común aunque predomina el calco-alcalino.

El sector central contiene vulcanismo poligenético y monogenético que en conjunto forman una cadena volcánica de orientación Este-Oeste, donde el vulcanismo de carácter calco-alcalino es el dominante.

El sector Este está caracterizado por grandes estratovolcanes andesítico-dacíticos con vulcanismo del tipo calco-alcalino, además de vulcanismo monogenético alcalino en la región de Los Tuxtlas.

En la parte Oeste de la FVTM se ha inferido que la zona de Benioff presenta un ángulo de subducción muy elevado en el sector de la placa Rivera; mientras que en la región central

de la FVTM la zona de Benioff es subhorizontal, con un ángulo de subducción de entre 12° a 15° en el sector correspondiente a la placa de Cocos (Suárez et al., 1990; Singh y Pardo, 1993; Pardo y Suárez, 1995).

Se han propuesto varias hipótesis que tratan de explicar el origen de la FVTM. En general se dividen en dos grupos, las relacionadas a la subducción y las relacionadas a una zona de debilidad de la corteza continental.

Von Humboldt (1808) fue el primero en proponer una explicación para esta alineación de volcanes, en términos de una fractura que atravesaba el continente a lo largo de la latitud 19° N desde el océano Atlántico al océano Pacífico. Él creyó que las islas volcánicas Revillagigedo en el Pacífico oriental, aproximadamente a 800 km al oeste de Puerto Vallarta, pertenecían a una extensión de la misma fractura. El modelo de la fractura cortical ha tenido varios seguidores desde entonces (e.g., Mooser y Maldonado, 1961; Mooser, 1969). Una zona de fractura de edad Permo-Triásica, llamada la Zona de Fractura de México, fue propuesta por debajo de la FVTM (De Cserna, 1971). Cuando la Zona de Fractura Clarion fue descubierta en el Pacífico nororiental (Menard, 1955), el modelo de una Zona de Fractura fue más aceptado, debido a que la FVTM parecía ser una extensión continental de esta estructura oceánica.

Después, con el desarrollo de la tectónica de placas, la FVTM fue interpretada por muchos investigadores como un arco magmático típico relacionado a la subducción de las placas de Cocos y Rivera por debajo de la placa norteamericana (Demant, 1978; Urrutia-Fucugauchi, 1977; Johnson y Harrison, 1990; Siebe et al., 1995; Suter et al., 1995; Aguirre et al., 1998).

Otros autores como Shubert y Cebull (1984) argumentan, basados en datos sísmicos, que la FVTM actualmente está experimentando un régimen transtensional, no relacionado directamente a la subducción, y está aparentemente en función de un límite entre placas, la placa de Norteamérica al norte y una microplaca en desarrollo (o posiblemente abortada) al sur. Moore et al. (1994) y Márquez et al. (1999) notaron y enfatizaron un volumen considerable de magmatismo alcalino tipo *Oceanic island Basalt* (OIB) que se encuentra a

lo largo de la faja, argumentando de esta forma la incompatibilidad de un origen puramente de subducción. Estos autores explican el volcanismo tipo-OIB mediante la teoría de que existe una pluma del manto por debajo del área de Guadalajara en la parte occidental de la FVTM. Sheth et al., (2000) propusieron que la FVTM es una estructura de tipo rift que está sufriendo una deformación activa.

I.5 Estudios previos en el área de estudio

La zona norte de la Sierra de las Cruces ha sido poco estudiada, y sólo se tiene una cartografía geológica a nivel regional hecha por Mooser et al. (1996). En particular, la caldera La Muerta no había sido estudiada, a excepción de reportes de Aguirre-Díaz en resúmenes (Aguirre-Díaz, 2001; 2004a, 2004b). Existen otros trabajos donde se menciona el área de estudio realizados por Lindsay et al. (1984), Mora et al. (1991), Siebe et al. (1992), Carranza y Espinoza (1994), Suter et al. (1995), Macias et al. (1997) y Carrasco-Hernández (1999) quien desarrolló su tesis de licenciatura al norte del área de estudio y publicó varios resúmenes (Aguirre-Díaz y Carrasco-Hernández, 1999; Aguirre-Díaz et al., 1999; Carrasco-Hernández et al., 1999). Todos estos trabajos aportan datos geológicos de las zonas circunvecinas del área en cuestión. A continuación se muestra un resumen de los estudios previos a la presente investigación.

El sector septentrional de la Sierra de las Cruces es considerado como un complejo volcánico conformado por calderas con domos y depósitos piroclásticos asociados (Mooser et al., 1996; Aguirre-Díaz et al., 1997; Aguirre-Díaz et al., 1998; Aguirre-Díaz, 2003a; 2003b; 2004a). Las tobas retrabajadas y depósitos fluvio-lacustres del área fueron definidos como parte de la formación Tarango (Mooser et al., 1996).

Los estudios geocronológicos realizados empleando el método de K-Ar en rocas volcánicas de la Sierra de las Cruces, sugieren una migración aparente espacio-temporal de Norte a Sur de la actividad volcánica durante un intervalo de edad Plioceno-Pleistoceno (Mora et al., 1991).

A 40 km hacia el NE del embalse Trinidad Fabela y justo en el corte de la autopista México-Querétaro a solo 3 km hacia el SE de la salida hacia Jilotepec, se encuentran una serie de fallas normales con rumbo SW-NE con bloque caído hacia el NW y echados de falla entre 50° a 70° (Carrasco-Hernández, 1999). Se observa una lava gris afanítica (basalto Jilotepec) desplazada por un salto de falla entre 20 a 30 m. Un fechamiento por $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ del basalto Jilotepec determinó una edad de 2.4 ± 0.2 Ma., que implica una edad máxima para esa falla (Suter et al., 1995).

El volcán Jocotitlán (Fig. 2) se caracteriza por el colapso de su flanco NE, y el consecuente depósito de avalancha con morfología de “hummocks” de tamaño excepcional y forma cónica (Siebe et al., 1992; Macías et al., 1997).

En la parte superior de los depósitos lacustres ubicados en los alrededores de la zona de estudio, se han reportado fósiles de los équidos *Dinohippus mexicanus*, *Neohipparion eurystyle* y el carnívoro *Machairodus*, los cuales corresponden a una edad de 4.7 Ma (Lyndsay et al., 1984; Carranza y Espinosa, 1994).

Carrasco-Hernández (1999), Aguirre-Díaz y Carrasco-Hernández (1999) y Aguirre-Díaz et al. (1999) dividieron la parte norte de la Sierra de las Cruces en tres sectores de acuerdo a sus características estratigráficas y estructurales, estos son: Campo Volcánico Sierra de las Cruces Norte (CVSCN), Sector Taxhimay y Sector Poza Honda. El CVSCN esta conformado por tres volcanes de grandes proporciones: El Castillo, El Templo y el Chapa de Mota. Los tres muestran evidencia de haber sido destruidos parcialmente por colapsos sectoriales dirigidos, con sus correspondientes avalanchas de escombros, “hummocks”, lahares y depósitos piroclásticos de edad miocénica. El sector Taxhímay está caracterizado por secuencias piroclásticas, fluvio-lacustres y lahares que rodean al volcán colapsado de Las Animas. En el sector Poza Honda se define de acuerdo al patrón estructural de fallamiento un graben pequeño con rumbo SW 44° NE, cuyo bloque hundido presenta un basculamiento de 10° hacia el NW.

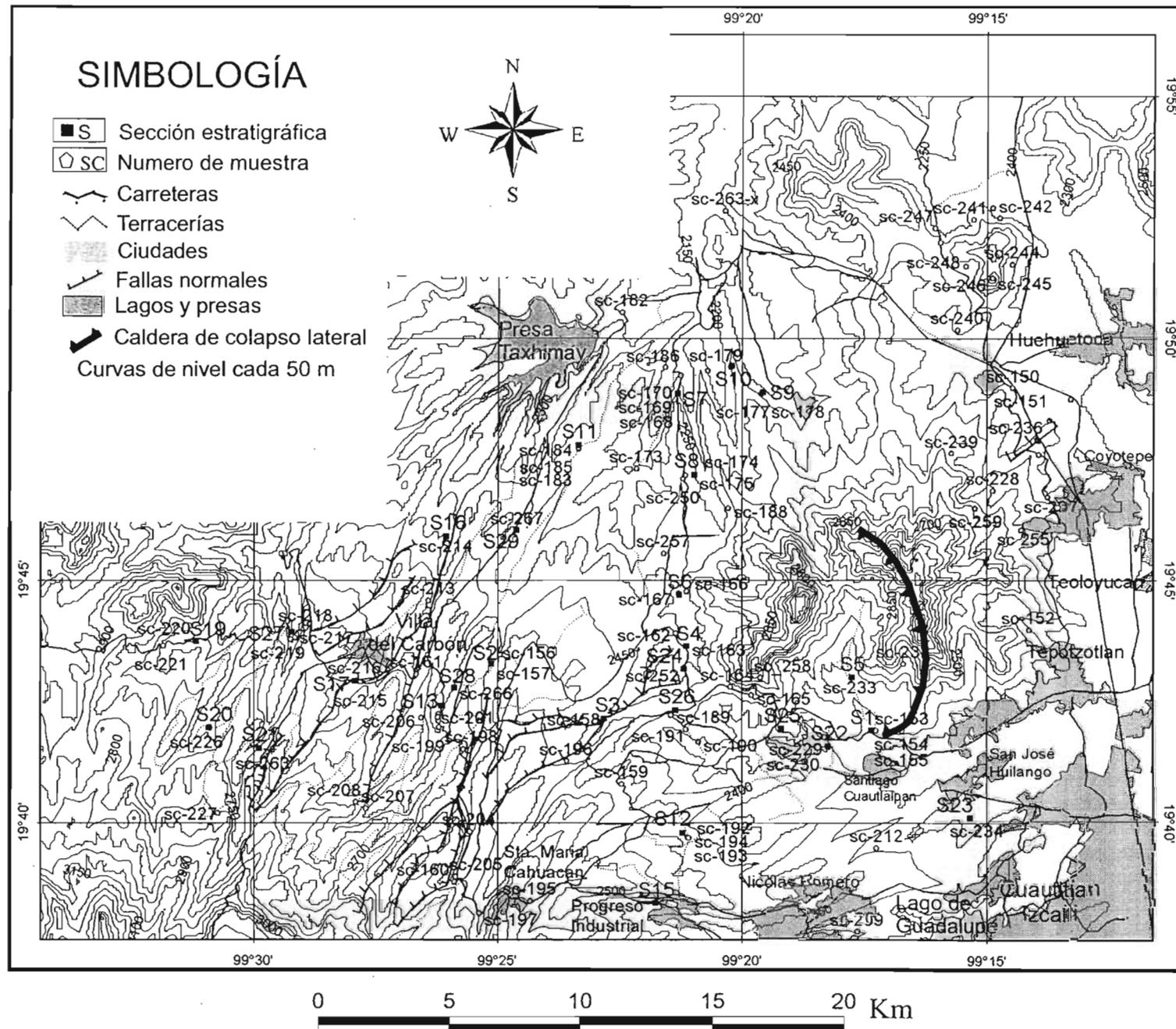


Fig. 3.- Mapa índice de la zona norte de la Sierra de Las Cruces que muestra la topografía de la zona e indica la localización de las muestras colectadas y de las secciones estratigráficas. También se muestra parte del margen topográfico de la caldera La Muerta.

CAPÍTULO II

ESTRATIGRAFÍA DE LA PARTE NORTE DE LA SIERRA DE LAS CRUCES

II.1 Descripción general del área de estudio

En el área de estudio afloran principalmente depósitos de flujos piroclásticos intercalados con depósitos de caída y de flujos de lodo. En algunas zonas se observan intercalaciones con depósitos lacustres. Los depósitos de flujos piroclásticos incluyen depósitos de *surges*, ignimbritas de composición silícica con abundancia de líticos, ignimbritas pumíticas o ricas en cristales, y depósitos de flujos de bloques y ceniza. Los depósitos de caída que se encontraron en la zona de estudio están compuestos por clastos de pómez de tamaños diversos, acumulación de ceniza y unidades ricas en cristales con líticos escasos.

También se encuentran domos y derrames de lava de composición dacítica-andesítica. Los más antiguos pertenecen al volcán La Muerta. La estructura antigua de este volcán está compuesta por varios derrames de lavas de composición andesítica. Es importante señalar la presencia de domos post-caldera, emplazados en la periferia y dentro de la estructura. Estos domos son de composición intermedia, aparentemente andesítica o dacítica.

Al Norte y Este de la caldera La Muerta se encuentran depósitos piroclásticos, depósitos lacustres, derrames de lava y domos de composición intermedia (probablemente dacíticos). Al NW, Oeste, SW y Sur se observan secuencias piroclásticas que contienen ignimbritas ricas en cristales, ignimbritas ricas en líticos, depósitos de caída de ceniza y lapilli de pómez, depósitos de *surges*, depósitos lacustres, depósitos de flujos de bloques y cenizas, depósitos de avalancha y lahares. Algunas de estas unidades provienen de la caldera La Muerta, pero otros, sobre todo lahares y flujos de bloques y cenizas provienen de la caldera La Catedral, al W de la caldera La Muerta (fig. 2) (Aguirre-Díaz, 2001, 2004a, 2004b). Los espesores mayores de las secuencias piroclásticas se encuentran al NW, W y SW de la caldera La Muerta.



Fig. 4.- Vista hacia el Este de la caldera La Muerta desde las facies proximales de la ignimbrita San Miguel Cañadas.

Una de las unidades litoestratigráficas más importantes en ésta zona es la ignimbrita San Miguel Cañadas (SMC), la cual es un depósito piroclástico de bajo grado (de acuerdo a la clasificación de Walker, 1983; Branney y Kokelaar, 1992) asociado a la formación de la caldera La Muerta (Fig. 4).

Se midieron 30 secciones estratigráficas, de las cuales quince corresponden a la ignimbrita SMC, y el resto a otras unidades distribuidas en el área de estudio (Fig. 5 y 6).

La columna estratigráfica compuesta se muestra en la Fig. 7, donde se puede observar la posición estratigráfica de cada una de las unidades. En el mapa geológico (Anexo 3) se muestran la distribución de las unidades y las estructuras volcánicas mayores, así como su edad relativa.

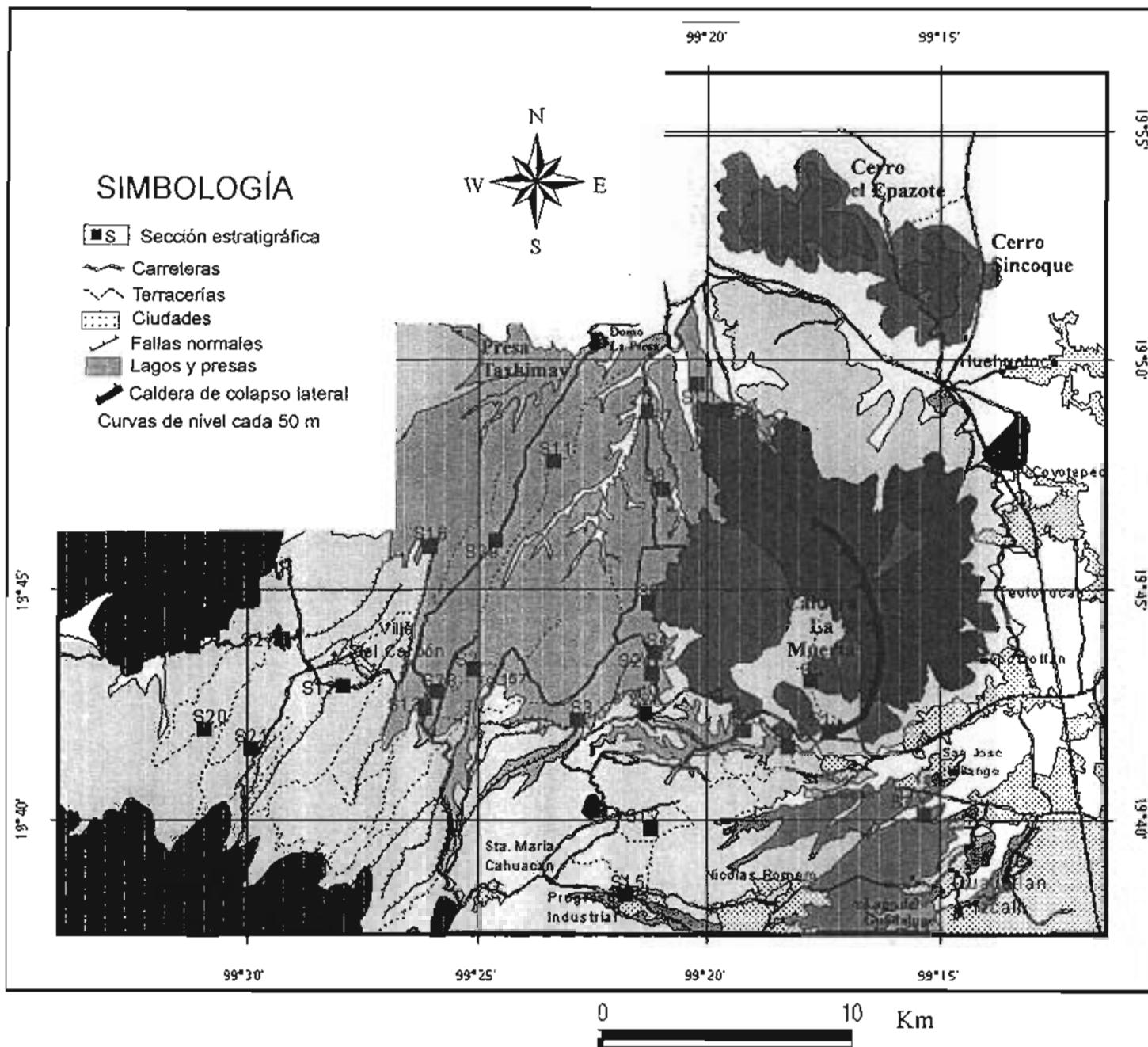


Fig. 5.- Mapa preliminar donde se muestran las unidades geológicas, así como la ubicación de las secciones estratigráficas.

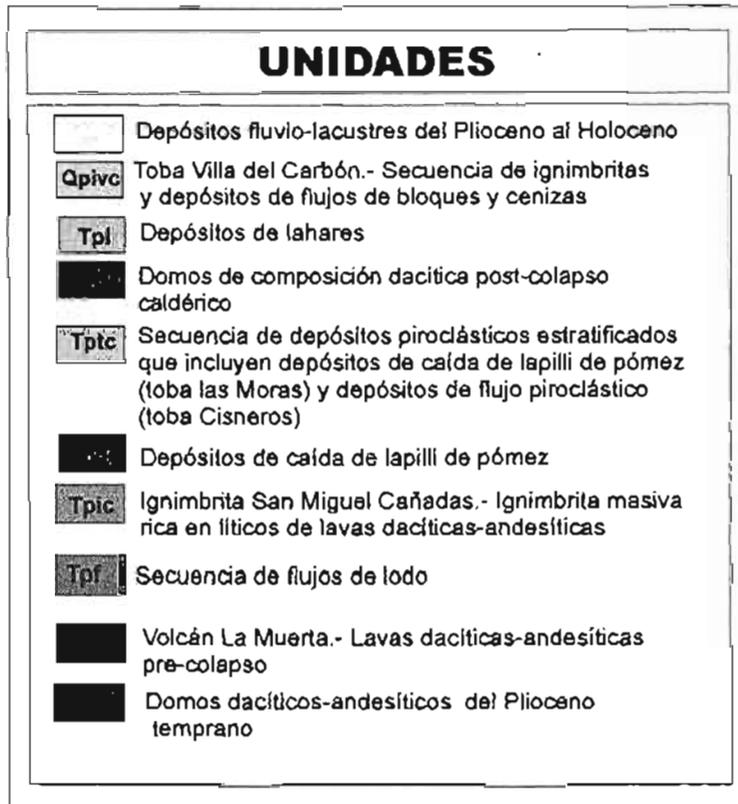
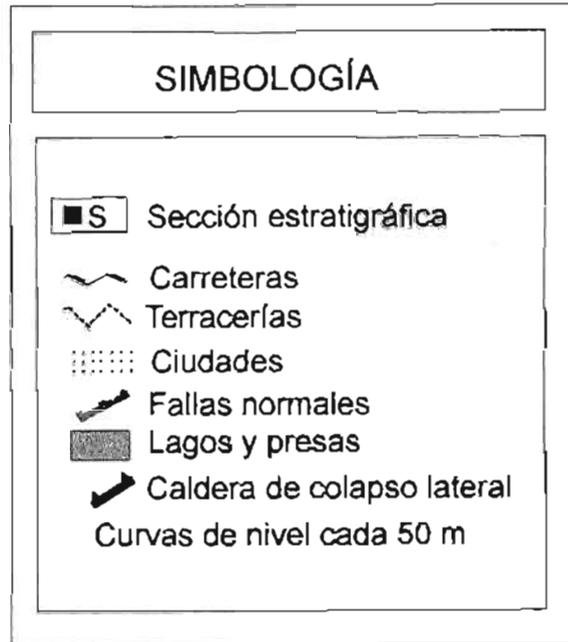
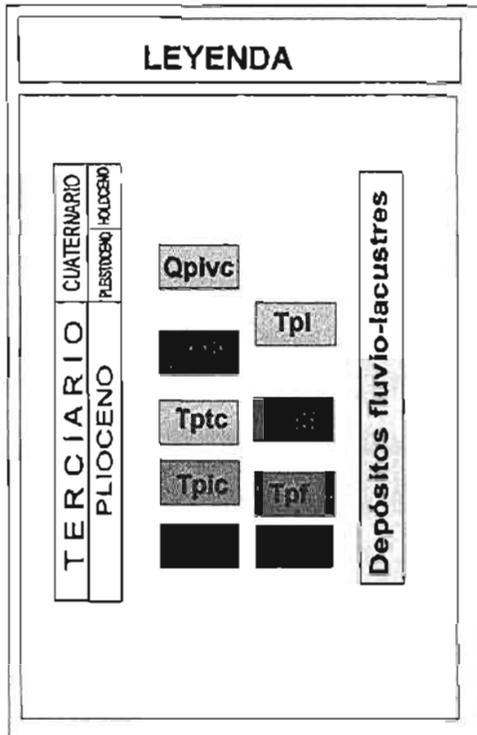


Fig. 6.- Leyenda del mapa preliminar donde se presenta la edad relativa de las unidades cartografiadas.

Se colectaron 159 muestras de roca (véase localización de sitios de muestreo en Fig.3). Estas muestras se clasificaron de acuerdo a su aspecto megascópico, contenido mineral, y análisis petrográfico.

Se reconocieron 13 unidades geológicas, diferenciadas por sus características litológicas y por su posición estratigráfica. Éstas se dividen en unidades pre-caldera, syn-caldera y post-caldera. Las unidades pre-caldera son:

- Domos dacíticos-andesíticos del plioceno temprano
- Volcán La Muerta
- Toba La Rosa
- Toba San Martín
- Toba Buenaventura
- Toba la Loma

Las unidades producidas por la formación de la caldera La Muerta son las siguientes:

- Ignimbrita San Miguel Cañadas
- Depósitos de flujos de lodo
- Depósito de caída Las Moras
- Toba Cisneros

Las unidades post-caldera son:

- Domos dacíticos post-colapso
- Toba La Capilla
- Toba Villa del Carbón

Se hizo la división entre unidades pre-caldera y syn-caldera debido a la existencia de depósitos fluvio-lacustres entre la Toba la Loma y la Ignimbrita San Miguel Cañadas.

A continuación se describen las unidades litoestratigráficas principales identificadas en el área de estudio, así como las estructuras volcánicas principales, de la más antigua a la más

joven. A cada unidad se le asignó nombre informal que combina un término descriptivo (litológico) y/o el nombre de una localidad de acuerdo a la toponimia de la región.

II.2 Descripción de unidades litoestratigráficas y estructuras volcánicas principales

II.2.1 Domos dacíticos-andesíticos del Plioceno temprano

Domos volcánicos de composición dacítica-andesítica constituyen las estructuras volcánicas más antiguas del área de estudio. Entre éstos, se reconocieron a los domos El Epazote, Sincoque, La Presa, y la Sierra Las Ánimas (ver Anexo 3). El Epazote y Sincoque se ubican hacia el extremo NE de área. Están compuestos por roca con coloración rojiza a la intemperie y gris oscura al fresco; presentan textura porfídica con abundantes fenocristales de plagioclasa y hornblenda subedrales, la hornblenda presenta bordes oxidados y algunas están completamente oxidadas, la matriz está compuesta de microlitos de plagioclasa y vidrio, tiene magnetita como mineral accesorio. El domo La Presa se encuentra hacia el NE de la presa Taxhimay. Ya había sido descrito anteriormente por Carrasco-Hernández (1999). La roca es de color gris claro al fresco y amarilla a la intemperie, seguramente andesítico; tiene textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y piroxenos, y la matriz esta compuesta por microlitos de plagioclasas y vidrio. El volcán Las Animas se sitúa al NW del área de estudio, también mencionado por Carrasco (1999), Aguirre-Díaz y Carrasco (1999) y Aguirre-Díaz et al. (1999), esta constituido por un conjunto de domos de composición dacítica, la roca es de color gris claro a gris oscuro, presenta bandeamiento de flujo, textura porfídica con fenocristales de cuarzo, plagioclasa y hornblenda, la matriz esta constituida por microlitos de plagioclasas y poco vidrio.

II.2.2 Volcán La Muerta

El volcán La Muerta está formado por domos y derrames de lavas de composición dacítica-andesítica, la roca es de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y clinopiroxeno, estos fenocristales tienen forma anedral, la hornblenda presenta en algunas ocasiones bordes oxidados, la plagioclasa presenta zoneamiento, la matriz es

microcristalina con plagioclasa y algunos óxidos. Este volcán se encuentra al E del área de estudio (ver Anexo 3). Es una estructura volcánica elevada que alcanza los 2950 metros sobre el nivel del mar.

Por su morfología y depósitos asociados se cree que el volcán La Muerta tuvo una erupción de tipo St. Helens, la cual provocó el derrumbe del flanco W del volcán, formándose la caldera La Muerta. La geoforma actual corresponde al de un escarpe de colapso con forma de herradura, muy abierta, cuya apertura esta dirigida hacia el W. La distribución de los productos piroclásticos coincide con la orientación de la apertura de la herradura. Los productos derivados del colapso se describen en el presente capítulo, de los cuales el más importante es la ignimbrita San Miguel Cañadas.

II.2.3 Toba La Rosa

Una secuencia de 7.5 m de espesor compuesta de flujos piroclásticos en la parte inferior y depósitos de caída de lapilli de pómez en la parte superior aflora al W de la caldera La Muerta (sección La Rosa (S28), Fig. 8). Los depósitos de flujos piroclásticos de la parte inferior presentan una matriz pumítica con cristales de cuarzo y plagioclasa, y algunos horizontes contienen biotita. También se observan escasos líticos de lavas porfídicas de coloraciones moradas y rojizas de aproximadamente 1 cm de diámetro. En la parte media de la secuencia se tienen depósitos de flujos piroclásticos con líticos de lavas porfídicas de coloraciones morada y rojizas de hasta 15 cm de diámetro, fragmentos de pómez de menos de 15 cm de diámetro, y una matriz pumítica de color pardo con cristales de cuarzo y plagioclasa de tamaño de arena fina. Los depósitos de caída de la parte superior están compuestos por clastos de pómez de aproximadamente 3 cm de diámetro; se encuentran muy intemperizados.

En el campo no se encontró un afloramiento que muestre la base de la toba La Rosa. Se ignora la naturaleza del contacto y su espesor total. Esta toba está cubierta por la Toba San Martín.

SECCION LA ROSA (S28)

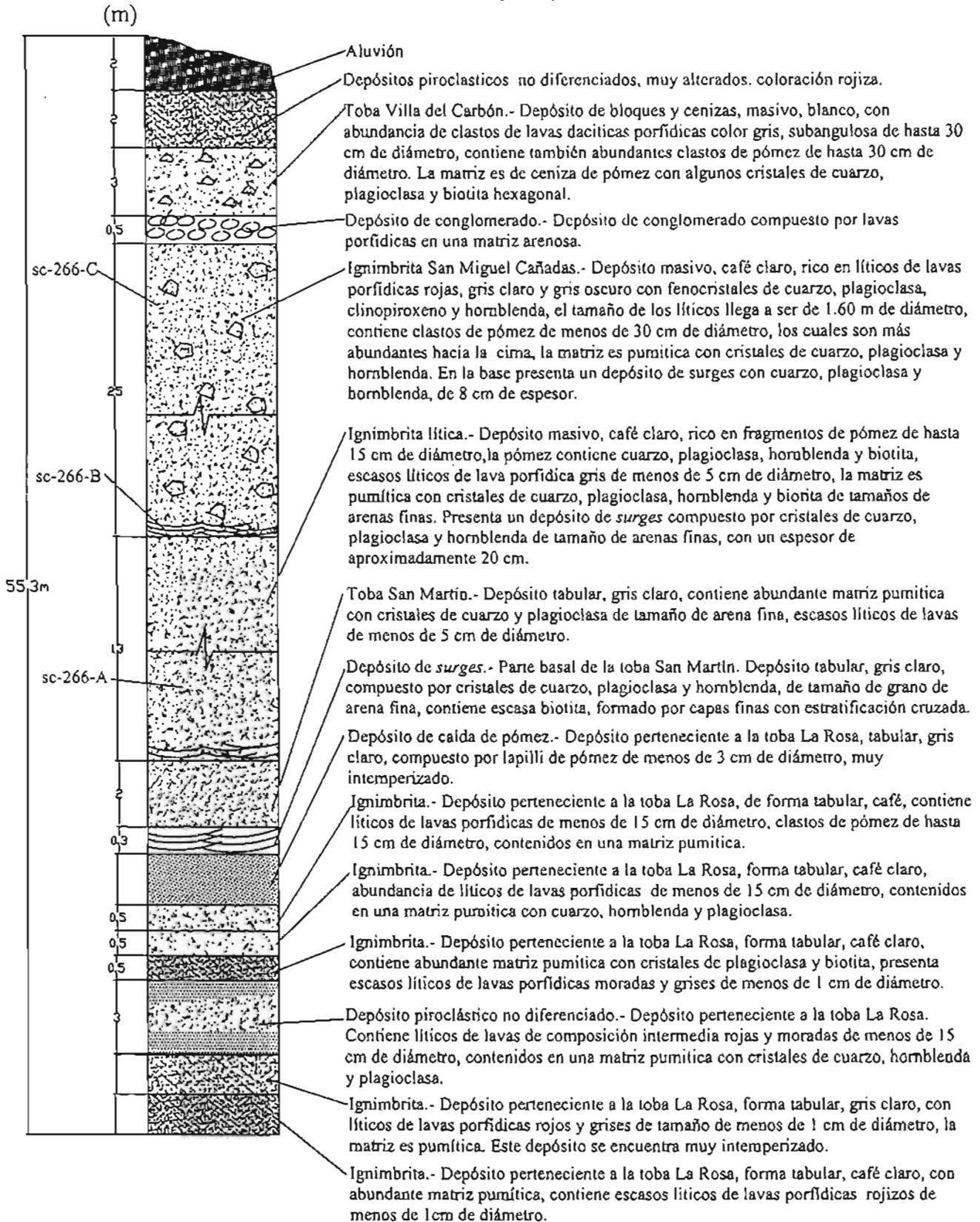


Fig. 8.- Secci3n Estratigr3fica La Rosa (S28) con espesor total de 55.3 m.
Coordenadas UTM: 454731, 2179844.

II.2.4 Toba San Martín

Otra secuencia de flujos piroclásticos, denominada aquí toba San Martín, se encuentra al NW y W de la caldera la muerta (sección La Rosa (S28), Fig. 8). La toba San Martín presenta un espesor de 2 m. La base de la secuencia está compuesta de depósitos de *surges* de aproximadamente 0.3 m de espesor, que contienen cristales de cuarzo, plagioclasa, hornblenda y escasa biotita. Sobre estos depósitos de *surges* hay depósitos de flujos piroclásticos con matriz pumítica café claro y con cristales escasos de cuarzo y plagioclasa de tamaño de arena media; contiene líticos escasos de lava porfídica de hasta 5 cm de diámetro.

II.2.5 Toba Buenaventura

La toba Buenaventura es una ignimbrita de bajo grado que aflora hacia el N-NW de la caldera La Muerta. Presenta un espesor máximo de 50 m sin la base expuesta al norte de la caldera La Muerta, y un espesor mínimo de 30 m en el frente del depósito a 8 km al NW de la caldera. La ignimbrita es masiva, y con coloraciones anaranjado a la intemperie y gris claro al fresco. El depósito está poco consolidado, contiene cristales de cuarzo y feldespatos de tamaño de arena media, y clastos escasos de pómez de hasta 10 cm de diámetro, color blanca y con fenocristales de feldespato. También presenta algunos líticos de lavas rojas y gris oscuro de hasta 10 cm de diámetro de composición dacítica, con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa y cuarzo. La cantidad de líticos es mayor cerca de la caldera La Muerta y se hacen más escasos al irse alejando de ésta, lo que indica que su fuente fue el cono compuesto que antecedió a la caldera La Muerta. Contiene abundante matriz pumítica con fragmentos de cristales de plagioclasa, cuarzo y hornblenda, también tiene escasos cristales de clinopiroxeno, el vidrio presente en la matriz esta devitrificado y alterado a minerales arcillosos. Esta ignimbrita sobreyace concordantemente a depósitos lacustres en la sección Buenaventura (S10) (Fig. 9, Anexo 3).

SECCIÓN BUENAVENTURA (S 10)

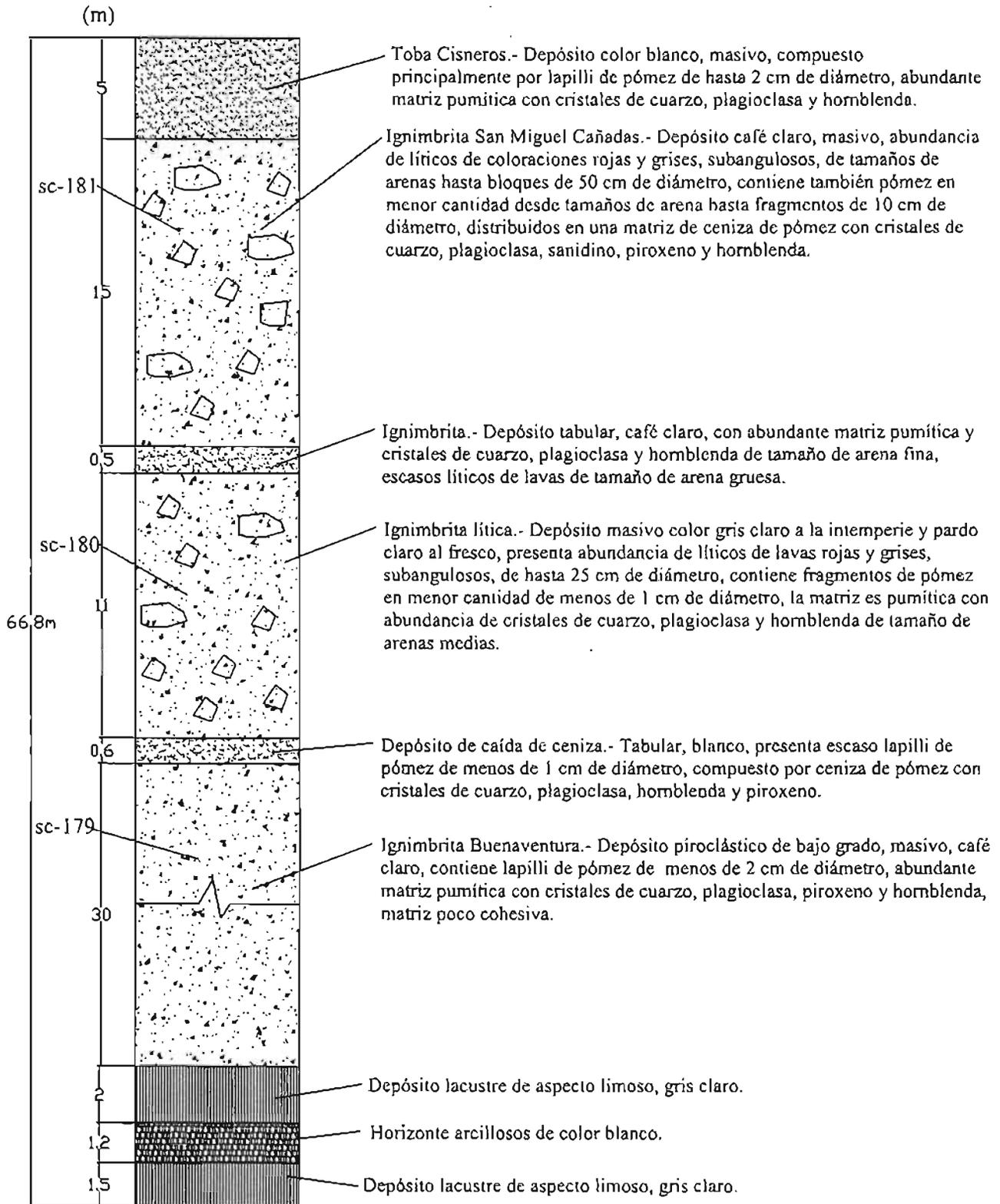


Fig. 9.- Sección estratigráfica Buenaventura (S10) con espesor total de 66.8 m. Coordenadas UTM: 464702, 2191872.

II.2.6 Toba La Loma

La toba La Loma se extiende principalmente hacia el NW de la caldera La Muerta, y en menor medida hacia el W de la misma. Conforme se va alejando de ésta va disminuyendo de espesor hasta casi desaparecer en las partes más distales, a aproximadamente 9 km al W de la sierra La Muerta.

Es una secuencia piroclástica que consta de intercalaciones de depósitos de *surges*, depósitos de caída, e ignimbritas. Los depósitos de *surges* se encuentran en la base, contienen cristales de cuarzo, plagioclasa y líticos de tamaño de arena media, intercalados con horizontes compuestos por clastos de pómez de hasta 1 cm de diámetro. Los depósitos de caída están compuestos por lapilli de pómez de hasta 5 cm de diámetro, líticos hasta de 4 cm de diámetro, cuarzo, plagioclasa y vidrio de tamaño de arena media. La ignimbrita es de bajo grado y se encuentra sobre los depósitos de caída, presenta fragmentos de pómez de hasta 10 cm de diámetro, escasos líticos de lavas de composición intermedia hasta de 4 cm de diámetro, en una matriz pumítica abundante con presencia de cristales de cuarzo, plagioclasa y vidrio. La coloración de esta ignimbrita es café claro, y se encuentra poco consolidada. Esta toba presenta un espesor máximo de 10.5 m en la sección la Loma I (S7) (Fig. 10), que es donde se aprecia más completa. En esta sección se observan depósitos de *surges* de casi 2 m de espesor. La toba La Loma sobreyace concordantemente a la ignimbrita Buenaventura.

II.2.7 Ignimbrita San Miguel Cañadas

La ignimbrita San Miguel Cañadas (SMC) es una ignimbrita de bajo grado, se distribuye principalmente hacia el NW y W de la caldera La Muerta. Cubre un área aproximada de 264 km².

Por su distribución geográfica (véase Anexo 3) se cree que la erupción asociada a este depósito fue dirigida principalmente hacia el W y al NNW de la caldera La Muerta. 15 secciones estratigráficas medidas indican un espesor máximo de 61 metros en las cercanías

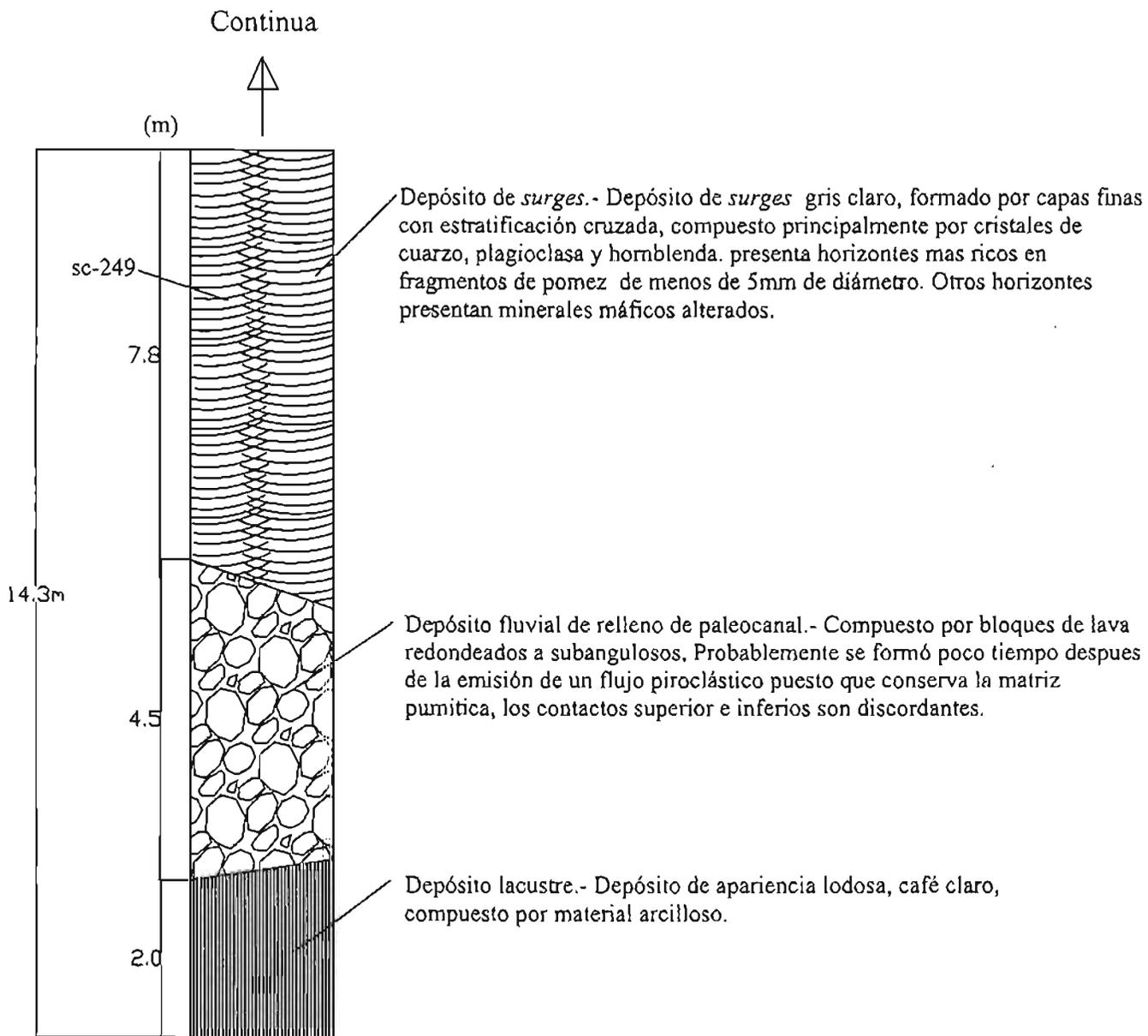
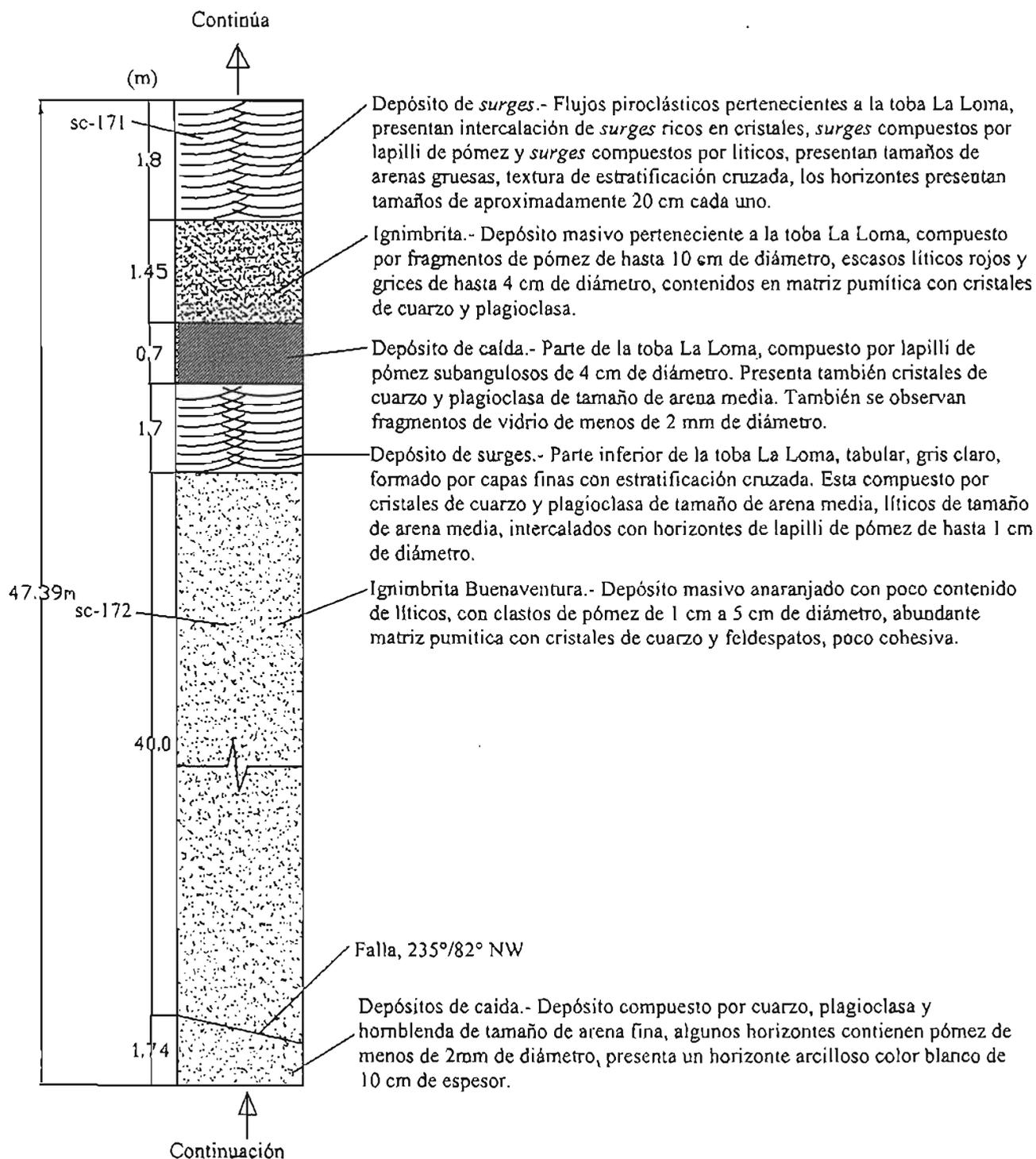
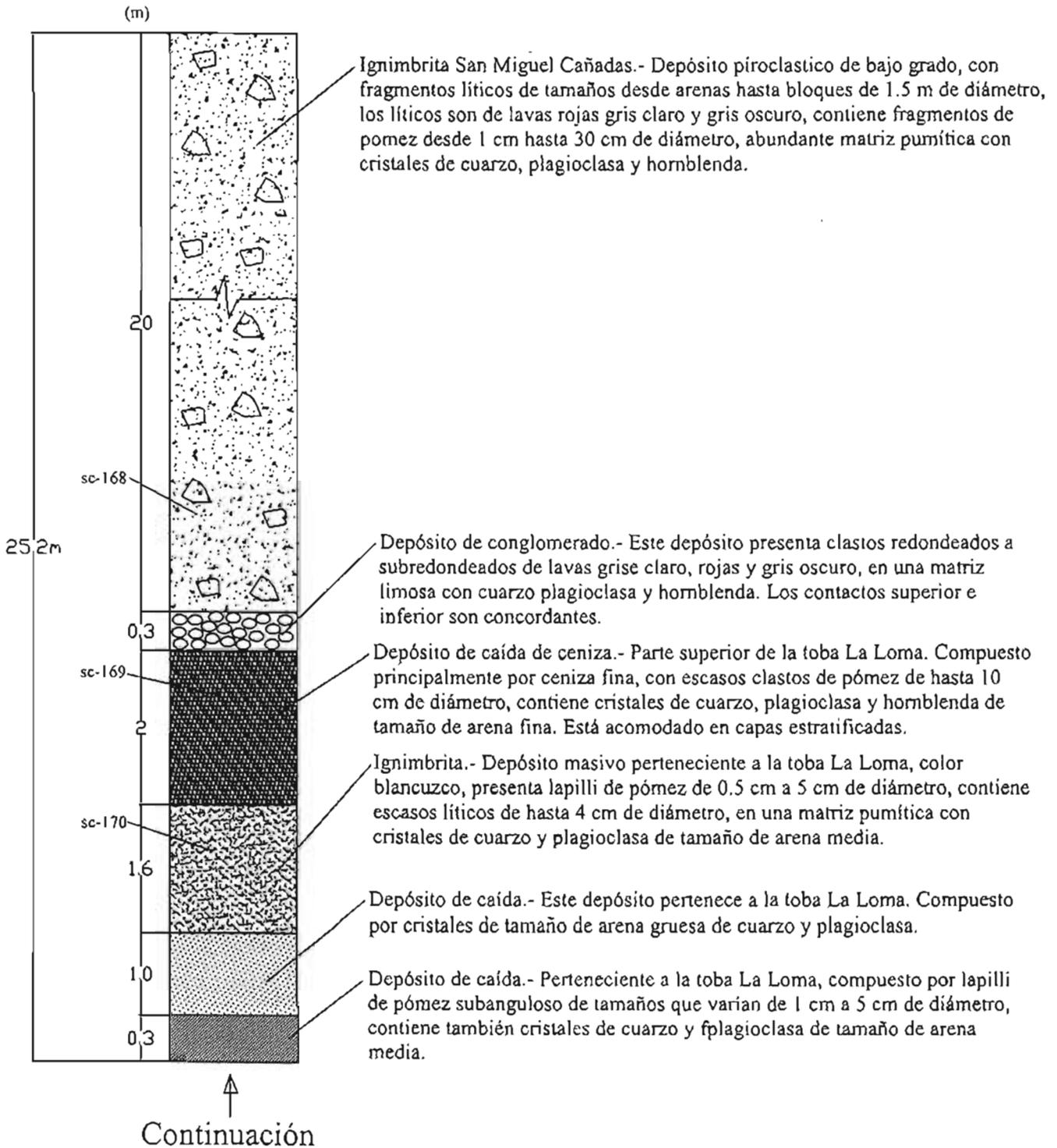


Fig. 10.- Sección estratigráfica La Loma 1 (S7) con espesor total de 86.9 m.
 Coordenadas UTM: 462802, 2190871.



SECCION LA LOMA I (S7)



de la fuente, y de 25 m en las partes más distales hasta ahora conocidas, aproximadamente a 17 km al W de la caldera, donde la unidad está desplazada por una falla normal que la pone en contacto tectónico con depósitos piroclásticos más recientes provenientes de otras fuentes. En las facies distales al NNW, a 9 km de la fuente, presenta espesores de 20 m, el cual parece ser el espesor del frente del depósito (Fig. 11).



Fig. 11.- Frente del depósito de la ignimbrita San Miguel Cañadas a 9 km al NW de la fuente. Coordenadas UTM: 14Q 0462358, 2189806.

Con base en los espesores medidos y en el área que cubre, se estimó un volumen físico aproximado de 6.3 km³.

La ignimbrita SMC es probablemente del Plioceno tardío (comunicación personal del Dr. Aguirre-Díaz, 2005). En la sección San Miguel Cañadas (S4) (véase Anexo 3) se observa la base de éste depósito (Fig. 12), donde presenta un espesor de 50 m. En la base presenta un depósito de *surges* de 50 cm de espesor rico en cuarzo, plagioclasa y hornblenda, con tamaños de arena media. Está acomodado en capas delgadas (1-2mm) con estratificación cruzada, y coloraciones grises y blancas.

SECCIÓN SAN MIGUEL CAÑADAS (S4)

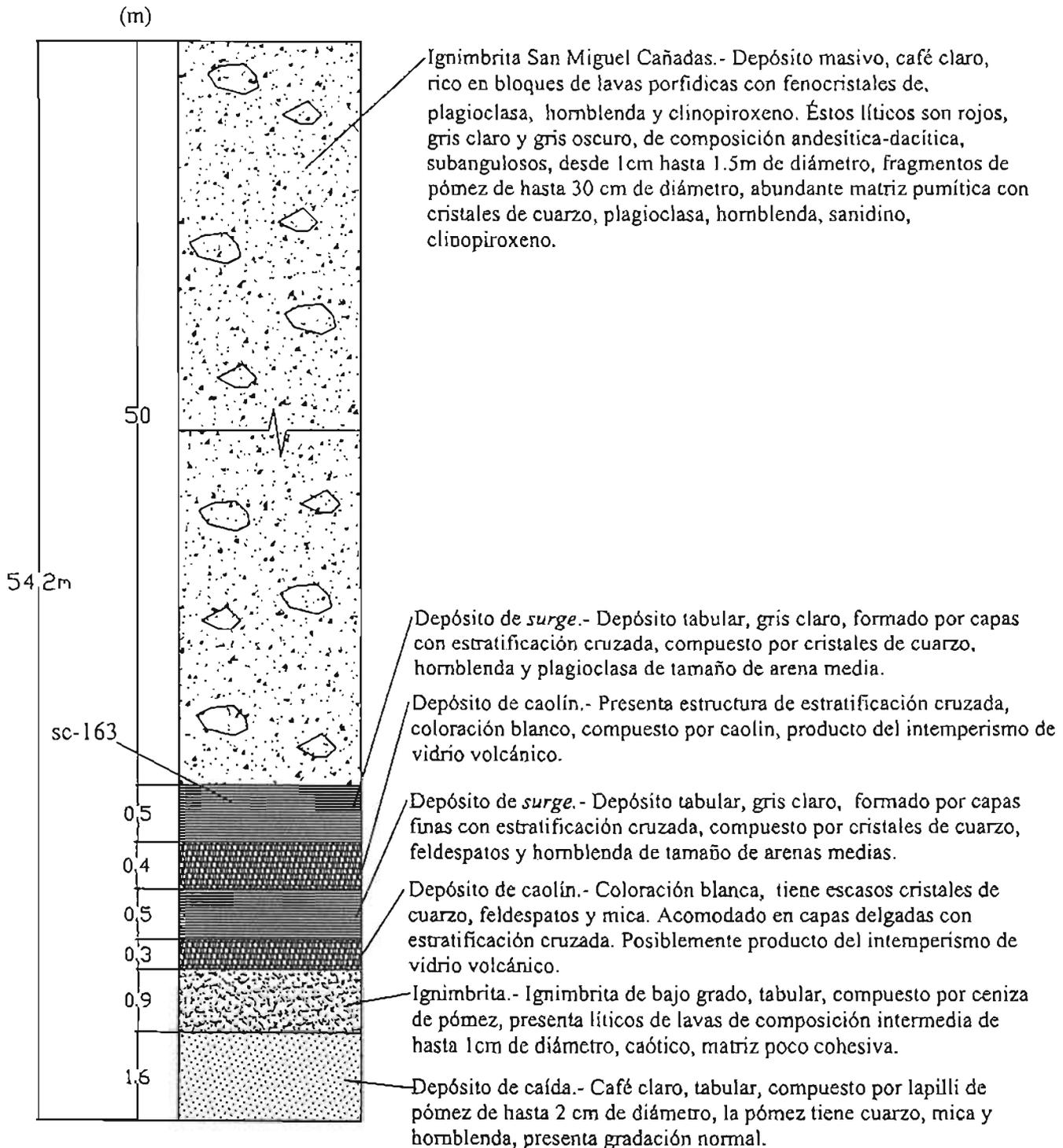


Fig. 12.- Sección Estratigráfica San Miguel Cañadas (S4) con espesor total de 54.2 m. Coordenadas UTM: 463144, 2181150.

Sobre este depósito basal yace el cuerpo principal de la ignimbrita. Su principal característica es la gran abundancia de líticos (Fig. 13) de lavas de composición dacítica y andesítica, angulosos a subangulosos, de color rojo, gris claro y gris oscuro (Fig. 14). Se presentan en gran variedad de tamaños, desde arenas hasta bloques de 1.5 m de diámetro (Fig. 15). Tienen textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, algunos de esto líticos también presentan fenocristales de cuarzo. El depósito contiene clastos de pómez subangulosos que van desde 1 cm hasta 30 cm de diámetro (Fig. 16). La pómez contiene fenocristales de sanidino y homblenda euhedral. En algunas localidades los clastos de pómez aumentan hacia la cima del depósito en relación a los líticos, los cuales son más abundantes hacia la base. La matriz es poco cohesiva y esta compuesta principalmente por ceniza de pómez, cuarzo, plagioclasa, sanidino, homblenda y algunos clinopiroxenos. La ignimbrita es café claro a la intemperie y gris claro al fresco. El porcentaje de líticos más los clastos de pómez varía de 15.7 % hasta 37.6 %, con 84.3 % y 62.4 % de matriz pumítica respectivamente.

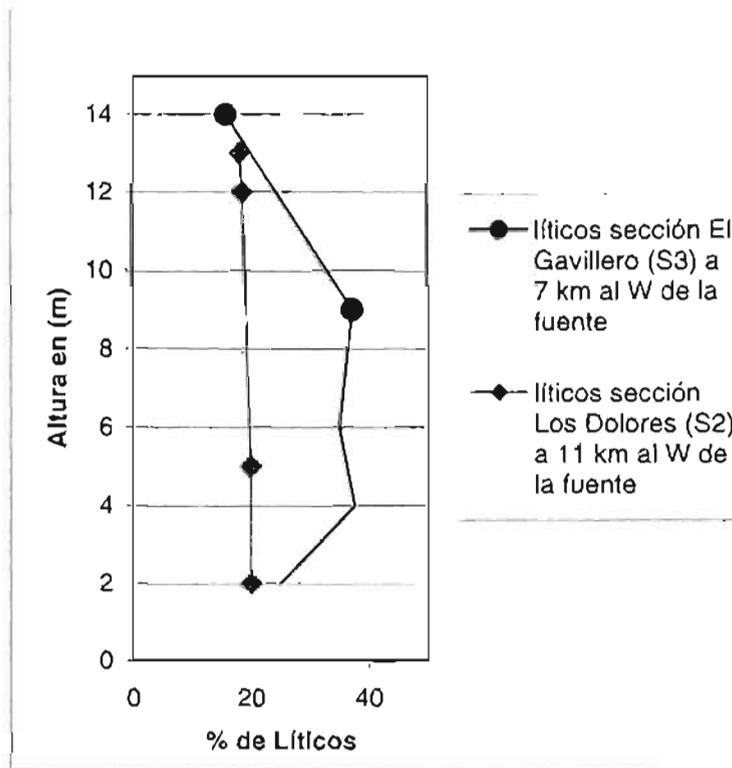


Fig. 13.- Gráfica que muestra el porcentaje de líticos respecto a la altura medida desde la base de dos secciones estratigráficas de la ignimbrita San Miguel Cañadas.

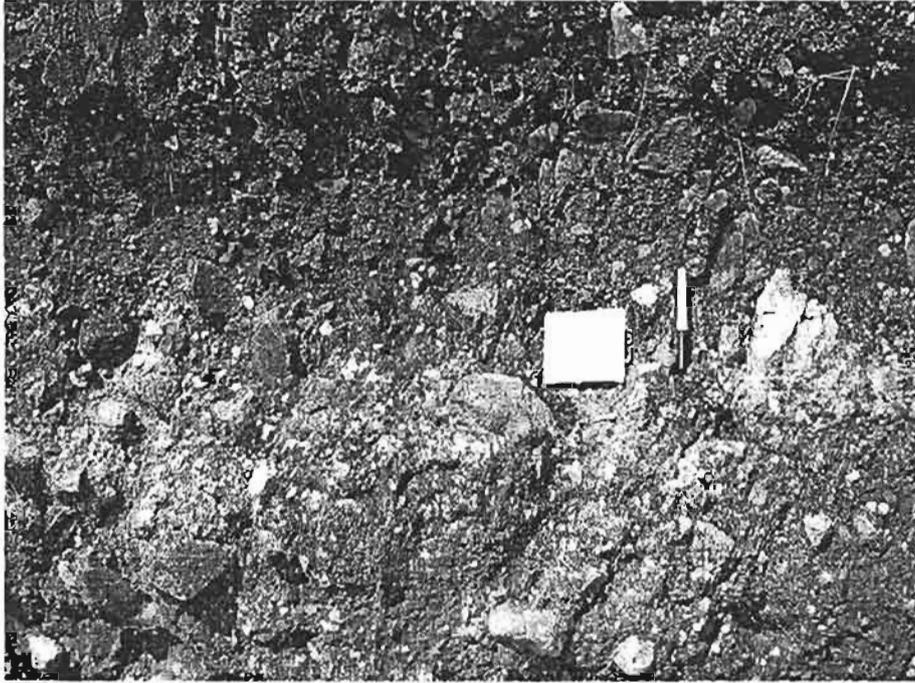


Fig. 14.- Fragmentos de lavas dacíticas rojas y grises en la ignimbrita San Miguel Cañadas, sección El Gavillero (S3) (véase ubicación de la sección en Fig. 5 y Anexo 3).



Fig. 15.- Fragmento de lava porfídica dacítica de 1.5 m de diámetro en la ignimbrita San Miguel Cañadas, sección El Gavillero (S3) (véase ubicación de la sección en Fig. 5 y Anexo 3)

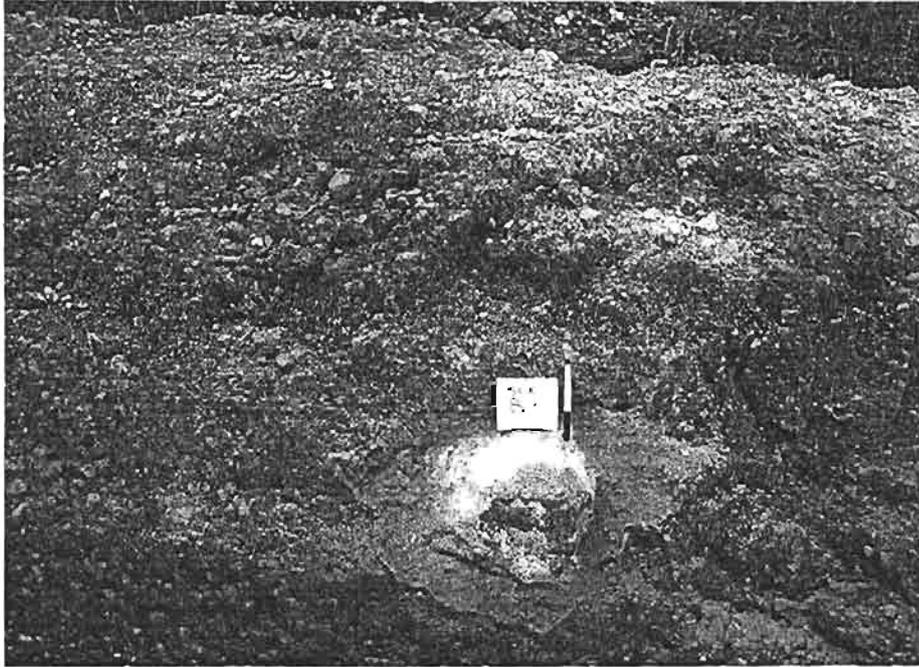


Fig. 16.- Fragmento de pómez de 35 cm de diámetro en la ignimbrita San Miguel Cañadas, sección Los Dolores (S2) (véase ubicación de la sección en Fig. 5 y Anexo 3)

En algunos afloramientos, como en el de la sección La Loma 2 (S8) (Fig. 17 y Anexo 3), se observan depósitos de avalancha constituidos por lavas dacíticas-andesíticas gris claro, de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y algunos cuarzos, estos fenocristales se encuentran dentro de una matriz con plagioclasa microcristalina y vidrio. El tamaño de los líticos es de hasta 20 cm. y muestran estructuras de rompecabezas. Estos depósitos se encuentran incorporados dentro de la ignimbrita San Miguel Cañadas (Fig. 18). Ésta ignimbrita sobreyace a depósitos fluvio-lacustres, el contacto con estos depósitos en algunos afloramientos se observa concordante y en otros erosional.

SECCION LA LOMA 2 (S8)

(m)

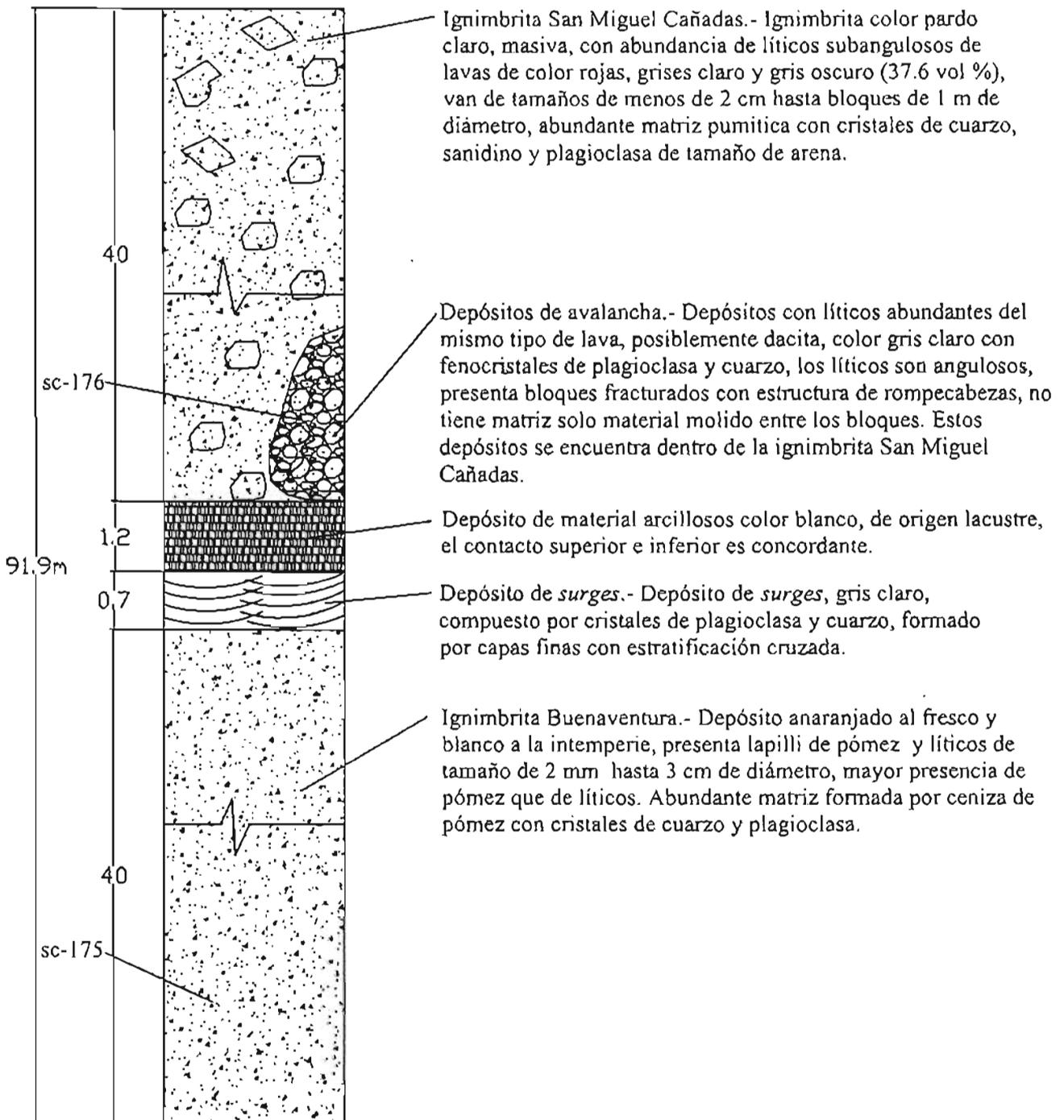


Fig. 17.- Sección estratigráfica La Loma 2 (S8) con espesor total de 91.9 m. Coordenadas UTM: 463067, 2187738.



Fig. 18.- Depósito de avalancha de bloques de lava dacítica gris, con estructura de rompecabezas, que forma parte de la ignimbrita San Miguel Cañadas en la sección La Loma 2 (S8) (véase Anexo 3).

II.2.8 Depósitos de flujos de lodo.

Estos depósitos se localizan al SE del área de estudio. Consiste en depósitos de flujos de lodo que en conjunto suman hasta 15 m de espesor, es una unidad masiva, café claro, compuesta por líticos de lava porfídica de hasta 40 cm de diámetro, subredondeados, y escasos fragmentos de pómez de hasta 2 cm de diámetro. Está soportado por una matriz de arena media con cuarzo y plagioclasa. Presentan lentes de material arcilloso de 20 cm de espesor. Éstos depósitos están situados estratigráficamente al mismo nivel que la Ignimbrita San Miguel Cañadas, por lo que posiblemente son productos de retrabajo por agua de dicha ignimbrita. En algunas zonas se encuentra cubierta por el depósito de caída Las Moras.

II.2.9 Depósito de caída Las Moras

Este depósito sobreyace a la ignimbrita san Miguel Cañadas (secciones Las Cabañas (S24) y Cisneros (S26), Fig. 19). Se distribuye principalmente hacia el SW de la Sierra La Muerta. El depósito es grisáceo y tiene un espesor de 2.2 m (sección Cisneros (S26), Fig. 19). Está compuesta principalmente por lapilli de pómez con tamaños que van de 0.5 a 5 cm de diámetro; se observa gradación normal en éstos. La pómez contiene plagioclasa y poca hornblenda de tamaño de arena media. El depósito contiene algunos líticos de tamaños de arena media, también presenta cuarzo, plagioclasa y hornblenda de tamaño de arena media. En las partes más distales de la caldera La Muerta éste depósito presenta espesores de 7 m en la sección Las Moras (S11) y 10 m en la sección La Golondrina (S12) (véase Fig.5 y Anexo3), estos afloramientos presentan mayor presencia de cristales de cuarzo y plagioclasa de tamaño de arena media, también presenta mayor contenido de líticos de lavas grises y rojas de tamaños de arena fina, la coloración es gris claro.

II.2.10 Toba Cisneros

La toba Cisneros se ubica al SW y S de la caldera La Muerta, se extiende aproximadamente hasta 15 km al SW y 11 km al S de dicha caldera. Es blanca a café anaranjado, y su espesor varía de 2 a 5 m. Es una secuencia piroclástica compuesta principalmente por una ignimbrita de bajo grado rica en cristales, intercalada con depósitos de caída de lapilli de pómez de 0.5 cm a 5 cm de diámetro. La ignimbrita contiene cuarzo, plagioclasa y hornblenda en una matriz de ceniza de pómez. En algunos horizontes presenta escasos líticos de lavas grises de tamaño de arena fina. En algunos afloramientos como en el de la sección Cisneros sobreyace de manera concordante al depósito de caída Las Moras (Fig. 19, Anexo 3), y en otros como en el de la sección El Gavillero (S3) (Fig.20, Anexo3) sobreyace también concordantemente a la ignimbrita San Miguel Cañadas.

SECCIÓN CISNEROS (S26)

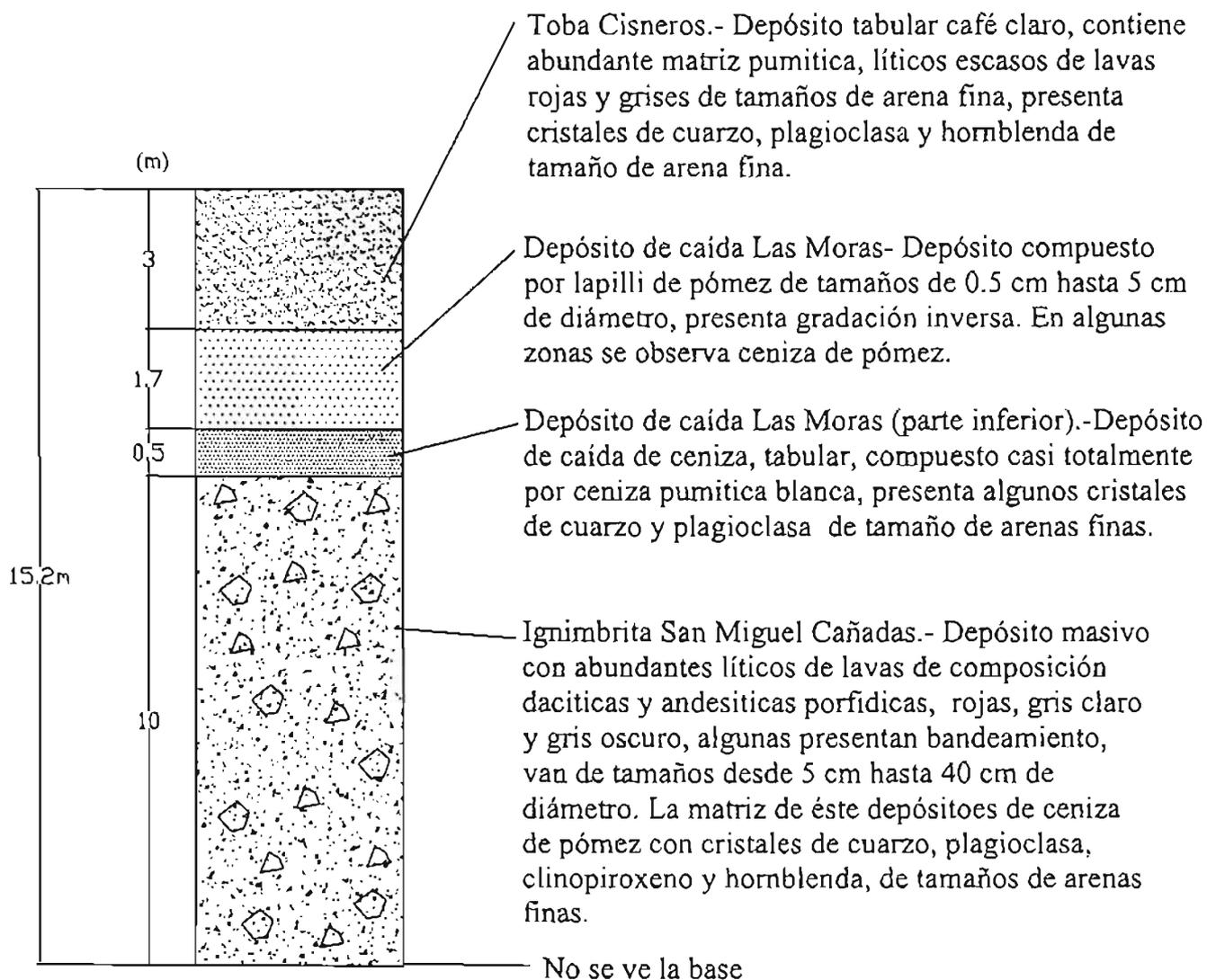


Fig. 19.- Sección estratigráfica Cisneros (S26) con espesor total de 15.2 m.
Coordenadas UTM: 462719, 2178773.

SECCIÓN EL GAVILLERO (S3)

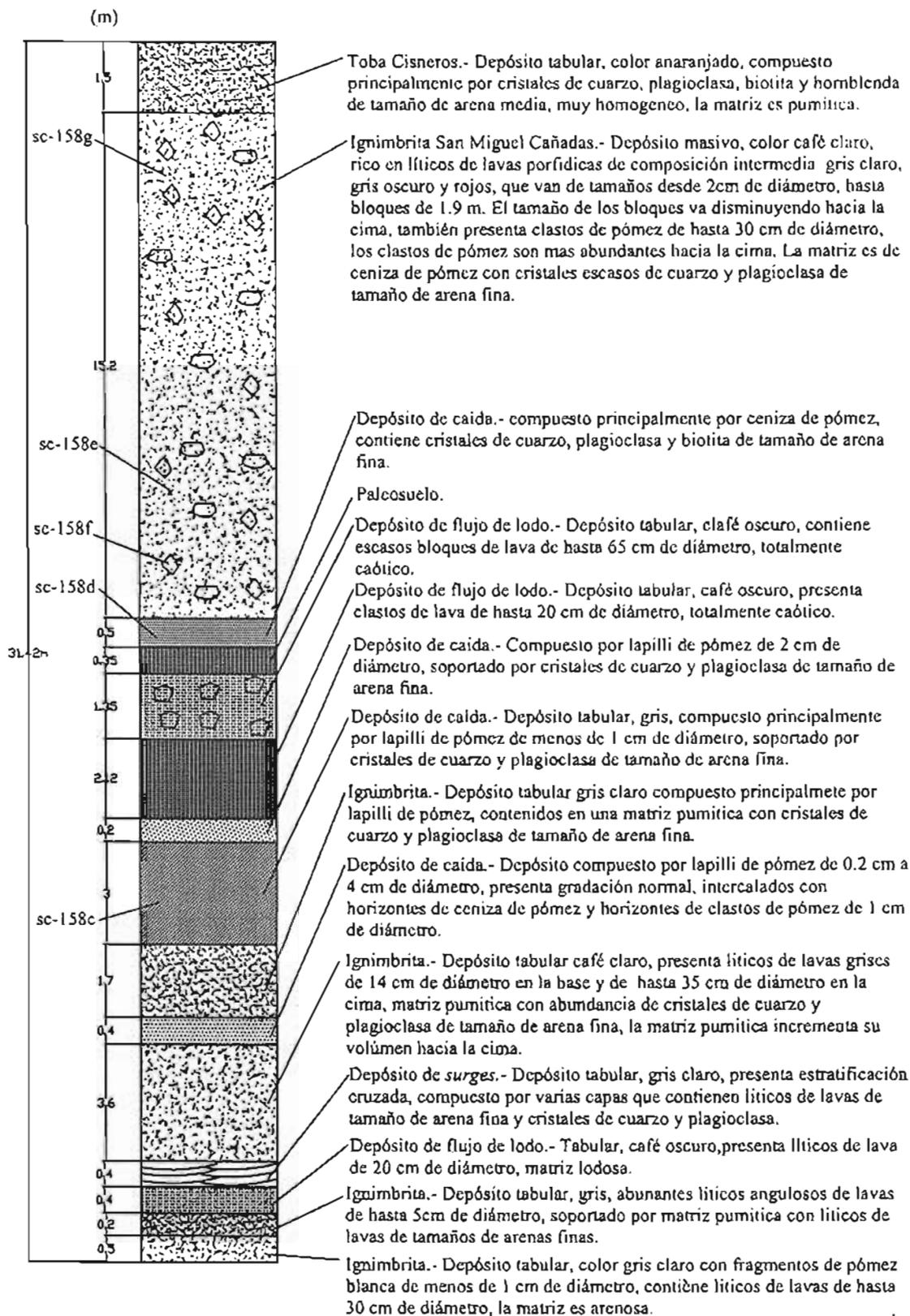


Fig. 20.- Sección estratigráfica El Gavillero (S3) con espesor total de 31.4 m. Coordenadas UTM: 460543, 2178045.

II.2.11 Domos dacíticos post-colapso

Un grupo de domos se emplazaron posteriormente a los flujos piroclásticos provenientes de la caldera La Muerta (Véase Anexo 3). Se encuentran alrededor y dentro de la caldera. Los domos son de composición dacítica. Estas rocas tienen textura porfídica con fenocristales de cuarzo, plagioclasa, hornblenda y en menor cantidad clinopiroxenos, los fenocristales están rodeados por una matriz compuesta por microlitos de plagioclasa y vidrio, tiene magnetita como mineral accesorio. La roca es gris claro a gris oscuro. En algunos afloramientos se observa estructura de bandeamiento de flujo así como lajeamiento, bloques tipo AA, y en algunas zonas la roca se encuentra brechada. A este grupo pertenecen los domos Cerro de Piedra, El Tejocote, Las Culebras, Tres Cabezas, Cerro Gordo, El Filo, y El Calvario (véase, Anexo 3).

II.2.12 Toba La Capilla

La toba La Capilla es una secuencia piroclástica que consta de depósitos de caída de lapilli de pómez en la base y una ignimbrita en la cima. Tiene un espesor de 3 m. Los depósitos de caída están constituidos principalmente por lapilli de pómez de menos de 5 cm de diámetro, acomodados grano a grano, sin matriz. Los clastos de pómez contiene cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita, también incluye escasos líticos de menos de 1 cm de diámetro. Presenta también algunos horizontes de ceniza pumítica y horizontes ricos en cristales compuestos de cuarzo y plagioclasa, de tamaño de arena media. La ignimbrita es color café, tiene fragmentos de pómez abundantes de menos de 5 cm de diámetro, presenta matriz de ceniza de pómez con cuarzo, plagioclasa y hornblenda. La toba La Capilla está subyaciendo a la toba Villa del Carbón (Fig. 21, Anexo 3). Esta toba proviene posiblemente de la misma fuente que la toba Villa del Carbón.

II.2.13 Toba Villa del Carbón

La toba Villa del Carbón aflora en la parte occidental de la zona de estudio (véase Anexo 3). Está delimitada hacia el Este por una falla normal que la pone en contacto tectónico con

SECCIÓN LA CAPILLA (S19)

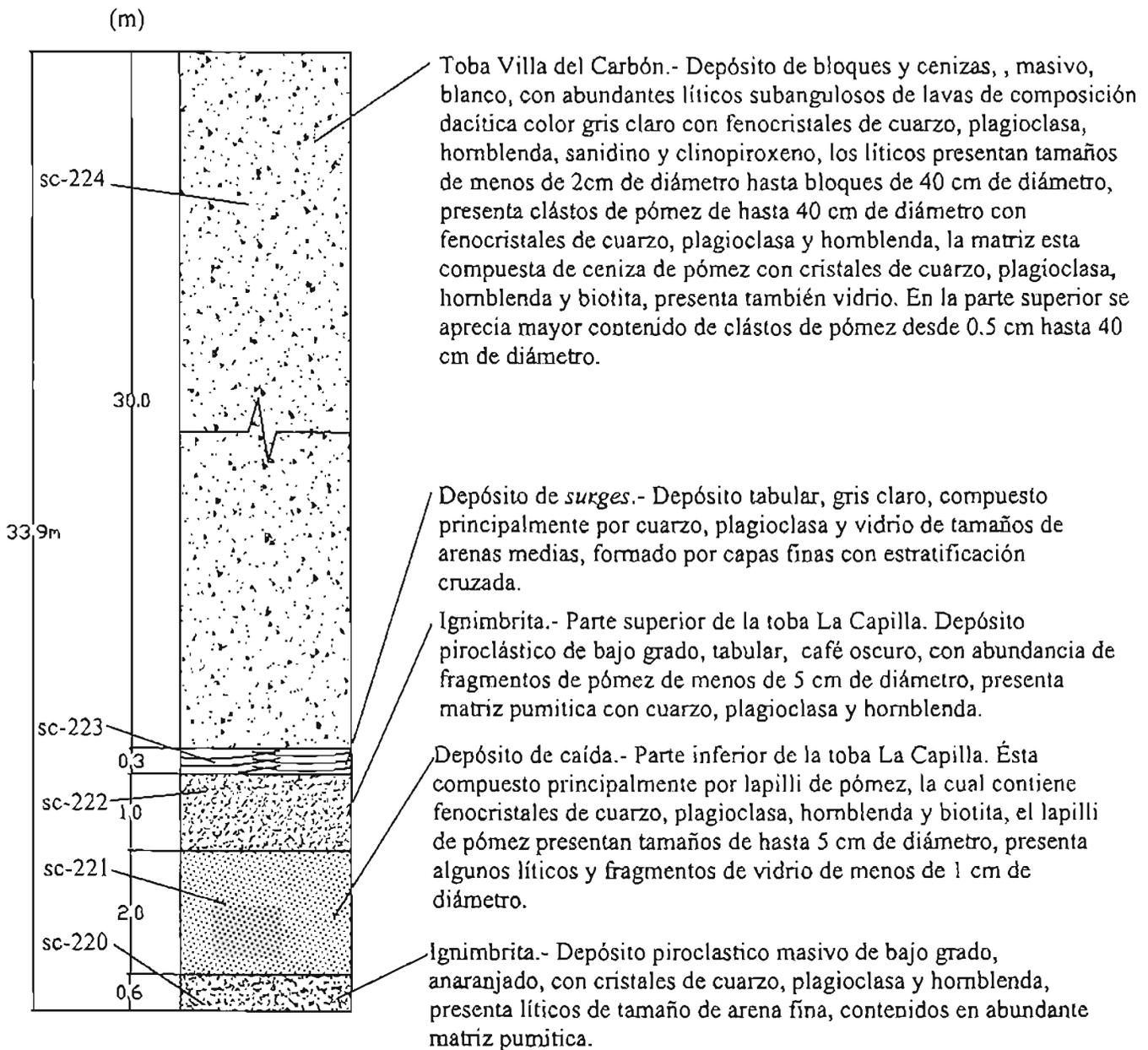


Fig. 21.- Sección estratigráfica La Capilla (S19) con espesor total de 43.9 m.
 Coordenadas UTM: 445552, 2181452.

unidades más antiguas, al norte esta en contacto lateral con la sierra Las Animas. Se midieron 8 secciones estratigráficas para esta toba, de donde se obtuvo un espesor de 40 m (sección Los Domínguez (S27) (Fig. 22, Anexo 3)).

Está constituida por depósitos de flujos de bloques y cenizas en la parte inferior y por ignimbritas ricas en pómez en la parte superior. Los depósitos de flujos de bloques y cenizas tienen en conjunto un espesor de 30 m (sección La Capilla (S19), Fig. 21), son masivos, color blanco, y en la parte superior presentan una coloración naranja (Fig. 23).

Contiene gran cantidad de fragmentos de pómez y material juvenil desde tamaño de arenas hasta bloques de 90 cm de diámetro, con formas angulosas a subangulosas, color gris claro. La composición de los líticos es intermedia, posiblemente dacítica, con textura porfídica con fenocristales de cuarzo, plagioclasa, sanidino, hornblenda y algunos clinopiroxenos; éstos fenocristales se encuentran dentro de una matriz de vidrio con microlitos de plagioclasa. La matriz de este depósito está compuesta por ceniza de pómez, con fragmentos de cristales de cuarzo, plagioclasa y hornblenda con bordes oxidados.

Las ignimbritas de la parte superior de esta secuencia están distribuidas en varios horizontes cuyos espesores varían de 1.5 a 4 m en la Sección Loma Mondo (S21) (Fig. 24, Anexo 3). Están compuestas principalmente por clastos de pómez de hasta 15 cm de diámetro, contienen feldespatos y biotita hexagonal, presentan también líticos angulosos a subangulosos de 10 cm de diámetro de lavas de composición intermedia, posiblemente dacítica de coloración gris claro, con textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, hornblenda, sanidino y escaso clinopiroxeno, estos fenocristales se encuentran dentro de una matriz compuesta por microlitos de plagioclasa y vidrio. Los líticos tienden a concentrarse hacia la base de cada ignimbrita. La matriz de estas ignimbritas es de ceniza de pómez abundante con cuarzo y plagioclasa. En general tienen una coloración blanca.

La toba Villa del Carbón es una secuencia piroclástica, que posiblemente proviene de la caldera de La Catedral (Aguirre-Díaz, 2001, 2004a, 2004b). Esta toba sobreyace en contacto concordante a la toba La Capilla.

SECCIÓN LOS DOMINGUEZ (S27)

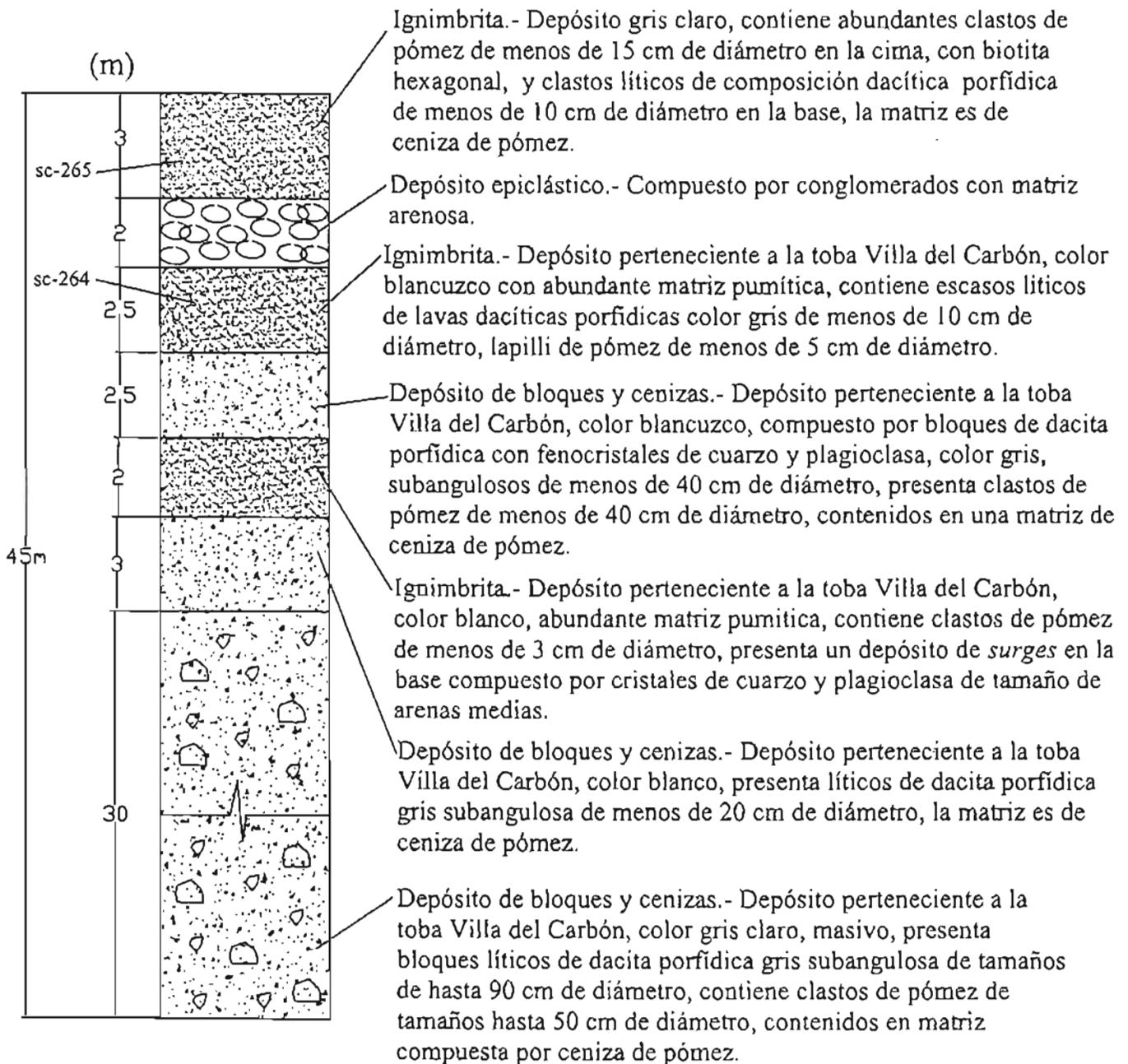


Fig. 22.- Sección estratigráfica Los Dominguez (S27) con espesor total de 45 m. Coordenadas UTM: 448916, 2181986.



Fig. 23.- Depósito de flujo de bloques y cenizas, el cual pertenece a la toba Villa del carbón, Sección El Plan (S17). Coordenadas UTM: 14Q 451198. 2179911 (véase Anexo 3).

SECCIÓN LOMA MONDO (S21)

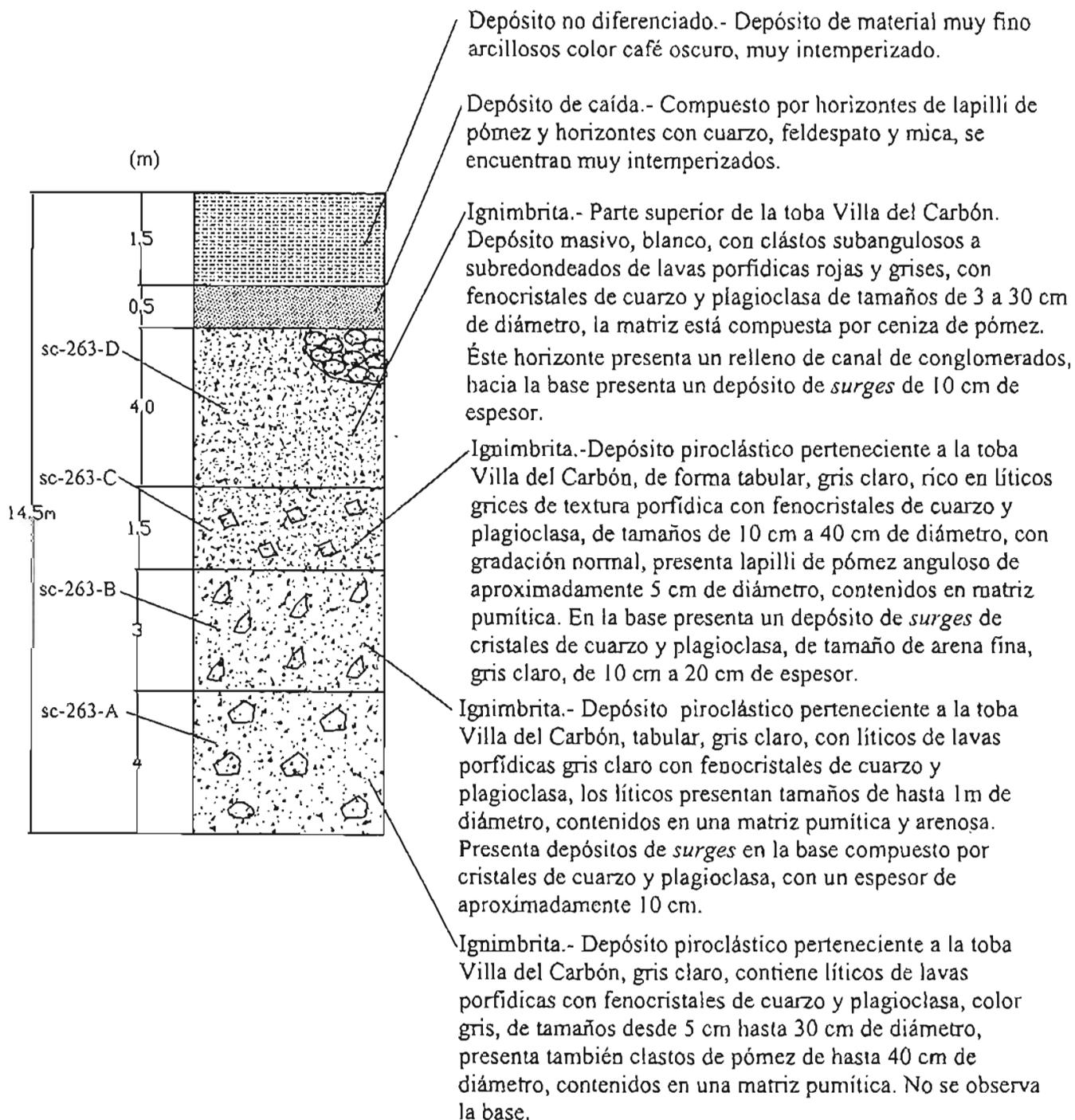


Fig. 24.- Sección Estratigráfica Loma Mondo (S21) con espesor total de 14.5 m.
 Coordenadas UTM: 447134, 2177323.

CAPÍTULO III

EMPLAZAMIENTO DE IGNIMBRITAS

III.1 Modelos de emplazamiento de ignimbritas

Los depósitos piroclásticos pueden ser agrupados en una clasificación genética tripartita (Sparks et al., 1973) en, 1) caída, 2) *surge*, y 3) flujo. Los depósitos piroclásticos de caída resultan de eyecciones de fragmentos por las explosiones volcánicas, llevados mediante columnas de gas mezclado con aire desde el cráter, asentándose con velocidades terminales de caída desde la zona de empuje convectivo en una columna eruptiva, la cual es lateralmente desplazada por el viento, y/o depositados por nubes convectivas asociadas a flujos piroclásticos de ceniza co-ignimbrítica (Sparks y Walker, 1977). Los *surges* piroclásticos van desde los *surges* basales de temperatura relativamente baja (Moore, 1967; Waters y Fisher, 1971), los cuales resultan de la interacción explosiva de magma y agua, a los *surges* de temperatura alta relacionados a las explosiones producidas por un tapón de lava, explosiones laterales dirigidas, o cambios en las características del cráter durante erupciones Plinianas y Peleanas (Sparks, 1976). De acuerdo con Sheridan (1979), el término flujo piroclástico incluye todas las avalanchas más densas que el aire, y flujos que reciben su energía inicial de las erupciones volcánicas. Se incluyen los flujos de bloques, flujos de lapilli, nubes ardientes, flujos de pómez, y -los más voluminosos- los flujos de ceniza. La diferencia esencial entre flujos y *surges* es que los flujos son más densos y más continuos (Sheridan, 1979).

Las avalanchas calientes se detienen con ángulos de reposo de 15° a 25°. Los más grandes flujos piroclásticos se caracterizan por su notable movilidad indicada por su excesiva extensión y habilidad para superar barreras topográficas a distancias grandes (Sheridan, 1979) (Fig. 25). Tres clases gradacionales han sido designadas (Aramaki, 1957, 1961; Aramaki y Yamasaki, 1963): depósitos pequeños con volúmenes de menos de 0.1 km³,

depósitos intermedios con volúmenes entre 0.1 y 1 km³, y depósitos grandes mayores a 1 km³.

Un episodio eruptivo completo puede resultar en numerosos flujos piroclásticos así como de caídas, surges, y horizontes de lava menos frecuentes. Estos depósitos están dominados por las unidades de flujos piroclásticos (“flujos de ceniza” de Smith, 1960). El espesor de esas unidades de flujos piroclásticos van desde 0.05 a más de 40 m; y pueden extenderse a mas de 100 km del conducto volcánico que los emitió. Si se considera su variabilidad, parece inapropiado ajustar estos depósitos a un patrón general, sin embargo muchos registros que se tiene de depósitos tienen una asociación común de elementos texturales que representan un episodio eruptivo completo (Sheridan, 1979). La regularidad es tal que la frase “unidad de flujo de ignimbrita estandar” (Sparks et al., 1973; Sparks, 1976) ha sido aplicada a la parte principal de la sección. El desarrollo de una sección estándar completa en cualquier lugar específico es rara, y conforme se tiene un detalle mayor en el estudio de las flujos piroclásticos se van proponiendo nuevas unidades, tales como las coignimbritas de rezago, las cuales representan facies cercanas al cráter de depósitos de flujos piroclásticos (Wright y Walker, 1977).

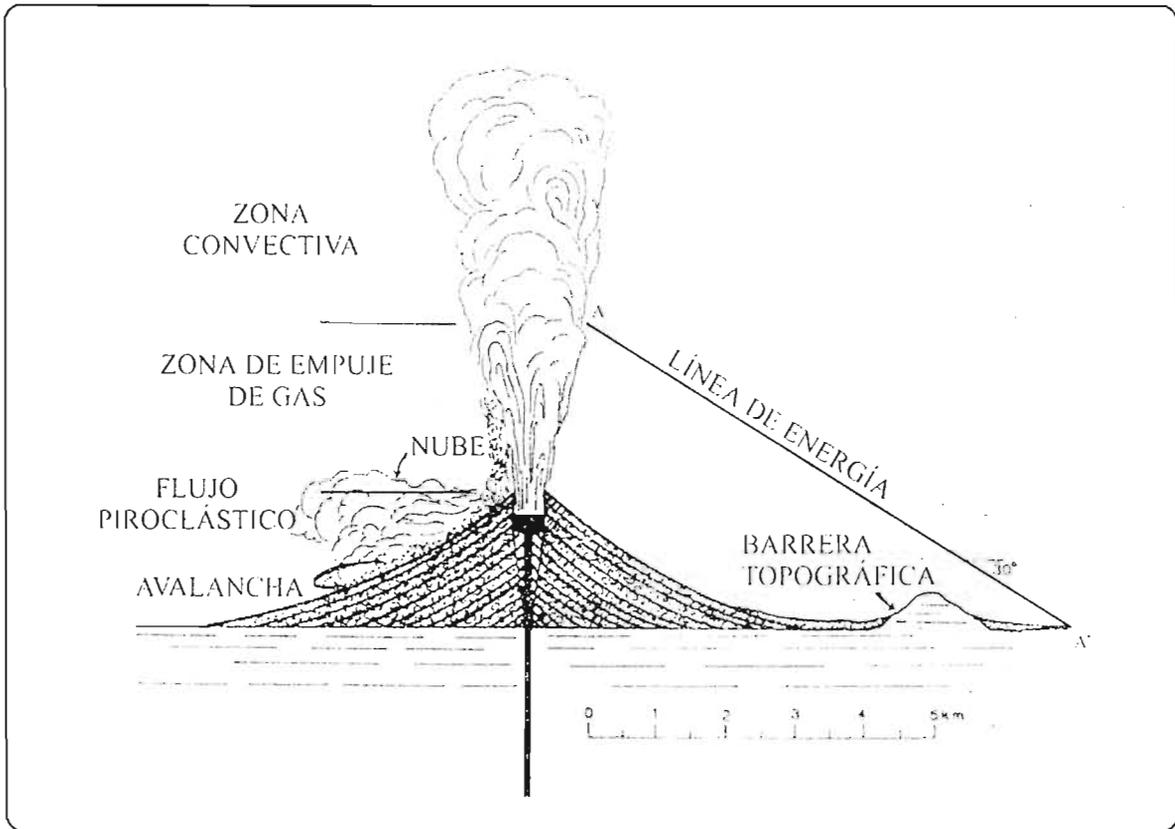


Fig.25.- Diagrama esquemático de una erupción Pliniana de un volcán compuesto, mostrando la zona de empuje de gas y convectiva de la columna eruptiva. La línea de energía (A-A') traza el frente potencial del flujo desde la cima de la zona de empuje de gas a la parte más distal del flujo. El colapso dentro de la zona de empuje de gas podría producir un flujo piroclástico compuesto por una avalancha densa y una nube cabalgante más diluida. El flujo piroclástico puede sobrepasar barreras topográficas que no se encuentren más allá de la línea de energía (Sheridan, 1979).

III.1.1 Modelo de emplazamiento de ignimbritas de R. S. J. Sparks et al. (1973)

A continuación se resume el trabajo de Sparks et al. (1973) donde definen las diferentes capas que forman a un depósito de flujo piroclástico.

De acuerdo con Sparks et al. (1973), las ignimbritas son rocas piroclásticas compuestas predominantemente por material juvenil vesiculado (pómez y esquirlas) mostrando características que indican un origen de flujo piroclástico.

En conjunto, se considera a la ignimbrita como una roca homogénea. Algunas unidades sin embargo no son homogéneas. Existen tres factores que marcan las diferencias, 1) zonamiento debido a diferentes grados de soldamiento, 2) subdivisiones dentro de las mismas unidades de flujo, y 3) estratificación debido a variaciones en el tamaño de grano.

La figura 26 consta de una sección esquemática donde se muestran los productos de una fase Peleana, así como la unidad de flujo de la ignimbrita con las capas 2a y 2b, subyaciendo a esta se encuentra el depósito de surge basal (capa 1), y el depósito de ceniza fina sobreyacente (capa 3) (Sparks et al, 1973).

La capa 1 tiene rara vez más de unos cuantos cm de espesor y presenta un contacto con la capa 2 de tipo abrupto a gradacional. Esta capa muestra rápidas fluctuaciones en su espesor y está frecuentemente bien estratificada y presenta estratificación cruzada de bajo ángulo. Diferentes capas muestran grandes variaciones en el tamaño de grano y en su clasificación.

Cada unidad de flujo en una ignimbrita tiene una capa basal de grano fino llamada por Sparks et al. (1973) como capa (2a), y una capa sobreyacente llamada capa 2b, la cual comúnmente muestra una forma de estratificación debido a la gradación en el tamaño de las pómez más grandes así como de los líticos.

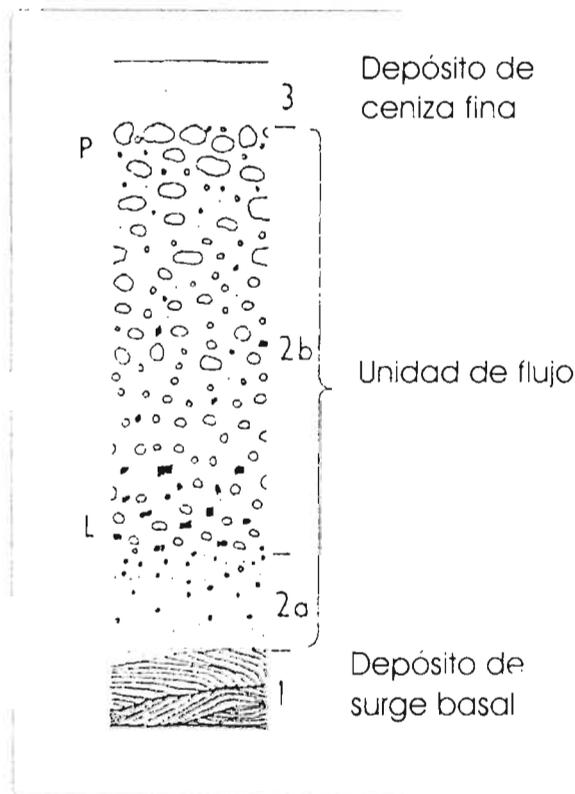


Fig. 26.- Sección esquemática que muestra los productos de una fase Peleana, donde se muestra la unidad de flujo de la ignimbrita con las capas 2a y 2b, subyaciendo se encuentra el depósito de surge basal (capa 1), y el depósito de ceniza fina sobreyacente (capa 3); P= clastos de pómez, L= clastos líticos. (Sparks et al, 1973)

La ocurrencia de las capas 2a y 2b parece no estar relacionada al tamaño o a la composición o al grado de soldamiento. Éstas ocurren en ignimbritas con rangos de volúmenes desde < 1 a probablemente $>30 \text{ km}^3$, y en composiciones desde riolítica hasta basáltica. Estas capas pueden ocurrir en ignimbritas no soldadas y soldadas, sin embargo si se presenta un soldamiento denso puede hacer más difícil la identificación de las capas.

La capa 2b constituye el cuerpo principal de la ignimbrita y normalmente representa más del 90 % de su volumen. Es relativamente homogénea y tiene una selección pobre, con polvo muy fino y bloques de aproximadamente 1 m de diámetro coexistiendo en la roca. En muchos flujos, los clastos de pómez se incrementan en cantidad hacia arriba del cuerpo de la ignimbrita, hasta alcanzar un máximo en la cima de la capa 2b; los líticos más grandes presentan una concentración similar hacia la base de la capa 2b. Usualmente hay una

gradación completa en la concentración de estos grandes líticos de la base hacia la mitad de la capa 2b. Sin embargo, se pueden encontrar transiciones abruptas de tamaño de grano a lo largo de unos cuantos centímetros. La zona superior de enriquecimiento de pómez normalmente constituye menos del 10 % del espesor de la unidad de flujo. Sin embargo, en unidades de flujo particularmente delgadas esta puede llegar a ser de hasta el 50 %. La capa inferior de enriquecimiento de líticos raramente tiene más de 2 m de espesor.

La capa 2a tiene tamaño de grano más fino que la capa 2b y está presente en la base de cada unidad de flujo. Su rango de espesor va de unos cuantos centímetros a más de 1 m y esta gradada inversamente. Separa al cuerpo principal de la ignimbrita de la unidad subyacente.

La capa 3 es un estrato de ceniza de grano extremadamente fino, que sobreyace a la capa 2 en algunas ignimbritas. Aún cuando esta capa se encuentra presente, no siempre es claramente reconocible, probablemente debido a que se convierte en suelo por intemperismo subaéreo después de la erupción de la ignimbrita o es removida por erosión.

La capa 2a es muy importante, ya que su presencia ayuda a distinguir entre ignimbritas y otros depósitos pobremente clasificados tales como los depósitos de caída de ceniza cerca de su fuente; su ocurrencia en la base de cada unidad de flujo permite determinar sus límites. Su interpretación puede ser esencial para entender la reología de los flujos piroclásticos.

La capa 2a difiere de la 2b sólo por su escasez de grandes líticos y clastos de pómez; los líticos están concentrados justo por encima de la capa 2a. Esta capa parece pertenecer a un régimen de flujo piroclástico en el cual los fragmentos grandes están excluidos y del que pudieron haber sido físicamente separados. Esto, y la gradación inversa de la capa 2a, pueden deberse al grado alto de esfuerzo de cizalla y fuerzas de dispersión de grano cerca de la base del flujo.

Los grandes clastos de pómez en la parte superior de la capa 2b tienen menor densidad que la matriz, y los líticos en la parte inferior de esta capa tienen una densidad más alta. Esto

sugiere que el comportamiento de la matriz es como un fluido homogéneo en el cual los grandes clastos de pómez “flotan” literalmente en la cima mientras que los líticos grandes y densos se hunden. Esto también implica que la matriz estuvo levemente expandida en el flujo piroclástico en movimiento.

La capa 1 es interpretada como el producto de un *surge* basal (Sparks et al., 1973). En muchas nubes ardientes un *surge* de base acompaña o precede al flujo piroclástico principal, distribuyéndose más ampliamente sobre el terreno que el flujo piroclástico, el cual puede estar solamente confinado a los valles. Esto sugiere que el *surge* de base puede ser un precursor de actividad de flujos piroclásticos. Aunque el depósito de *surge* de base y la ignimbrita pueden ser producidos por la misma actividad eruptiva, es mejor mantenerlos como unidades separadas.

La capa 3 es interpretada como una ceniza de caída; este es el polvo fino de la cima de la columna eruptiva, del *surge* de base, o del flujo piroclástico durante el mismo flujo. La gran nube ascendente de material piroclástico sobre las nubes ardientes tal como se observó en Mount Pelée, se piensa que es la fuente del material de la capa 3. La capa 3 no es una parte integral de la ignimbrita; sin embargo es en parte un depósito relacionado al flujo piroclástico, y ambas son producidas por la misma actividad eruptiva.

El término nube ardiente (*nuée ardente*) ha sido aplicado a diferentes fenómenos teniendo diferentes orígenes. Dos tipos, la *nuée ardente d'explosion vulcanienne* y *nuée ardente d'explosion dirigée* de Lacroix (1930) producen depósitos los cuales están compuestos por material juvenil vesiculado, un tercer tipo la *nuée ardente d'avalanche* esta compuesta por material juvenil no vesiculado y es debida al colapso gravitacional de una parte de un flujo de lava.

Las erupciones en las cuales las ignimbritas son generadas muestran la siguiente secuencia de eventos tan comúnmente que puede considerarse como una secuencia normal. Las fases son: 1) fase Pliniana, produciendo un depósito de caída de pómez; 2) una fase Peleana, produciendo las capas 1, 2, y 3 de la Figura 26; y 3) una fase efusiva, produciendo flujos de

lava. Estas tres fases pueden no ocurrir completas; en muchas erupciones solo dos de las tres son reconocidas.

Los flujos de lodo son otros productos comunes de la erupción de ignimbritas. Estos se forman en seguida o al mismo tiempo que los flujos piroclásticos. El problema de distinguir entre una ignimbrita no soldada y un flujo de lodo rico en pómez es difícil de resolver debido a que los flujos de lodo puede también mostrar gradación inversa y haber formado una capa basal.

Solo una parte de la secuencia arriba propuesta se puede encontrar en un mismo lugar. La distribución de la pómez de caída es controlada por el viento, mientras que la distribución de la ignimbrita esta determinada por la topografía local y la dirección de eyección del material (en caso de erupciones dirigidas o colapso). Por lo tanto la ignimbrita descansa sobre su propio depósito de caída de pómez solo en una parte de su extensión. El depósito del *surge* de base puede estar distribuido radialmente desde el cráter, y en algunos sectores la pómez de caída y la ignimbrita pueden extenderse mas allá del limite del *surge* mientras que en otros no se encuentran estos depósitos.

Por último Sparks et al. (1973) proponen que esta secuencia normal representa progresivamente una mayor profundidad en los niveles de magma en la cámara magmática, y el escape de magma con progresivamente contenidos de gas más bajos conforme la erupción progresa. Este concepto es soportado por estudios teóricos (Kennedy, 1955) los cuales indican que bajo condiciones de equilibrio el contenido de agua disuelta en un magma debería incrementarse hacia arriba y alcanzar un valor máximo en la cima de la cámara magmática. Esto causa el decremento progresivo en la vesicularidad de los productos eruptivos durante el curso de la erupción (Aramaki, 1957), desde las pómez de densidad baja y altamente infladas de la fase Pliniana, pasando por las pómez más densas de la ignimbrita, hasta las lavas no vesiculadas.

III.1.2 Modelo de emplazamiento de ignimbritas de Michael J. Branney y Peter Kokelaar (1992)

Branney y Kokelaar (1992) hacen un recuento de los modelos aceptados hasta ese entonces, cuestionándolos y dando su punto de vista acerca de éstos. Proponen su propio modelo, basado en sus estudios y experiencia con flujos piroclásticos. A continuación se describe este modelo.

La característica principal de este modelo es que los estratos masivos de ignimbritas, y aparentemente unidades de flujo agregadas, pueden ser formadas por un continuo incremento en la deposición. Esto contrasta con la deposición en masa inferida anteriormente por Sparks et al. (1973). En este escenario, el soldamiento también puede ocurrir a través de la historia deposicional de un flujo, y no solamente mediante la deposición de una sola unidad de ignimbrita. Por lo tanto, la distinción entre soldamiento primario y secundario debería ser inapropiado; debido a que esto niega la posibilidad de un proceso continuo.

Walker (1983) propuso el término “grado” para referirse a la cantidad de soldamiento exhibida por las ignimbritas. Aunque esta terminología no es ampliamente usada tiene una utilidad particular, debido a que además de que refleja la historia de enfriamiento, adopta el concepto de grado *continuum* que refleja la variabilidad de la viscosidad de las partículas y la resistencia elástica durante el emplazamiento, sin implicar cuales de varios factores pueden ser la causa del fenómeno (e.g., temperatura de erupción, composición química del magma, contenido de volátiles, enfriamiento al momento del emplazamiento). El *continuum* puede ser dividido en categorías arbitrarias como ignimbritas de “extremadamente alto grado”, las cuales están intensamente soldadas aún en su parte superior y pueden incluir litofacies que son parecidas a lavas (texturalmente indistinguible de las lavas, Branney y Kokelaar, 1992); ignimbritas de “grado alto” son predominantemente soldadas y tienen zonas reomórficas; ignimbritas de “grado moderado” tienen zonas soldadas y no soldadas; ignimbritas de “grado bajo” muestran evidencias sutiles de soldamiento o ninguna, incluyen ignimbritas emplazadas a temperaturas

ambientes. El concepto de grado puede también ser usado para tobas de caída, surges, o cuerpos intrusivos.

Las ignimbritas son comúnmente consideradas como un flujo piroclástico de partículas no turbulentas de alta concentración que se detiene y se deposita en masa (e.g. Sparks, 1976; Wright and Walker, 1981; Fisher 1986; Carey, 1991). Esta interpretación fue propuesta por Sparks (1976) basada en la pobre clasificación en las ignimbritas a concentraciones altas de partículas en flujos poco expandidos, más que la turbulencia en flujos altamente expandidos. Los cuerpos de flujos piroclásticos fueron concebidos como flujos laminares o de tapón (Sparks, 1976; Wright and Walker 1981) antes de detenerse en masa, de manera similar a los modelos de flujo de escombros (Johnson 1970), para producir unidades masivas (capa 2 de Sparks, 1976) con una base inversamente gradada (capa 2a, Sparks et al., 1973).

Sin embargo, las ignimbritas son depósitos, no flujos, y su morfología y características de clasificación reflejan incompletamente al régimen de transporte. Branney y Kokelaar (1992) propusieron que la estratificación y características de clasificación de una ignimbrita reflejan principalmente el proceso deposicional de la parte basal densa del flujo y, en menor medida, el proceso de transporte del flujo entero. Por ejemplo, aunque un flujo de alta concentración densamente estratificado podría ser turbulento, la turbulencia no esta directamente involucrada en la formación del depósito resultante pobremente clasificado, ya que la deposición ocurre en las partes basales del flujo, donde la turbulencia es suprimida por la alta concentración de las partículas, gradientes de concentración, y bajas velocidades. La parte más baja del flujo tiene un comportamiento laminar y el material es aportado a esta zona desde la parte superior del flujo que si tiene un comportamiento relativamente turbulento. Ésta concentración de partículas probablemente decrece de manera más o menos continua hacia la cima del depósito. Así, sin tener en cuenta al soldamiento, las variaciones verticales en muchas ignimbritas (y en depósitos de *surges*; Valentine, 1987) probablemente reflejan cambios en los procesos deposicionales (e.g., límite de capa), más que en los procesos de transporte (e.g., por deposición instantánea en masa).

Según Branney y Kokelaar (1992) el zonamiento en las ignimbritas, incluyendo capas masivas, se debe a una “agradación progresiva” en la base del flujo que viene continuamente de la fuente en una erupción en la cual la erupción del magma cambia con el tiempo, esto refleja un flujo ligeramente inestable durante el proceso de agradación progresiva.

Las ignimbritas, incluyendo las partes masivas (capa 2), registran una agradación progresiva debida a una corriente sostenida. La corriente puede ser cualquiera, desde corrientes de relativa corta vida, que rápidamente depositan ignimbritas delgadas, a corrientes de larga vida que persisten durante la duración de el colapso de una columna (posiblemente varias horas; e.g. Sparks et al. 1978) la cual deposita una ignimbrita gruesa, incrementándose en relación directa a la duración de la columna. En todos estos casos la ignimbrita es acumulada por agradación progresiva; la estratificación refleja cambios en la tasa de eyección del flujo, y en el material proporcionado por la fuente.

Una clasificación de grano pobre refleja una deposición rápida. En las partes masivas de ignimbritas, las pómez inversamente gradadas registran la flotabilidad de las pómez dentro del límite de capa deposicional. La gradación normal de líticos registra cambios en el aporte de líticos a la capa respectiva, debido al decaimiento del flujo y posiblemente también debido al decremento en el aporte de líticos del conducto por erosión de las paredes de roca, y del paisaje que es progresivamente quemado por la toba. Los líticos grandes y densos pueden ser transportados a distancias considerables por la combinación de los fenómenos de flotabilidad, saltación, rodamiento, y pueden ser parcialmente atrapados en la cima del límite de capa deposicional, antes de detenerse en la base de la capa deposicional. Las capas basales inversamente gradadas registran fuerzas dispersivas que afectan principalmente a los clastos grandes, capas pobremente clasificadas de ceniza y lapilli corren a lo largo de la superficie del sustrato por tracción (Lowe 1982). Flujos no constantes pueden producir una variedad de patrones, por fluctuación de concentración y gradientes de velocidad en las capas deposicionales.

La deposición dentro de una capa puede ocurrir de dos maneras diferentes, 1) agradación escalonada y 2) agradación gradual (Fig. 27).

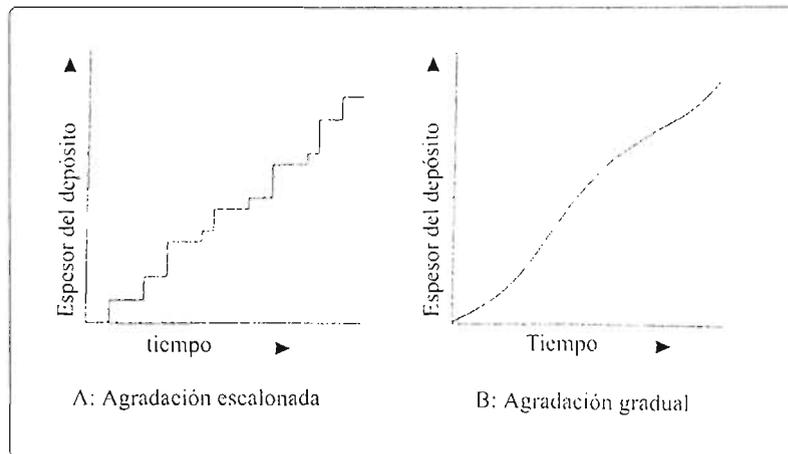


Fig. 27.- Dos tipos de agradación en un flujo piroclástico (tomado de Branney et al., 1992)

La agradación escalonada consiste en acumulaciones sucesivas “en masa” que originan capas. Cada capa, como la parte basal del flujo, adquiere resistencia elástica debido a la fricción y/o a la adhesión entre sus partículas. Cada escalón agradacional tiende a producir una capa inversamente gradada (capa 2a de Sparks, 1976).

La agradación gradual está dada por la sedimentación rápida de granos individuales para formar un depósito masivo (capa 2b de Sparks, 1976). La agradación gradual de una capa masiva ocurre durante un flujo más sostenido en el cual la base del flujo está suficientemente concentrada para desarrollar una zona de deposición de “fluido-lento” adyacente a la superficie del sustrato. Debido a que la turbulencia es suprimida en esa zona, los granos en la base del flujo (inmediatamente encima del sustrato) se depositarán, siendo insuficiente la fuente del fluido subyacente (gas) para provocar levantamiento, o prevenir la deposición friccional. Entradas fluctuantes del régimen deposicional de la parte cabalgante del flujo parece la causa de la alternancia entre la agradación progresiva gradual y escalonada la cual produce un depósito que comprende varias capas. Cada capa podría

haber sido interpretada convencionalmente como la capa 2 de Sparks (1976) pero todas ellas fueron acumuladas durante un flujo único.

III.2 Comparación entre los modelos de emplazamiento de ignimbritas con la Ignimbrita SMC

Después de haber estudiado los modelos principales de emplazamiento de ignimbritas, procedemos a hacer una comparación con la ignimbrita San Miguel Cañadas.

Esta ignimbrita presenta en algunas secciones estratigráficas un depósito de *surge* basal, el cual tiene espesores variables en cada una de las secciones estratigráficas, como se muestra en la siguiente tabla:

Sección estratigráfica	Espesor del <i>surge</i> basal (m)	Distancia al cráter (km)
San Miguel Cañadas (S4)	1.4	3
La Loma II (S8)	0.7	3.5
Las Cabañas (S24)	1.5	3
La Rosa (S28)	0.3	11

Tabla 1.- Espesor del *surge* basal relacionado a la ignimbrita San Miguel Cañadas.

Este tipo de depósito (Fig. 28) se puede relacionar con la capa 1 de Sparks et al. (1973). La ausencia de este horizonte en las demás secciones estratigráficas se puede deber a la naturaleza misma del emplazamiento de este tipo de flujo, es decir que estos depósitos tienden a rellenar bajos topográficos. Otra causa muy probable es que el flujo fue dirigido solo hacia un sector y es por eso que no se encuentra a todo alrededor de la fuente. La combinación de estos dos factores es muy factible.

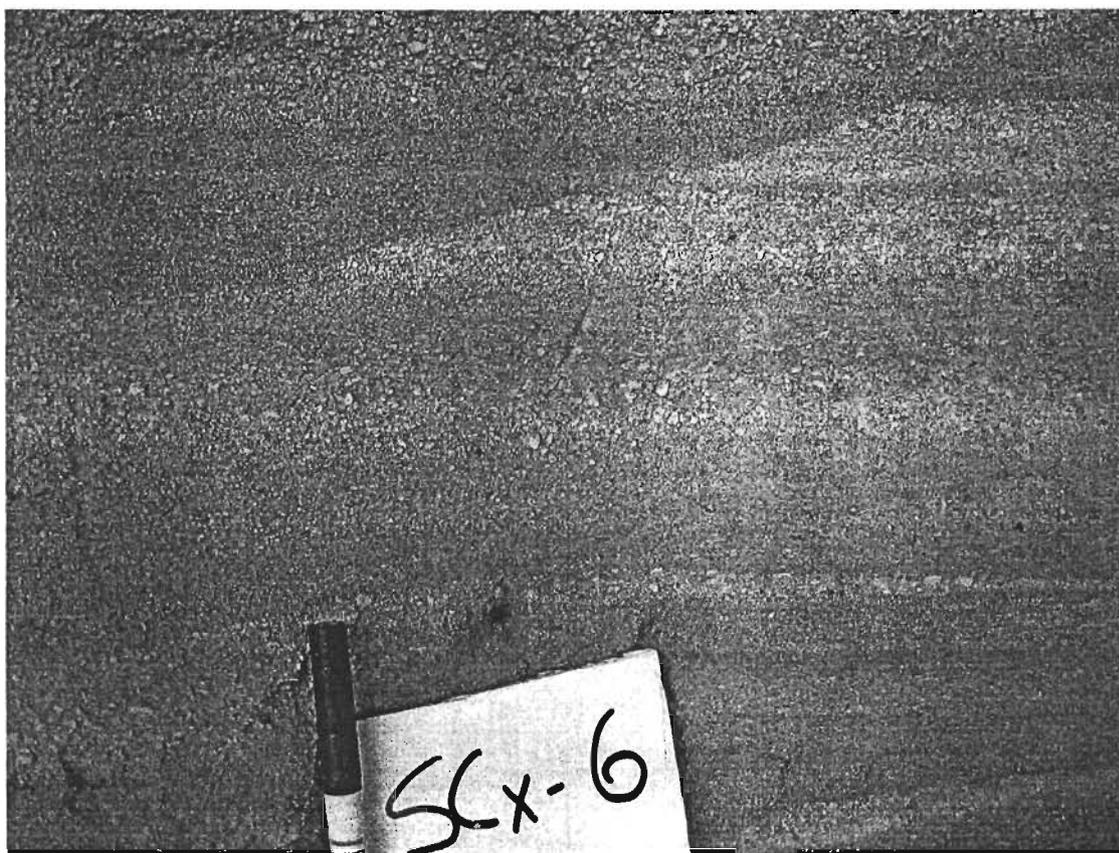


Fig. 28.- Depósito de *surge*; este se presenta en la base de la ignimbrita San Miguel Cañadas, sección San Miguel Cañadas (S4) (véase ubicación en Anexo 1 y Anexo 3).

El cuerpo principal de la ignimbrita muestra gran variedad de espesores debido a que en varias secciones no se observa la base, y en otras, la parte superior ha sido erosionada o se encuentra intemperizada. El espesor máximo es de 61 m en las zonas cercanas a la fuente. En las secciones estratigráficas La Rosa (S28) (Fig. 23) y El Gavillero (S3) (Fig. 15) se observa que los clastos de pómez se encuentran en mayor proporción hacia la cima del cuerpo de la ignimbrita. Este acomodo se observó solo en dos de las 15 secciones estratigráficas medidas. No se observa una disposición clara de las capas 2a y 2b de Sparks et al. (1973). Un emplazamiento de tipo agradacional como lo describe Branney y Kokelaar (1992) es más probable puesto que en algunas secciones se aprecian horizontes con mayor proporción de líticos que en otros.

Esta ignimbrita se caracteriza por tener gran cantidad de clastos líticos, presenta una mala clasificación ya que se pueden encontrar líticos desde tamaño de arena, hasta bloques de más de 1.5 m de diámetro en un mismo afloramiento. Estos líticos se encuentran a lo largo de todo el cuerpo de la ignimbrita, tanto en las zonas cercanas a la fuente como en las distales, excepto en las secciones estratigráficas S28 y S3, donde se observa una mayor densidad en el número de clastos de pómez hacia la cima, como se menciona anteriormente.

Otra característica de esta ignimbrita es la presencia de depósitos de avalancha en las zonas adyacentes a la fuente, lo cual nos indica que hubo un colapso de las paredes del volcán provocado por la misma actividad eruptiva que formó a la ignimbrita SMC.

Debido a estas características, la ignimbrita San Miguel Cañadas no se puede catalogar dentro de un sólo modelo, ya que esta ignimbrita presenta características que coinciden tanto con el modelo de Sparks et al., (1973) como con el de Branney y Kokelaar (1992).

CAPÍTULO IV

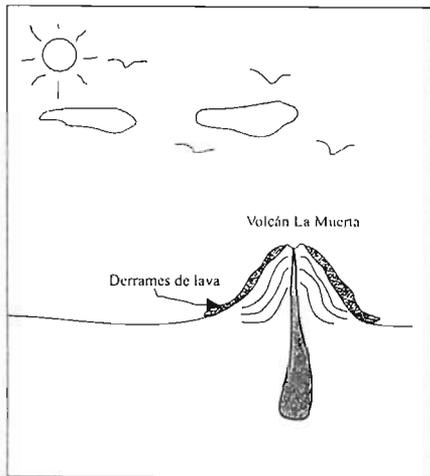
EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

IV.1 Formación de la caldera La Muerta

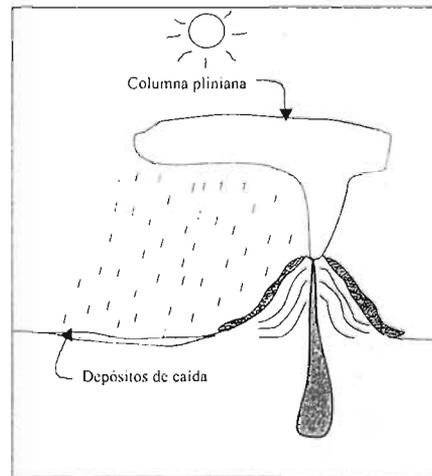
La caldera La Muerta constituye la estructura volcánica más importante en el área de estudio. Esta caldera está abierta hacia el W, tiene un diámetro inferido de aproximadamente 4 x 6 km de forma elíptica. Es la fuente de varios de los productos piroclásticos localizados a los alrededores de esta caldera.

La caldera La Muerta es producto del colapso lateral que le ocurrió a un estratovolcán andesítico-dacítico antiguo, el volcán La Muerta (Fig. 29). El volcán La Muerta se edificó por la acumulación de una serie de domos, derrames de lava de composición andesítica-dacítica y depósitos piroclásticos durante el Plioceno temprano. El volcán La Muerta creció en volumen y se desarrolló como un estratovolcán de grandes proporciones. Posteriormente, el flanco occidental del volcán colapsó probablemente siguiendo un patrón similar a la erupción del Mount Saint Helens, Washington en 1980. Este colapso produjo flujos piroclásticos (*surges* e ignimbritas), y al menos una avalancha de escombros, todos asociados al derrumbe del flanco W del volcán, así como depósitos de caída tanto de lapilli de pómez como de ceniza relacionados a una columna eruptiva tipo pliniana. Después del emplazamiento de estos depósitos, o tal vez al mismo tiempo, parte de este material fue removido por agua produciendo lahares que fluyeron hacia el sur del área de estudio. Finalmente, en una fase post-caldera se emplazaron domos de composición dacítica-andesítica en el anillo y dentro de la estructura de colapso, formándose así el complejo volcánico al que llamamos la Caldera La Muerta.

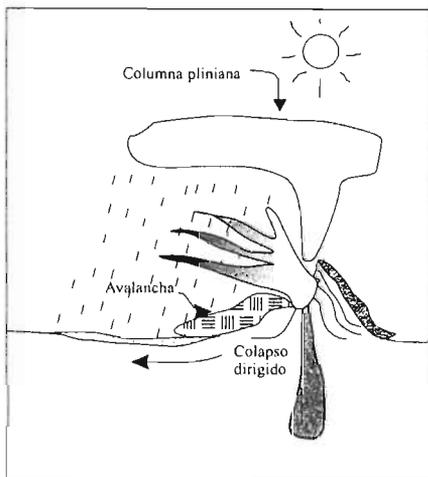
Debido al emplazamiento de los domos post-caldera, la cicatriz que conformaba la traza de la caldera se pierde hacia el norte de ésta, y el escarpe formado por la caldera sólo se ve en el sector sur. La traza de la caldera se infirió mediante la interpretación de fotografías aéreas.



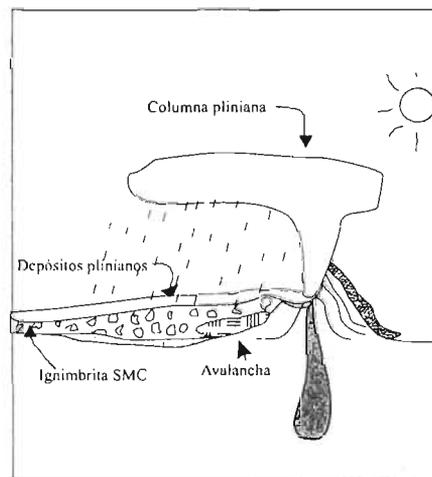
Fase 1.- Desarrollo del volcán La Muerta, compuesto por derrames y domos de composición andesítica (plioceno temprano).



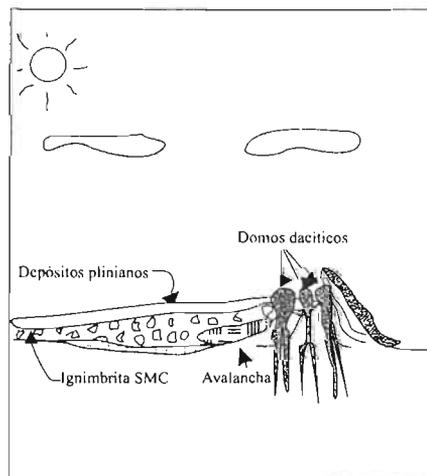
Fase 2.- Continúa la actividad volcánica con columnas tipo pliniano.



Fase 3.- Colapso sectorial del volcán La Muerta hacia el W.



Fase 4 - Emplazamiento de la ignimbrita San Miguel Cañadas y depósitos plinianos.



Fase 5.- Emplazamiento de domos dacíticos en la periferia y dentro del cráter.

Fig. 29.- Croquis que muestra la evolución volcánica de la caldera La Muerta.

IV.2 Emplazamiento de la Ignimbrita San Miguel Cañadas

La ignimbrita San Miguel Cañadas es posiblemente el producto más importante al momento de la formación de la caldera La Muerta. Este depósito piroclástico se emplazó al tiempo de colapso de la pared occidental de la estructura volcánica antigua (fase 3, Fig. 29) Con el colapso posiblemente se produjo una explosión (*blast*) y un depósito piroclástico basal de tipo “*surge*”. Enseguida se emplazó el depósito que forma el cuerpo principal de la ignimbrita (fase 4, Fig. 29), éste está compuesto por ceniza de pómez y su característica principal es que presenta gran cantidad de líticos de lavas de composición dacítica-andesítica de hasta 1.5 m de diámetro. Se cree que estos bloques de lava pertenecieron a las paredes del volcán y fueron acarreados por la nube de ceniza y depositados junto con el cuerpo de la ignimbrita.

También se produjo durante el colapso lateral un depósito de avalancha (fase 4, Fig. 29), el cual ocurre intercalado con la ignimbrita SMC en las partes proximales a la caldera.

La ignimbrita SMC cubre un área de aproximadamente 264 km² y se estimó un volumen físico de 6.3 km³ con base a los espesores medidos en varias secciones estratificadas. Al N-NW se emplazó a una distancia de hasta 9 km, y se puede observar el frente del depósito con un espesor de 20 m; al oeste, a 17 km del centro de la caldera, se encuentra desplazada por una falla normal con orientación NE-SW y con el bloque caído hacia el NW. La falla pone a esta ignimbrita en contacto lateral con depósitos piroclásticos más recientes provenientes de otras fuentes, en esta zona los espesores medios fueron de 25 m (sección La Rosa (S28), Fig. 8). Al S-SW de la caldera no se aprecian los espesores completos, ya que en la mayoría de los sitios donde aflora la ignimbrita no se observa la base. En esta zona, se aprecia el mismo material que conforma la ignimbrita SMC pero, en varios afloramientos, presenta una matriz con apariencia lodosa y clastos líticos subredondeados a redondeados, estas características sugieren que hubo una remoción de la ignimbrita por agua produciendo depósitos de lahares que conservan el mismo material piroclástico (véase

Anexo 3). Por los motivos señalados, el volumen estimado de 6.3 km^3 es considerado como un valor mínimo del material eyectado en la erupción que formó la caldera.

IV.3 Correlación estratigráfica de la ignimbrita SMC y su posición con respecto a depósitos de la misma fuente, y de otras fuentes cercanas

La relación estratigráfica que guarda la ignimbrita San Miguel Cañadas con otros depósitos piroclásticos y lacustres es muy variable, y depende de la ubicación en el área (Fig. 30).

Hacia el NW de la caldera La Muerta, y en menor medida hacia el W de la misma, sobreyace de manera concordante a una secuencia de depósitos de caída y flujos piroclásticos (toba La Loma, Fig. 10). En otras secciones como en la sección Toriles (S29) (para localización véase Anexo 2 y Anexo 3) la ignimbrita SMC presenta en la base una zona de mezcla de esta ignimbrita con depósitos fluvio-lacustres, el contacto con el cuerpo principal de la ignimbrita es erosional. Los depósitos que se encuentran por debajo de esta zona son conglomerados fluvio-lacustres, capas arenosas con estratificación cruzada y horizontes arcillosos (Sección La Loma I (S7), Fig. 10 y sección El Gavillero (S3), Fig. 20). Hacia el sur existen pocos afloramientos, en donde se aprecia solamente la parte superior de la ignimbrita San Miguel Cañadas. En esta zona esta sobreyacida por depósitos de caída intercalados con flujos piroclásticos (depósito de caída Las Moras y Toba Cisneros) (véase Anexo 3).

Después de estos eventos se emplazaron sobre parte de éstos depósitos, lahares, depósitos de caída, ignimbritas pumíticas y depósitos de bloques y cenizas (toba La Capilla y toba Villa del Carbón) provenientes de la Caldera de la Catedral, que se ubica a 22 km al SW de la caldera La Muerta (véase Anexo 3).

Por último, la región fue afectada por fallamiento normal en varias direcciones. Así, en esta zona hay una serie de basculamientos y desplazamientos de secuencias volcánicas por fallas normales, principalmente con rumbo SW-NE, con bloques caídos hacia el NW (véase Anexo3).

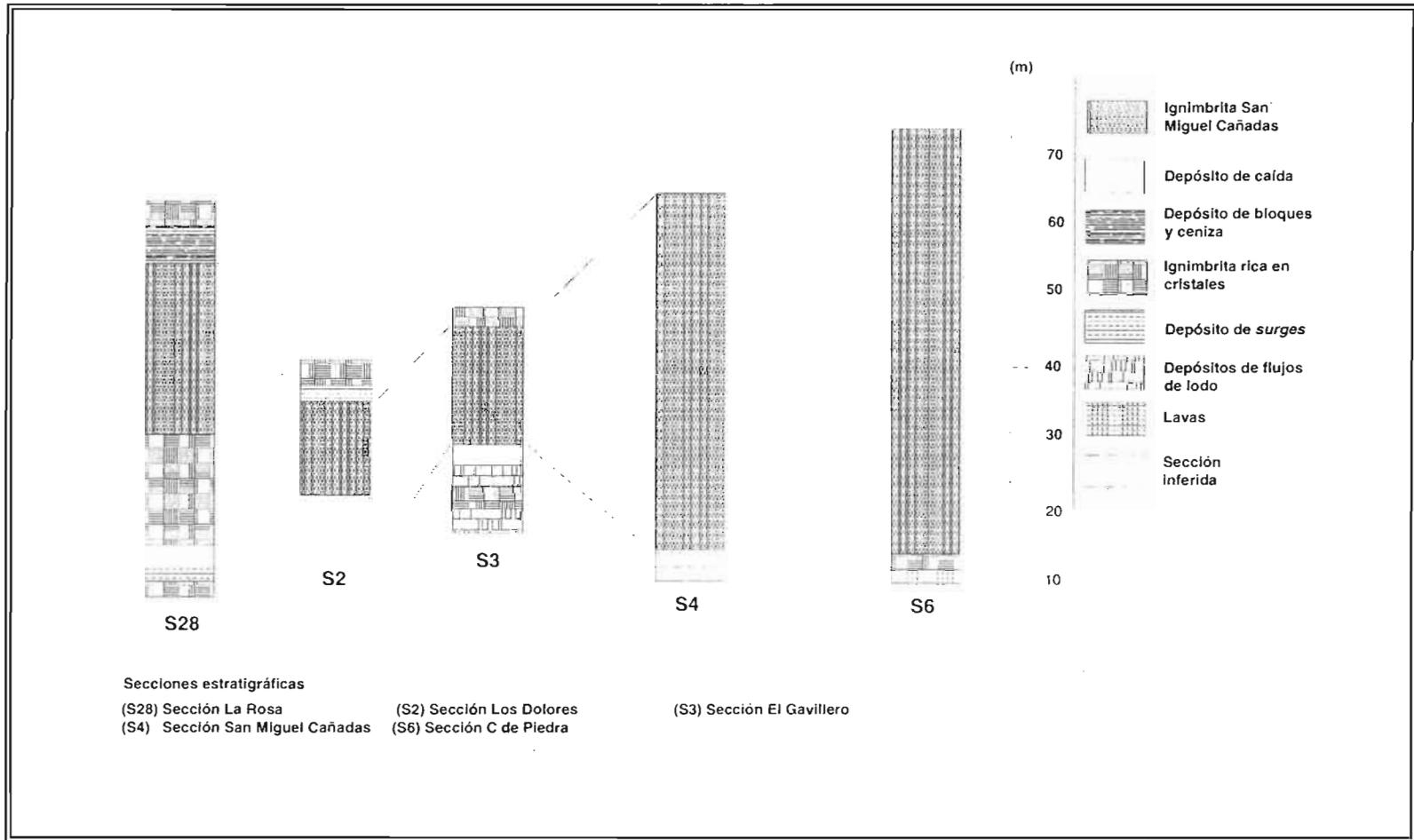


Fig. 30.-Correlación estratigráfica de la Ignimbrita San Miguel Cañadas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Se realizó un mapa geológico de la zona norte de la Sierra de las Cruces que cubre un área de 1058 km². En el cual predominan depósitos de flujos piroclásticos y de caída del tipo pliniano, asociados a vulcanismo explosivo. Además se identificaron varios domos de composición intermedia a ácida, y derrames de lavas asociadas con el desarrollo del volcán La Muerta. Se definieron 13 unidades geológicas y se determinó su edad relativa, las unidades informales se enlistan a continuación desde la más antigua a la más joven:

- Domos dacíticos-andesíticos del Plioceno temprano.
- Volcán La Muerta.
- Toba La Rosa.
- Toba San Martín.
- Toba Buenaventura.
- Toba La Loma.
- Ignimbrita San Miguel Cañadas
- Depósitos de flujos de lodo.
- Depósitos de caída Las Moras.
- Toba Cisneros.
- Toba La Capilla.
- Domos dacíticos post-colapso.
- Toba Villa del Carbón.

Se midieron 28 secciones estratigráficas, de las cuales 15 pertenecen a la ignimbrita San Miguel Cañadas.

La ignimbrita San Miguel Cañadas (SMC) cubre un área de 264 km² y de acuerdo a los espesores medidos se estimó un volumen mínimo de 6.3 km³. La ignimbrita SMC es

especialmente rica en líticos derivados del volcán antiguo La Muerta y presenta facies de depósitos de avalancha. De acuerdo a su posición estratigráfica se estimó una edad del Plioceno tardío (comunicación personal del Dr. Aguirre-Díaz, 2005).

Por su distribución y características físicas, la ignimbrita SMC aparentemente se formó durante una erupción pliniana que causó el colapso de parte del volcán andesítico La Muerta. Este evento dejó una cicatriz amplia con forma de herradura abierta hacia el W. Este rasgo marca parte de la traza de la caldera La Muerta. Posterior al colapso, se emplazaron algunos domos de composición intermedia en el anillo y dentro de la caldera. Los domos escondieron parcialmente la cicatriz de colapso.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer estudios geoquímicos en muestras de roca y hacer las interpretaciones correspondientes para tener una mayor certeza de la composición química de las rocas volcánicas del área de estudio.
- Se sugiere realizar fechamientos radiométricos para determinar las edades de las rocas en el sector norte de la Sierra de las Cruces, así como para tener un mejor entendimiento de la historia evolutiva de ésta sierra como parte de la FVTM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Vargas, V.H., y Verma, S.P., 1987, Composición química (elementos mayores) de los magmas del Cinturón Volcánico Mexicano; *Geofísica Internacional*, v. 26, p. 273-290.
- Aguirre-Díaz, G.J., 2001, Calderas of the central Mexican Volcanic Belt. Reunión Anual de la American Geophysical Union, *Eos Transactions American Geophysical Union*, v. 82 (47), Fall Meeting Suppl., Abstract V32D-1020, p. F1350.
- Aguirre-Díaz, G.J., 2003a, Características generales del Cinturón Volcánico Mexicano. Una revisión por sectores (Parte 1 de 2): Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, *Geos*, v. 23, p. 118-119.
- Aguirre-Díaz, G.J., 2003b, Características generales del Cinturón Volcánico Mexicano. Una revisión por sectores (Parte 2 de 2): Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, *Geos*, v. 23, p. 119.
- Aguirre-Díaz, G.J., 2004a, Neogene-Quaternary continental margin volcanism. The Mexican Volcanic Belt: The Amealco and Huichapan calderas and related ignimbrites: IAVCEI Workshop, Mexico 2004, 46 p.
- Aguirre-Díaz, G.J., 2004b, Ignimbrites and calderas of the central sector of the Mexican Volcanic Belt. *In: Neogene Quaternary Continental Margin Volcanism - Proceedings of the GSA Penrose Conference at Metepec, Puebla, Mexico 2004*, G.J. Aguirre-Díaz, J.L. Macías, and C. Siebe, eds., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, México, D.F., Publicación Especial No. 2, p. 1.
- Aguirre-Díaz, G.J. y Carrasco-Hernández, J., 1999, Erupciones asociadas a colapsos sectoriales dirigidos en el sector septentrional de la Sierra de las Cruces norte. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana 1999, *Geos*, v. 19, p. 319.
- Aguirre-Díaz, G.J., Carrasco-Hernández, J., y López-Martínez, M., 1999, Nuevas calderas en el sector central del Cinturón Volcánico Mexicano. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana 1999, *Geos*, v. 19, p. 318.
- Aguirre-Díaz, G.J., Nelson, S. A., Ferrari, L., López-Martínez, M., 1997, Ignimbrites of the central Mexican Volcanic Belt, Amealco and Huichapan calderas (Querétaro-Hidalgo). *In: Aguirre-Díaz, G.J., Aranda-Gómez, J.J., Carrasco-Núñez, G., Ferrari, L, eds., "Magmatism and Tectonics of central and northwestern Mexico - A selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions": México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Excursión 1, p. 1-39.*
- Aguirre-Díaz, Ferrari, L., Nelson, S., Carrasco-Núñez, G., López-Martínez, M. y Urrutia-Fucugauchi J., 1998, El Cinturón Volcánico Mexicano: Un proyecto

- multidisciplinario; GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A.C., v. 18, No. 2, p. 131-138.
- Aramaki, S., 1957, The 1783 activity of Asama volcano, Pt. II: Japanese Journal of Geology and Geography, v. 28, p. 11-33.
- Aramaki, S., 1961, Classification of pyroclastic flows: International Geology Review, v.3, p. 518-524.
- Aramaki, S., and Yamasaki, M., 1963, Pyroclastic flows in Japan: Bulletin Volcanologique, v. 26, p. 89-99.
- Branney, Michael J., y Kokelaar, Peter; 1992, A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to non-particulate flow during emplacement of high-grade ignimbrite, Bull Volcanol, 54: 504-520.
- Carey, S.N., 1991, Transport and deposition of tephra by pyroclastic flows and surges. In: Fisher, R.V. and Smith, G.A. (eds) Sedimentation in Volcanic Settings SEPM, special publications, 45, 39-57.
- Carrasco-Hernández, J., 1999, Ignimbritas, lahares y colapsos de la región de Taxhimay, del sector septentrional de la Sierra de las Cruces; Tesis de licenciatura; Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., 65 pags.
- Carrasco-Hernández, J., Aguirre-Díaz, G.J., y Nieto-Obregón, J., 1999, Análisis estructural de alineamientos de trazas de falla potenciales en el sector septentrional de la Sierra de las Cruces. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana 1999, Geos, v. 19, p. 314.
- Carrasco-Nuñez, G. y Gómez Tuena, A., 1997, Volcanogenic Sedimentation around Citlaltépec volcano (Pico de Orizaba) and surroundings, Veracruz, México. In: Aguirre-Díaz, G.J.; Aranda-Gómez, J.J.; Carrasco-Nuñez, G.; and Ferrari, L., (eds), Magmatism and tectonics in central and northwestern México – a selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions; Mexico, DF., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Excursión 16, p. 131-151.
- Carranza-Castañeda, O. y Espinoza-Arrubarena, L., 1994, Late Tertiary Equids from the State of Hidalgo; México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, revista, vol. 11, p. 182-192.
- Davies, G. A., 1980, problems of intraplate extensional tectonics, western United States, in Continental tectonics: Washington, DC, Nat. Acad. Sci. Stud. Geophys., p.84-95.
- De Cserna, Z., 1971, Precambrian sedimentation, tectonics, and magmatism in Mexico: Geol. Rundschau, v. 60, p. 1488-1513.

- Demant, A., 1978, Características del eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, vol. 2, num. 2, p. 172-187.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre Díaz, G.J. y Carrasco Nuñez, G., 1999, Space-time patterns of Cenozoic arc Volcanism in Central México: From Sierra Madre Occidental to Mexican Volcanic Belt; *Geology*, vol. 27, p 303-306.
- Fisher, R. V., 1986, Systems of transport and deposition within pyroclastic surges: evidence from Mount St. Helens, Washington. *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 67:1246.
- Johnson, A. M., 1970, *Physical processes in geology*. Freeman Cooper, San Francisco, California, pp 1-577.
- Johnson, C.A. y Harrison, C.G.A., 1990 *Neotectonics in Central Mexico; Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, p. 187-210.
- Kennedy, G.C., 1955, Some aspects of the role of water in rock melts: *Geol. Soc. America Spec. Paper* 62, p.489.
- Lacroix, A., 1930, Remarques sur les matériaux de projection des volcans et sur la g n se des roches pyroclastiques qu'ils constituent (Jubilee volume): *Soc. Géol. France*, v. 2, p.431.
- Lauber, P., 1987, *Volcano: The eruption and Healing of Mount St. Helens*; Ed. The Trumpet Club, United States of America, 60 pags.
- Lindsay, E. H., Opdyke, N.M. y Johnson, N.M., 1984, Blancan-Hemphillian land mammal ages and lateCenozoic mammal dispersal events; *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 12,p. 445-488.
- Lipman, P. y Mullineaux, D., 1982, *The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington*; Ed. United States Government Printing Office, Geological Survey Professional Paper 1250, 844 pags.
- Lowe, D. R., 1982, Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to high-density turbidity currents. *J. Sed. Petrol.* 52: 279-297.
- Macias, J.L., García, P.A., Arce, J.L., Siebe, C., Esp ndola, J.M., Komorowski, J.C. y Scott, S., 1997, Late Pleistocene-Holocene Cataclysmic Eruptions al Nevado de Toluca and Jocotitlán Volcanoes, Central México; *BYU, Geology studies*, vol. 42, part 1, p. 493-528.

- Márquez, a., Oyarzun, R., Doblas, M., and Verma, S. P., 1999, Alkalic (OIB-type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican Volcanic Belt: A case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin?: *Geology*, v. 27, p. 51-54.
- Menard, H. W., 1955, Deformation of the northeastern Pacific basin and the west coast of North America: *Geol.Soc. Amer. Bull.*, v. 86, p.99-110.
- Moore, J. G., 1967, Base surge in recent volcanic eruptions: *Bulletin Volcanologic*, v. 30, p. 337-363.
- Moore, J. G., and Melson, W. G., 1969, Nuées ardentes of the 1968 eruption of Mayon volcano, Philippines: *Bulletin Volcanologique*, v. 33, p. 600-620.
- Moore, G., Marone, C., Carmichael, I. S.E., y Renne, P., 1994, Basaltic volcanism end extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt: *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 106, p. 383-394.
- Mooser, F., 1969, The Mexican Volcanic Belt - structure and development. Formation of fractures by differential crustal heating: *Pan Amer. Symp. Upper Mantle, Mexico*, v.2, p. 15-22.
- Mooser, F., and Maldonado, M.K., 1961, Pene-Contemporaneous tectonics along the Mexican Pacific coast: *Geofis. Int.*, v.1, p. 1-20.
- Mooser, F., Montiel, A. y Zuñiga, A., 1996, Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla: *Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos; México, Comisión Federal de Electricidad, primera impresión, Atlas, 27 pags.*
- Mora Alvarez, G., Caballero Miranda, C., Urrutia Fucugauchi, J., Uchiumi, Sh., 1991, Southward migration of volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Basin of Mexico? – A preliminary K-Ar dating and palaeomagnetic study: *Geofísica Internacional*, 30, 2, 61-70.
- Nixon, G.T., Demant, A., Armstrong, R.L., y Harakal, J. E., 1987, K-Ar and Geological data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt; *Geofísica Internacional, Special volume on the Mexican Volcanic Belt, part 3*, p 109-158.
- Pardo, M., y Suárez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern México: Seismic and Tectonic Implications; *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, N°. B7, p. 12, 357- 12, 377.
- Robin, C., 1982, Mexico, in Thorpe, R. S., ed., *Andesites: John Wiley*, p.137-147.
- Ross, C. S., and Smith, R. L., 1961, Ash-flow tuffs, their origin, geologic relations and identification: *U.S. Geol. Survey Prof. Paper 366*.

- Sheridan, Michael F.; 1979, Emplacement of pyroclastic flows: A review, Geological Society of America, Special Paper 180, p.125-136.
- Sheth H. C., Torres-Alvarado I. S., Verma S. P. (2000): Beyond subduction and plumes: a unified tectonic-petrogenetic model for the Mexican Volcanic Belt. *Int. Geol. Rev.*, 42, 1116-1132.
- Shubert, D.H., and Cebull, S. E., 1984, Tectonic interpretation of Trans-Mexican Volcanic Belt: *Tectonofisics*, v. 101, p. 159-165.
- Siebe, Claus, Komorowski, Jean-Christophe, Sheridan, Michael F., 1992, Morphology and emplacement of an unusual debris-avalanche deposits at Jocotitlán volcano, central Mexico: *Bulletin of Volcanology*, 54, 573-589.
- Siebe, C., Macias, J.L., Abrams, M., Elizarraras, R.S., y Delgado, H., 1995, Quaternary Explosive Volcanism and Pyroclastic Deposits in East Central Mexico: Implications for Future Hazards; Geological Society of Annual Meeting 1995, New Orleans, Louisiana Field Trip Guide Book 1, 47 p.
- Singh, S.K. y Pardo, M., 1993, Geometry of the Benioff zone and state of stress in the overriding plate in central Mexico; *Geophys. Res. Lett.*, 20, p.1483-1486.
- Smith, R.L., 1960, Ash flows: *Geological Society of America Bulletin*, v. 71, 795-842.
- Sparks, R. S. J., 1976, Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows: *Sedimentology*, v. 23, p. 147-188.
- Sparks, R.S.J., Self, S., y Walker, G.P.L.; 1973, Products of ignimbrite Eruptions; *Geology*, V.1. p.115-11.
- Sparks, R.S.J., Self, S., y Walker, G.P.L.; 1977, The significance of vitric-enriched air-fall ashes associated with crystal-enriched ignimbrites: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 2, p. 329-341.
- Sparks, R. S. J., Wilson, L., Hulme, G., 1978, Theoretical modeling of the generation, movement and emplacement of pyroclastics flows by column collapse. *J. Geophys. Res.* 83: 1727-1739.
- Suárez, G., Monfret, T., Wittlinge, G. y David, C., 1990, Geometry of subduction and depth of the seismogenic zone in the Guerrero gap, Mexico; *Nature*, p.345, 336-338.
- Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., y Farrar, E., 1995, The Acambay graben: Active intra-arc extension in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico; *Tectonics*, vol. 14, N° 5, p 1245-1262.

- Urrutia-Fucugauchi, J., y Del Castillo, L., 1977, Un Modelo del Eje Volcánico Mexicano; Boletín sociedad Geológica, México, v. 38, p. 18-28.
- Valentine, G. A., 1987, Stratified flow in pyroclastic surges. Bull Volcanol 49: 616-630.
- Von Humboldt, A., 1808, Essai politique sur le Royaume de la Nouvelle Espagne: Paris: F. Schoell, 905 p.
- Walker, G. P. L., 1983, Ignimbrite types and ignimbrite problems. J Volcanol Geotherm Res 17: 65-88.
- Waters, A. C., and Fisher, R. V., 1971, Base surges and their deposits: Capelinhos and Taal volcanoes: Journal of Geophysical Research, v. 76, p. 5596-5614.
- Wright, J. V., and Walker, G. P. L., 1977, The ignimbrite source problem: Significance of a co-ignimbrite lag-fall deposit: Geology, v. 5, p. 729-732.
- Wright, J. V., and Walker, G. P. L., 1981, Eruption, transport and deposition of ignimbrite: a case study from Mexico. J Volcanol Geotherm Res 9: 111-131.

ANEXO 1

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS MUESTRAS DE ROCA RECOLECTADAS EN CAMPO

N° de Muestra	Latitud N (°)	Longitud W (°)	Coordenadas UTM X	Coordenadas UTM Y	Litología/unidad	Interpretación
zona de gradícula: 14Q						
sc-150	19° 48.987'	99° 14.471'	474773	2190988	volcán La Muerta	peperitas
sc-151	19° 48.987'	99° 14.471'	474773	2190988	toba Cisneros	ignimbrita
sc-152	19° 43.983'	99° 14.137'	475348	2181770	volcán La Muerta	derrame
sc-153	19° 41.900'	99° 16.723'	470824	2177920	domo post-colapso	domo
sc-154	19° 41.894'	99° 17.257'	469888	2178852	domo post-colapso	domo
sc-155	19° 41.894'	99° 17.349'	469778	2177935	toba Cisneros	surges
sc-156a	19° 43.471'	99° 24.943'	456475	2180841	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-156b	19° 43.471'	99° 24.943'	456475	2180841	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-156c	19° 43.471'	99° 24.943'	456475	2180841	ignimbrita SMC	lítico
sc-157a	19° 43.276'	99° 25.126'	456147	2180494	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-157b	19° 43.276'	99° 25.126'	456147	2180494	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-157c	19° 43.276'	99° 25.126'	456147	2180494	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-157L	19° 43.276'	99° 25.126'	456147	2180494	ignimbrita SMC (lítico)	ignimbrita
sc-158a	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	toba La Loma	ignimbrita
sc-158b	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	toba la Loma	depósito de caída
sc-158c	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	toba La Loma	lapilli de pómez
sc-158d	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	toba La Loma	depósito de ceniza
sc-158e	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-158f	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-158g	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	ignimbrita SMC	ignimbrita

sc-158h	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	toba Las Moras	depósito de caída
sc-159	19° 40.805'	99° 22.450'	460812	2175911	toba Cisneros	ignimbrita
sc-160	19° 38.802'	99° 25.895'	454786	2172246	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-161	19° 43.066'	99° 26.685'	453426	2180112	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-162a	19° 43.904'	99° 21.352'	462743	2181636	ignimbrita SMC	Ignimbrita lítica
sc-162b	19° 43.904'	99° 21.352'	462743	2181636	ignimbrita SMC	ignimbrita lítica
sc-163	19° 43.642'	99° 21.123'	463144	2181150	surges ignimbrita SMC	surges
sc-164	19° 42.798'	99° 20.228'	464704	2179588	domo post-colapso	domo
sc-165	19° 42.635'	99° 19.799'	464450	2179289	domo post-colapso	domo
sc-166	19° 44.776'	99° 21.132'	463134	2183245	domo post-colapso	domo
sc-167	19° 44.734'	99° 21.290'	462856	2183162	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-168	19° 48.874'	99° 21.311'	462802	2190871	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-169	19° 48.874'	99° 21.311'	462802	2190871	toba La Loma	deposito de caída
sc-170	19° 48.874'	99° 21.311'	462802	2190871	toba La Loma	Ignimbrita
sc-171	19° 48.874'	99° 21.311'	462802	2190871	toba La Loma	surges
sc-172	19° 48.874'	99° 21.311'	462802	2190871	toba Buenaventura	Ignimbrita
sc-173	19° 47.317'	99° 22.152'	461331	2187995	toba Buenaventura	ignimbrita
sc-174	19° 47.173'	99° 20.970'	463421	2187713	toba Buenaventura	ignimbrita
sc-175	19° 47.173'	99° 20.970'	463421	2187713	toba Buenaventura	ignimbrita
sc-176	19° 47.174'	99° 21.155'	463067	2187738	ignimbrita SMC	avalancha
sc-177	19° 48.891'	99° 19.574'	465833	2190895	toba Buenaventura	ignimbrita
sc-178	19° 48.865'	99° 19.613'	465763	2190846	domo post-colapso	domo
sc-179	19° 49.447'	99° 20.206'	464733	2191924	toba Buenaventura	ignimbrita
sc-180	19° 49.431'	99° 20.224'	464702	2191894	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-181	19° 49.419'	99° 20.223'	464702	2191872	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-182	19° 50.553'	99° 22.458'	460804	2193970	domo la presa	domo
sc-183	19° 47.731'	99° 23.327'	459278	2188771	toba Cisneros	ignimbrita
sc-184	19° 47.799'	99° 23.330'	459273	2188895	ignimbrita SMC	ignimbrita

sc-185	19° 47.746'	99° 23.329'	459276	2188799	toba Las Moras	surges
sc-186	19° 49.411'	99° 21.567'	462357	2191861	toba La Loma	surges
sc-187	19° 49.347'	99° 20.699'	463871	2191741	toba Buenaventura	ignimbrita
sc-188	19° 46.494'	99° 20.277'	464598	2186478	toba Buenaventura	ignimbrita
sc-189	19° 41.929'	99° 21.142'	463071	2178061	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-190	19° 41.668'	99° 20.887'	463516	2177579	toba Las Moras	deposito de caída
sc-191	19° 42.210'	99° 21.441'	462546	2178579	toba Las Moras	deposito de caída
sc-192	19° 39.792'	99° 21.203'	462919	2174186	toba Las Moras	deposito de caída
sc-193	19° 39.705'	99° 21.102'	463132	2173960	toba Las Moras	surges
sc-194	19° 39.702'	99° 21.073'	463182	2173954	toba Las Moras	depósitos de caída
sc-195	19° 38.411'	99° 24.332'	457484	2171584	ignimbrita SMC	ignimbrita lítica
sc-196	19° 41.277'	99° 23.577'	458813	2176868	toba Cisneros	ignimbrita
sc-197	19° 38.158'	99° 25.390'	455630	2171124	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-198	19° 41.525'	99° 25.708'	455093	2177335	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-199	19° 41.977'	99° 26.206'	454222	2178167	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-200	19° 42.110'	99° 26.229'	454182	2178419	toba Villa del Carbón	surges
sc-201	19° 42.413'	99° 26.161'	454306	2178954	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-202	19° 42.241'	99° 26.222'	454199	2178658	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-203	19° 42.175'	99° 26.234'	454177	2178535	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-204a	19° 39.836'	99° 25.582'	455303	2174221	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-204b	19° 39.836'	99° 25.582'	455303	2174221	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-205	19° 38.908'	99° 25.872'	454795	2172511	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-206	19° 42.164'	99° 26.574'	453583	2178516	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-207	19° 40.304'	99° 27.722'	451567	2175093	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-208	19° 40.436'	99° 27.926'	451212	2175337	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-209	19° 37.771'	99° 17.642'	469171	2170381	toba Las Moras	deposito de caída
sc-210	19° 36.776'	99° 16.871'	470508	2168546	toba Las Moras	deposito de caída
sc-211	19° 37.172'	99° 17.028'	470241	2169274	flujo de lodo	flujo de lodo

sc-212	19° 39.493'	99° 17.248'	469865	2173556	toba Cisneros	ignimbrita
sc-213	19° 44.593'	99° 26.425'	453852	2182998	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-214	19° 45.915'	99° 26.062'	454495	2185435	toba La Capilla	deposito de caída
sc-215	19° 42.915'	99° 27.824'	451403	2179907	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-216	19° 42.916'	99° 27.942'	451198	2179911	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-216b	19° 42.916'	99° 27.942'	451198	2179911	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-216L	19° 42.916'	99° 27.942'	451198	2179911	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-217	19° 43.819'	99° 29.167'	449062	2181582	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-218	19° 44.031'	99° 28.951'	449445	2181976	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc?
sc-219a	19° 43.784'	99° 29.257'	448905	2181517	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-219b	19° 43.784'	99° 29.257'	448905	2181517	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-220	19° 43.745'	99° 31.172'	445552	2181452	toba Cisneros	ignimbrita
sc-221	19° 43.745'	99° 31.173'	445552	2181452	toba La Capilla	deposito de caída
sc-222	19° 43.747'	99° 31.176'	445552	2181452	toba La Capilla	ignimbrita
sc-223	19° 43.746'	99° 31.178'	445552	2181452	toba La Capilla	surges
sc-224a	19° 43.746'	99° 31.178'	445552	2181452	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-224b	19° 43.746'	99° 31.178'	445552	2181452	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-225	19° 43.653'	99° 31.861'	444350	2181286	sierra Las Masas	domo
sc-226	19° 41.957'	99° 30.912'	446005	2178157	toba Villa del Carbón	ignimbrita bc
sc-227	19° 40.205'	99° 30.728'	446317	2174925	volcán La Bufa	domo
sc-228	19° 46.865'	99° 14.873'	474040	2187147	volcán La Muerta	derrame
sc-229	19° 41.769'	99° 18.302'	468032	2177761	domo post-colapso	derrame
sc-230	19° 41.569'	99° 18.232'	468153	2177387	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-231	19° 41.569'	99° 18.233'	468153	2177387	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-232a	19° 43.275'	99° 16.699'	470834	2180530	domo post-colapso	domo
sc-232b	19° 43.275'	99° 16.699'	470834	2180530	domo post-colapso	domo
sc-233a	19° 42.992'	99° 17.749'	469001	2180011	toba Cisneros	ignimbrita
sc-233b	19° 42.992'	99° 17.749'	469001	2180011	toba Cisneros	depósito de caída

sc-233c	19° 42.992'	99° 17.749'	469001	2180011	toba Cisneros	deposito de caída
sc-234a	19° 40.109'	99° 15.333'	473213	2174687	dep. no diferenciado	flujo de lodo
sc-234b	19° 40.109'	99° 15.333'	473213	2174687	dep. no diferenciado	deposito de caída
sc-234c	19° 40.109'	99° 15.333'	473213	2174687	dep. no diferenciado	surges
sc-235a	19° 48.742'	99° 13.278'	476823	2185081	volcán La Muerta	derrame de lava
sc-235b	19° 48.742'	99° 13.278'	476823	2185081	volcán La Muerta	deposito de caída
sc-236	19° 48.325'	99° 13.724'	476012	2189789	toba Cisneros	ignimbrita
sc-237	19° 46.724'	99° 13.762'	475973	2186883	toba Cisneros	ignimbrita
sc-238	19° 47.605'	99° 13.934'	475676	2188507	toba Cisneros	ignimbrita
sc-239	19° 47.638'	99° 15.723'	472553	2188572	toba Cisneros	ignimbrita
sc-240	19° 50.185'	99° 15.608'	472760	2193269	cerro cincoque	derrame de lava
sc-241	19° 52.456'	99° 15.274'	473350	2197457	cerro cincoque	domo
sc-242	19° 52.491'	99° 14.737'	474286	2197520	cerro cincoque	deposito de caída
sc-243	19° 52.706'	99° 14.884'	474031	2197920	cerro cincoque	deposito de caída
sc-244	19° 51.538'	99° 14.483'	474100	2195762	cerro cincoque	derrame de lava
sc-245	19° 51.248'	99° 14.892'	474078	2195265	cerro cincoque	domo
sc-246	19° 51.500'	99° 15.434'	473068	2195694	cerro cincoque	derrame de lava
sc-247	19° 52.281'	99° 16.062'	471974	2197138	cerro cincoque	ignimbrita
sc-248	19° 51.985'	99° 15.957'	472155	2196590	cerro cincoque	derrame
sc-249	19° 49.250'	99° 21.255'	462902	2191564	toba Buenaventura	surges
sc-250	19° 47.109'	99° 21.198'	462993	2187616	ignimbrita SMC	ignimbrita lítica
sc-252-1	19° 43.159'	99° 21.179'	463011	2180331	ignimbrita SMC	ignimbrita lítica
sc-252-2a	19° 43.159'	99° 21.179'	463011	2180331	toba Las Moras	surges
sc-252-2b	19° 43.159'	99° 21.179'	463011	2180331	toba Las Moras	depósitos de caída
sc-252-2c	19° 43.159'	99° 21.179'	463011	2180331	toba Las Moras	surges
sc-252-2d	19° 43.159'	99° 21.179'	463011	2180331	toba Las Moras	depósitos de caída
sc-252-3	19° 43.159'	99° 21.179'	463011	2180331	ignimbrita SMC	ignimbrita lítica
sc-253-1	19° 41.936'	99° 19.197'	466468	2178068	toba Las Moras	deposito de caída

sc-253-2	19° 41.936'	99° 19.197'	466468	2178068	toba Las Moras	deposito de caída
sc-253-3	19° 41.936'	99° 19.197'	466468	2178068	toba Las Moras	surges
sc-253-4	19° 41.936'	99° 19.197'	466468	2178068	toba Cisneros	ignimbrita
sc-254	19° 47.923'	99° 13.970'	475613	2189093	toba Cisneros	ignimbrita
sc-255	19° 46.053'	99° 14.290'	475050	2185646	volcán La Muerta	derrame de lava
sc-256	19° 47.895'	99° 13.952'	475613	2189093	volcán La Muerta	derrame de lava
sc-257	19° 45.563'	99° 21.594'	462290	2184762	ignimbrita SMC	avalancha
sc_258	19° 42.990'	99° 19.618'	465735	2180012	domo post-colapso	derrame de lava
sc-259	19° 46.494'	99° 15.238'	473396	2186461	volcán La Muerta	derrame de lava
sc-260a	19° 57.469'	99° 18.505'	467728	2206712	presa Requena	ignimbrita
sc-260b	19° 57.469'	99° 18.505'	467728	2206712	presa Requena	derrame de lava
sc-261	19° 57.609'	99° 18.520'	467702	2206969	presa Requena	lava columnar
sc-262	19° 57.585'	99° 20.454'	464330	2206931	presa Requena	ignimbrita
sc-263-x	19° 52.642'	99° 20.350'	464494	2197816	cerro El Epazote	derrame de lava
sc-263a	19° 41.540'	99° 29.888'	447790	2177382	toba Villa del Carbón	bloques y ceniza
sc-263a-pomez	19° 41.540'	99° 29.888'	447790	2177382	toba Villa del Carbón	bloques y ceniza
sc-263b	19° 41.540'	99° 29.888'	447790	2177382	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-263c	19° 41.540'	99° 29.888'	447790	2177382	toba Villa del Carbón	bloques y ceniza
sc-263d	19° 41.540'	99° 29.888'	447790	2177382	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-264	19° 43.929'	99° 29.233'	448948	2181786	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-265	19° 43.929'	99° 29.233'	448948	2181786	toba Villa del Carbón	ignimbrita
sc-266a	19° 42.776'	99° 25.900'	454763	2179643	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-266b	19° 42.776'	99° 25.900'	454763	2179643	ignimbrita SMC	ground surge
sc-266c	19° 42.776'	99° 25.900'	454763	2179643	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-266c-litico	19° 42.776'	99° 25.900'	454763	2179643	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-267	19° 46.037'	99° 24.607'	457037	2185651	ignimbrita SMC	ignimbrita
sc-267L	19° 46.037'	99° 24.607'	457037	2185651	ignimbrita SMC	ignimbrita

ANEXO 2

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS LEVANTADAS EN CAMPO

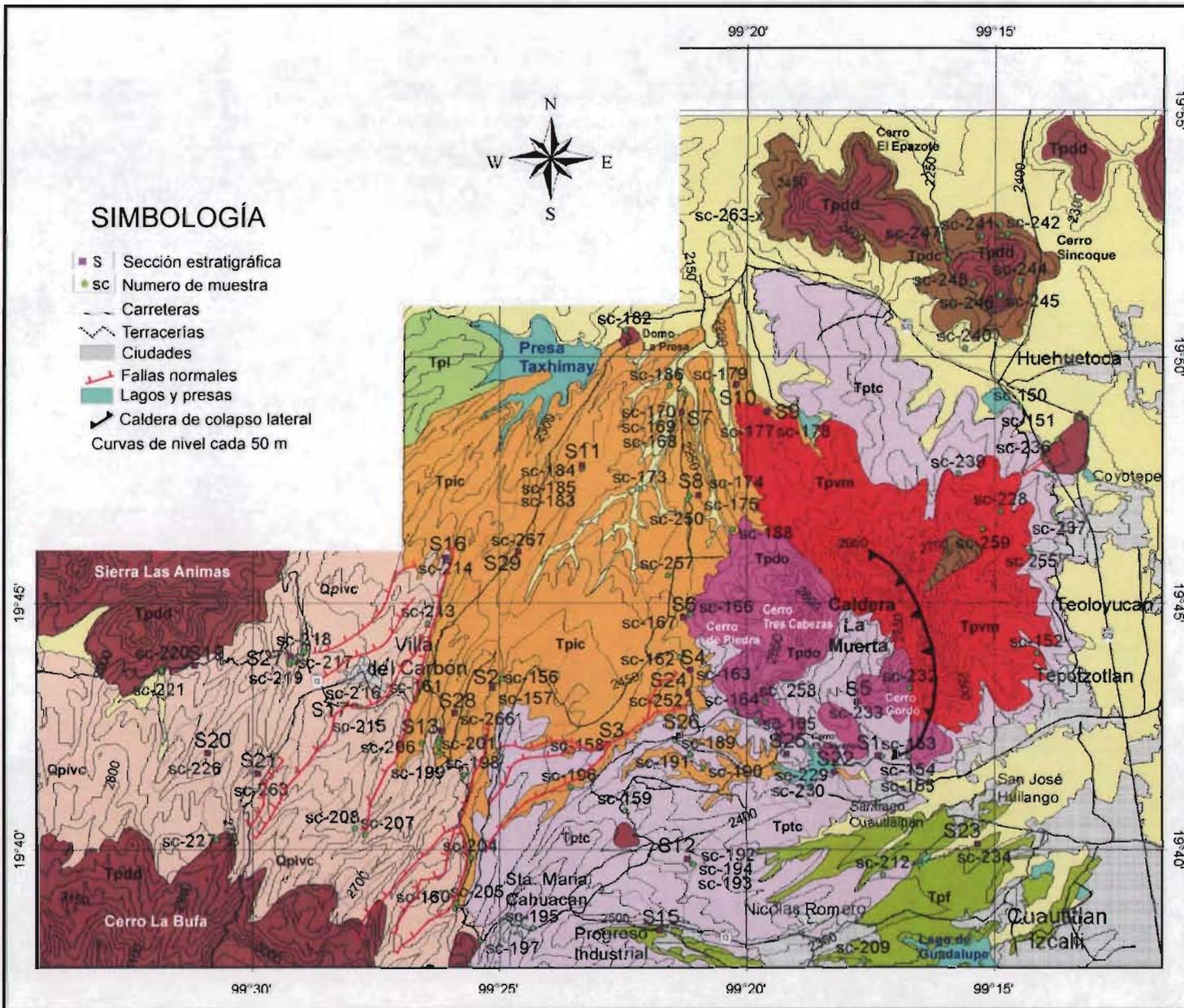
Secciones Estratigráficas	Latitud Norte	Longitud Oeste	Coordenadas UTM X	Coordenadas UTM Y	Espesor total (m)	Nombre de las Secciones
zona de gradícula: 14Q						
S1	19° 41.894'	99° 17.349'	469778	2177935	7	Buenos Aires
S2	19° 43.276'	99° 25.126'	456147	2180494	18.8	Los Dolores
S3	19° 42.147'	99° 22.812'	460185	2178399	31.4	El Gavillero
S4	19° 43.642'	99° 21.123'	463144	2181150	54.2	San Miguel Cañadas
S5	19° 42.992'	99° 17.749'	469001	2180011	7.3	La Estancia
S6	19° 44.695'	99° 21.271'	462856	2183162	63.5	Cerro de Piedra
S7	19° 48.874'	99° 21.311'	462802	2190871	86.9	La Loma I
S8	19° 47.173'	99° 20.970'	463421	2187713	91.9	La Loma II
S9	19° 48.891'	99° 19.574'	465833	2190895	105	Peña Alta
S10	19° 49.447'	99° 20.206'	464733	2191924	66.8	Buenaventura
S11	19° 47.799'	99° 23.330'	459273	2188895	38	Las Moras
S12	19° 39.792'	99° 21.203'	462919	2174186	21.5	La Golondrina
S13	19° 42.413'	99° 26.161'	454306	2178954	98	Cachihuapan
S14	19° 36.777'	99° 16.875'	470508	2168546	12.5	Guadalupe
S15	19° 38.356'	99° 21.763'	461971	2171475	17.5	Progreso Industrial
S16	19° 45.916'	99° 26.062'	454495	2185435	30.6	Campestre
S17	19° 42.916'	99° 27.942'	451198	2179911	20.8	El Plan

S19	19° 43.745'	99° 31.173'	445552	2181452	43.9	La Capilla
S20	19° 41.957'	99° 30.912'	446005	2178157	29.3	La Esperanza
S21	19° 41.540'	99° 29.888'	447790	2177382	14.5	Loma Mondo
S22	19° 41.569'	99° 18.232'	468153	2177387	43	Cuautlalpan
S23	19° 40.109'	99° 15.333'	473213	2174687	10.5	El Rosario
S24	19° 43.159'	99° 21.179'	463011	2180331	10.5	Las Cabañas
S25	19° 41.936'	99° 19.197'	466468	2178068	9.63	Cañadas
S26	19° 42.315'	99° 21.344'	462719	2178773	15.2	Cisneros
S27	19° 44.038'	99° 29.252'	448916	2181986	45	Los Domínguez
S28	19° 42.776'	99° 25.900'	454763	2179643	55.3	La Rosa
S29	19° 46.037'	99° 24.607'	457037	2185651	28	Toriles

ANEXO 3

Mapa Geológico

MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA NORTE DE LA SIERRA DE LAS CRUCES



SIMBOLOGÍA

- S Sección estratigráfica
- sc Numero de muestra
- Carreteras
- Terracerías
- Ciudades
- Fallas normales
- Lagos y presas
- Caldera de colapso lateral
- Curvas de nivel cada 50 m

LEYENDA

TERCIARIO	CUATERNARIO	
	RESIDUO HOLOCENO	
PLIOCENO	Qpivc	Tpl
	Tpdo	Tpl
	Tptc	Tpdc
	Tpic	Tpf
	Tpvm	Tpdd

Depósitos fluvio-lacustres

- Depósitos fluvio-lacustres del Plioceno al Holoceno
- Qpivc Toba Villa del Carbón - Secuencia de ignimbritas y depósitos de flujos de bloques y cenizas
- Tpl Depósitos de lahares
- Tpdo Domos de composición dacítica post-colapso caldérico
- Tptc Secuencia de depósitos piroclásticos estratificado que incluyen depósitos de caída de lapilli de pómez (toba las Moras) y depósitos de flujo piroclástico (toba Cisneros)
- Tpdc Depósitos de caída de lapilli de pómez
- Tpf Secuencia de flujos de lodo
- Tpic Ignimbrita San Miguel Cañadas - Ignimbrita masiva rica en líticos de lavas dacíticas-andesíticas
- Tpvm Volcán La Muerta - Lavas dacíticas-andesíticas pre-colapso
- Tpdd Domos dacíticos-andesíticos del Plioceno temprano

Caldera La Muerta

0 5 10 15 20 Km